ПНИИС
Госстроя СССР

МИСИ им. Куйбышева
Минвуза СССР

Рекомендации

по комплексному изучению и оценке строительных свойств песчаных грунтов

Москва 1984

gost.e-ecolog.ru

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ
И НАУЧНО-
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ИНСТИТУТ
ПО ИНЖЕНЕРНЫМ
ИЗЫСКАНИЯМ
В СТРОИТЕЛЬСТВЕ
(ПНИИИС) ГОССТРОЯ СССР

МОСКОВСКИЙ
ОРДЕНА ТРУДОВОГО
КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ИНЖЕНЕРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ
ИНСТИТУТ
ИМ. В.В. КУЙБЫШЕВА
(МИСИ ИМ. КУЙБЫШЕВА)
МИНВУЗА СССР

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО КОМПЛЕКСНОМУ ИЗУЧЕНИЮ И ОЦЕНКЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ СВОЙСТВ ПЕСЧАНЫХ ГРУНТОВ

Москва Стройиздат 1984

УДК 624.131.213

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

Рекомендации по комплексному изучению и оценке строительных свойств песчаных грунтов/ПНИИИС Госстроя СССР, МИСИ им.Куйбышева. – М.: Стройиздат, 1984. – 212 с.

Разработаны на основе обобщения опыта исследования песчаных пород для различных видов строительства.

Освещены вопросы комплексной оценки строительных свойств песков. Даны общие сведения о песках как природных образованиях; изложены основные принципы генетического подхода к изучению песков в строительных целях; даны рекомендации по назначению пунктов опробования и выбору методов исследования при инженерно-геологических изысканиях; описаны особенности полевых и лабораторных методов изучения состава, строения, состояния и свойств песков; установлены корреляционные зависимости между различными показателями свойств грунтов; приведены рекомендации по комплексированию методов исследования и обосновывается его технико-экономическая эффективность.

Табл.30, ил.76.

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

Р $\frac{3202000000-321}{047(01)-84}$ Инструкт.-нормат., I вып. 62–84

© Стройиздат, 1984

ПРЕДИСЛОВИЕ

Песчаные породы являются одним из основных объектов инженерно-геологического изучения и использования в строительной практике.

Это объясняется весьма широким распространением их в земной коре – примерно 20% общего объема осадочных пород; непрерывно прогрессирующим образованием песков в природных условиях и в результате техногенеза; приуроченностью песков к верхним слоям земной коры, к современным геоморфологическим элементам, т.е. нахождением их непосредственно в активной зоне взаимодействия различных сооружений с геологической средой; специфическими особенностями песков, обусловливающими их пригодность в качестве сырья для различных отраслей промышленности, местных минеральных строительных материалов, эффективного материала для проведения экспериментальных исследовательских работ и т.д.

Широко известны примеры возведения ответственных, часто уникальных сооружений (ГЭС, АЭС, ТЭС и др.) на песчаных основаниях, высоконапорных плотин и намывных оснований из песков под застройку промышленно-гражданских комплексов в различных регионах Союза ССР.

Большие объемы строительных работ на песчаных основаниях и из песчаных грунтов предстоит выполнить в одиннадцатой пятилетке при возведении энергетических, промышленных и гражданских объектов, мелиоративном и дорожном строительстве, предусмотренных решениями XXVI съезда КПСС.

Многие решения партии и правительства в области охраны природы и капитального строительства предъявляют повышенные требования к уровню проведения инженерно-геологических изысканий, к рациональному использованию и охране геологической среды, к повышению надежности и темпов строительства, достижению еще более высоких технико-экономических показателей в строительстве.

Все это обусловливает необходимость более углубленного изучения природы строительных свойств грунтов, в частности песков, теоретической и экспериментальной разработки и усовершенствования методики и методов их инженерно-геологического изучения и оценки.

В последние десятилетия, особенно в 60–80-е годы, внимание к инженерно-геологическому изучению песков заметно возросло. Данная тематика явилась предметом обсуждения на многих международных, всесоюзных и ведомственных конгрессах, конференциях, симпозиумах и совещаниях. В печати появилось много отдельных публикаций, отражающих результаты теоретических и экспериментальных исследований, опыт проектных, изыскательских и строительных организаций; разработан ряд нормативно-методических документов – СНиП, ГОСТ, СН, ВСН, рекомендаций и инструкций, а также региональных норм, регламентирующих классификацию, методику и методы изучения и оценки строительных свойств песков. Однако выполненная в последние годы широкая проверка на практике рекомендаций этих документов показала, что многие из них требуют уточнения и корректировки, подчас весьма существенной. В известной мере это связано с тем, что большинство материалов, положенных в основу действующих нормативно-методических документов, получено до 1970 г., т.е. 10–15 лет назад. Естественно, что научный и технический уровень выполненных работ, требования к точности и достоверности полученных результатов, методика их интерпретации претерпевали с тех пор существенные изменения.

Не случайно в строительной практике все еще нередки различные осложнения, в том числе деформации и аварии, связанные с недостаточной изученностью или с переоценкой свойств песков; имеют место и случаи недооценки свойств песков, приводящей и неоправданным затратам в строительстве.

Все вышесказанное свидетельствует о необходимости дальнейшего изучения строительных свойств песков с современных позиций генетического грунтоведения, усовершенствования и разработки новых нормативно-методических документов.

Назрела необходимость в обобщении отечественных достижений в рассматриваемой области, что способствовало бы более эффективному внедрению в строительную практику новейших научно-технических разработок. Появившийся в указанный выше период ряд монографий, посвященных пескам, имеют в основном чисто геологическую направленность, не содержат достаточно конкретных рекомендаций по изучению их строительных свойств, не отвечают в полной мере поставленной задаче.

В данной работе сделана попытка восполнить этот пробел. Принципиальной особенностью данной работы является комплексный подход к методике изучения и оценке строительных свойств песков, базирующийся на теоретически обоснованных принципах решения данной проблемы, отражающих необходимость полного и всестороннего учета особенностей состава, строения, состояния и свойств песков, в их взаимосвязи и взаимообусловленности, в природных массивах и в земляных сооружениях.

В соответствии с этим в работе излагается сущность генетического подхода к инженерно-геологическому изучению песков, детально рассматривается природа строительных свойств песков, даются общая система выделения важнейших категорий состава, строения, состояния и свойств песков и методика их изучения на основе учета генетических признаков.

Значительное внимание уделено методике и методам изучения структурно-текстурных особенностей песков, их прочностных и деформационных свойств, изменению свойств песков при динамических воздействиях, а также вопросам комплексного исследования песков полевыми и лабораторными методами.

Акцент сделан не только на теоретических аспектах рассматриваемых вопросов, но и на конкретных практических рекомендациях, опирающихся на значительный материал экспериментальных исследований и обобщение данных строительной практики в нашей стране и за рубежом.

Проблема изучения песчаных грунтов весьма многообразна. Ограниченный объем и определенная направленность данной работы обусловили исключение из рассмотрения ряда аспектов этой проблемы, касающихся методики изучения разнообразных физико-геологических и инженерно-геологических процессов и явлений, характерных для песчаных грунтов.

Данная работа явилась результатом коллективного труда сотрудников лаборатории исследования строительных свойств грунтов ПНИИИС – Р.С.Зиангирова, Э.Р.Черняка (главы 1, 3, 4, 7, 8, 9 и пп. 10.26–10.30) при участии А.В.Васильева (глава 3), А.П.Афонина (главы 4, 9) и кафедры инженерной геологии МИСИ – И.В.Дудлера (главы 2, 5, 6, 10) при участии А.Д.Потапова (глава 5), А.Н.Юлина (главы 5, 7) и Б.Л.Горловского (Киевское отделение института Теплоэлектропроект, глава 10). Общее редактирование выполнено Р.С.Зиангировым.

Замечания и предложения просим направлять по адресу: Москва, 105058, Окружной пр., 18, ПНИИИС.

1. ПЕСКИ КАК ПРИРОДНЫЕ ОБРАЗОВАНИЯ

РАСПРОСТРАНЕНИЕ И ГЕНЕЗИС

1.1. Песками называются мелкообломочные осадочные отложения, которые не обладают свойствами пластичности и содержат по весу менее 50% частиц крупнее 2 мм. Они образуются в результате разрушения (механического, химического и т.д.) различных горных пород и переноса продуктов разрушения к месту накопления осадка водой, ветром или другими способами. Факторы, способствующие выветриванию горных пород, транспортированию, переработке и отложению продуктов выветривания, действуют практически повсеместно. Отсюда огромное распространение песков среди других типов осадочных пород.

1.2. Процессы образования песчаного материала схематично представлены на рис.1. К обособлению зерен песчаной размерности и формированию песка приводят следующие основные процессы: выветривание, включающее дезинтеграцию и разложение; эксплозивный вулканизм (пирокластика); дробление при движении горных пород (катакластический материал) и при ударах; пеллитизация и осаждение из раствора как химическое, так и биохимическое.

Процессы, связанные с выветриванием, в определенных условиях приводят к обособлению зерен породы при колебаниях температуры, вымораживании или при гидратации, в результате чего порода распадается и превращается в массу свободных зерен. Химическое разложение кварцсодержащих пород также может приводить к образованию значительного количества песчаной фракции. При этом часть породы, в основном полевой шпат, превращается в глинистый материал, а остаток в виде кварцевых зерен песчаной размерности освобождается и накапливается в процессе формирования осадка. Песчаный материал может образовываться при ударном воздействии, однако обычная эрозия, по-видимому, не приводит к его образованию. В процессе вулканической деятельности возникает большое количество обломков песчаной размерности. Тектонические движения также могут дробить породы и приводить к возникновению небольших количеств песка. Значительные массы песка накапливаются в результате ледникового дробления, представляющего особый случай катакластического разрушения.

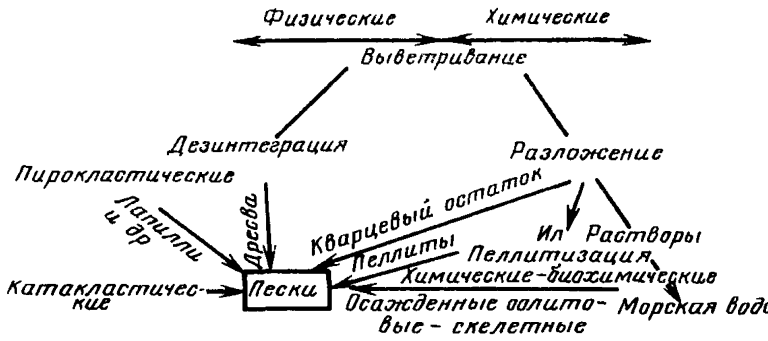


Рис.1. Процессы образования песчаного материала (по Ф.Петтиджону и др.)

Много материала песчаной размерности (0,05–2,0 мм) образуется при диагенетических процессах и при химическом и биохимическом осаждении. В последнем случае пески накапливаются в самом бассейне седиментации и не являются продуктом разрушения пород суши. При этом формируются пески, сложенные скелетами организмов и оолитами, которые могут образовывать значительные толщи.

1.3. Условия формирования песчаных грунтов во многом определяют их инженерно-геологические свойства. Важнейшие характеристики песка — состав и плотность сложения — закладываются уже на стадии седиментации. При этом крупность песка, соотношение основных фракций, степень обработки поверхности частиц, способ их укладки зависят от энергии породоформирующего природного агента, длительности его действия, условий среды и ряда других особенностей.

В зависимости от основных факторов, с деятельностью которых связано формирование песчаных пород, выделяются несколько генетических типов песков: аллювиальный, водно-ледниковый, эоловый, морской, элювиальный, озерный, делювиальный и некоторые другие.

1.4. Аллювиальные пески наиболее широко развиты в пределах европейской части территории Союза ССР. Они образуются в результате аккумулирующей деятельности больших и малых рек. Как правило, процессы осадконакопления начинают проявляться в среднем течении рек и особенно интенсивно — в ее низовьях. В соответствии с уменьшением живой силы реки от верховьев к устью уменьшается и крупность отлагаемых песчаных частиц. Наиболее ярко эта закономерность отмечается в горных реках. Для крупных равнинных рек она проявляется значительно слабее, что связано с поступлением различного по дисперсности материала из многочисленных притоков, расположенных на всем протя-

жении реки. Так, например, на участке от Куйбышева до Саратова на расстоянии 300–400 км средние размеры частиц уменьшаются от 0,3 до 0,2 мм. Более четкие закономерности изменения состава песчаного аллювия отмечаются в поперечном сечении реки. Здесь в соответствии с различными условиями формирования накапливаются отложения трех основных фаций. В центральной части, как бы образуя фундамент аллювиальных отложений, формируется фация руслового аллювия. Она представлена обычно более крупными песками и имеет максимальную мощность. Поверх руслового аллювия местами развиты отложения пойменной фации. Они сложены более мелкими по составу песками, часто пылеватыми и глинистыми. Среди отложений старичной фации аллювия, выполняющих замкнутые подковообразные понижения (старицы), пески занимают подчиненное положение и обычно представлены пылеватыми и глинистыми разновидностями, содержащими органические остатки. Указанные закономерности обычно осложняются миграцией русла.

Мощность песчаного аллювия довольно значительна: например, в среднем течении р.Волги она достигает 22 м, в долине р.Днепра она также превышает 20 м. На отдельных переуглубленных участках речного русла эта величина может быть еще более существенной.

1.5. Водно-ледниковые пески также имеют довольно широкое распространение в европейской части территории Союза ССР. Они приурочены преимущественно к северо-западным районам. Эти отложения образовались в результате деятельности талых ледниковых вод. Различают две группы водно-ледниковых песчаных отложений: образовавшиеся в пределах ледника (либо на непосредственно примыкающих к ним участках) или отложившиеся в перигляциальной зоне на некотором удалении от края ледника. К первой группе относятся озы, камы, песчаные валы, образовавшиеся как конечные морены напора за счет зандровых песков.

Среди этих видов отложений выделяются различные разновидности: например, озы подразделяются на галечниковые, смешанные, эрозионные и выдавленные, камы – на радиальные и маргинальные и т.д. Однако песчаные водно-ледниковые породы первой группы не играют большой роли в инженерно-геологической практике. Они имеют ограниченное распространение (преимущественно Кольский полуостров, Карелия, Архангельская область, Коми АССР, Прибалтийские республики, Калининская, Псковская, Новгородская, Смоленская области) и, как правило, образуют неблагоприятный для строительства холмистый и грядовый рельеф с большим падением склонов. Их состав очень разнообразен и обычно характеризуется большим содержанием крупнообломочных включений.

Вторая группа водно-ледниковых песчаных пород включает в себя отложения зандровых полей (равнин) и зандровых долин. Эти отложения занимают обширные (иногда сотни квадратных

километров) пространства. Пески, слагающие зандровые поля, формировались в результате деятельности целой сети мелких ручейков и протоков. Блуждая по примыкающим к леднику территориям, они отлагали конусы выноса (часто на разных уровнях), которые сливались своими раструбами и образовывали песчаные поля – зандры; долинные зандры приурочены к крупным ледниковым депрессиям и образуют значительные по протяженности поля вдоль больших рек. Состав зандровых песков отражает состав соответствующей морены и изменяется от гравийно-галечникового на участках, примыкающих к леднику, до мелкого и пылеватого – в краевых частях зандровой равнины. Общей особенностью зандровых песков являются слабая окантованность зерен песка, их полидисперсность, полиминеральность и незначительное содержание водно-растворимых солей и органических соединений. Крупные зандры встречаются по внешнему краю последнего (Валдайского) оледенения и почти исчезают северо-восточнее Онежского озера. От более ранних оледенений зандры сохранились лишь местами, например в верховьях рек Березины и Днепра, по восточным притокам Западной Двины, в Калининской области по верхней Волге, к югу и юго-востоку от конечно-моренной гряды Ростов–Иваново и т.д.

1.6. Эоловые пески формируются под действием ветра: песок перемещается либо во взвешенном состоянии, образуя песковетровый поток, либо перекатывается по поверхности. Мощные эоловые отложения могут образовываться лишь под действием длительных, относительно постоянных ветровых потоков, обладающих высокими скоростями (от 3–4 до 9–12 м/с). Такие условия возникают лишь на открытых пространствах, в связи с чем эоловые пески развиты главным образом в пустынях (барханы) и в меньшей степени – по берегам морей, озер, по долинам рек (дюны).

Барханные пески образуют серповидные песчаные бугры (уклоны подветренного и наветренного склонов соответственно равны 30–33° и 5–12°) и часто формируют обширные пространства с грядово-бугристым ландшафтом. Мощность барханных песков измеряется десятками метров (известны барханы высотой более 110 м). Барханные отложения развиты в Прикаспийской низменности, где они занимают большую часть Астраханской области, часть территории Волгоградской, Западноказахстанской и других областей.

Дюны (речные, морские) обычно тянутся в виде холмов параллельно береговой линии. Их высота изменяется от 5–10 (речные) до 10–13 м (морские). Различаются дюны грядовые и параболические. Последние напоминают барханы и возникают из грядовых дюн, концы которых закреплены растительностью. Дюны встречаются по берегам большинства наиболее крупных рек европейской части Союза ССР (чаще всего на вторых и третьих террасах) и по северному побережью Финского залива.

Формирование эоловых отложений происходит, как правило, за счет перевевания морских прибрежных песков, водно-ледниковых отложений (северные районы) и аллювиальных террасовых песчаных пород. В связи с этим они сохраняют некоторые черты, свойственные породам других генетических типов. Их отличие заключается в уменьшении количества пылеватых и глинистых частиц, в лучшей сортировке материала и в повышении степени обработки песчаных частиц (они приобретают более окатанную форму и, как правило, матовую поверхность).

1.7. Морские пески подразделяются на абразионные, непосредственно связанные с разрушением берегов моря, и денудационные, приносимые реками за счет их эрозионной деятельности. Состав абразивных песков может быть весьма своеобразным и содержать минералы, редко встречающиеся в других песках (оливин, гранат, магнетит и т.п.). Пески этой группы обычно залегают неширокой полосой вдоль берега моря. Денудационные пески, как и большинство песков, слагающих континентальные толщи, имеют преимущественно кварцевый состав. Они распространены в зоне, простирающейся местами до десятков километров.

Морские пески, как правило, хорошо отсортированы и окатаны. С увеличением глубины дисперсность песков повышается, в них появляются прослойки глинистых пород.

Наряду с современными морскими песками, развитыми вдоль побережья Черного и северных морей, на территории европейской части СССР встречаются и древние морские пески, залегающие под слоем более молодых отложений; их образование связано с трансгрессиями морей в предшествующие эпохи. Эти отложения, представленные переслаиванием мощных толщ песков и глин, развиты в бассейнах нижнего течения Печоры, Северной Двины, на Кольском полуострове, в бассейне Каспийского моря и в других районах.

1.8. Элювиальные пески формируются на месте разрушения горных пород в процессе их физического и химического выветривания и выщелачивания атмосферными агентами. Состав и количество песков зависят от устойчивости горных пород, их состава, условий залегания и климатических факторов. При выветривании кислых пород, например гранитов, продукты разрушения состоят в основном из кварца, так как нестойкие минералы подвергаются разрушению, распаду и выщелачиванию. При выветривании основных пород (например, базальтов) образовавшиеся на первой обломочной стадии песчаные частицы представляют собой смесь минералов преимущественно химически нестойких. Первичный кварц в них, как правило, отсутствует. Поэтому при разрушении основных пород почти никогда не образуются чистые кварцевые пески. Общими для всех элювиальных песков являются увеличение их крупности с глубиной, существенная неоднородность по составу, отсутствие слоистости и наследование текстурных особенностей коренных пород.

Обычно элювиальные песчаные породы образуются в местах выхода на поверхность коренных пород в виде каменных россыпей. Они, как правило, маломощны и не имеют широкого распространения.

1.9. Развитые в пределах европейской части территории Союза ССР пески в подавляющем большинстве случаев относятся к перечисленным выше генетическим типам. Следует отметить, что на отдельных участках могут встречаться песчаные отложения, сформированные под влиянием иных факторов (делювиальные, озерные, пролювиальные, лиманные и т.п.). Однако эти отложения не играют заметной роли в инженерно-геологическом отношении. Они обычно не образуют значительных толщ, занимают небольшие площади, представлены, как правило, переслаиванием песчаных и глинистых пород.

Разделение песков по условиям их формирования не всегда позволяет получить представление об их инженерно-геологических особенностях. Действительно, в пределах каждого генетического типа можно встретить пески практически во всем диапазоне изменения их состава и свойств: от пылеватых до гравелистых, от рыхлых до плотных, от воздушно-сухих до водонасыщенных и т.п. Однако при составлении геологических карт, построении геолого-литологических разрезов, выделении инженерно-геологических элементов сведения о генезисе песков приобретают очень важное значение.

Данные о генезисе песков позволяют полнее понять природу их строительных свойств, более объективно выбрать методику проведения исследований и составления соответствующих прогнозов. Вопрос о сущности и методологии генетического подхода к изучению и оценке строительных свойств песчаных грунтов рассматривается в разделе 2 данных Рекомендаций.

1.10. Условия залегания песчаных отложений определяются их конфигурацией, простиранием и мощностью. Выделяются четыре типа основных форм песчаных тел и ряд производных от них [16]. Изометричные песчаные тела имеют отношение длины к ширине примерно 1:1 и могут покрывать площадь от нескольких до тысяч квадратных километров. Их называют пластами и покровами. Удлиненные песчаные тела, наоборот, характеризуются существенным превышением длины над шириной и могут быть отнесены к одному из трех типов: линзовидные, лентовидные и дендроидные. Обычные формы песчаных тел показаны на рис.2.

У линзовидных тел отношение длины к ширине обычно не превышает 3, у лентовидных – 20:1 и более. Дендроидные залежи обычно более извилисты, имеют многочисленные ответвления.

Для аллювиальных отложений, например, характерна сильно вытянутая форма. Ширина колеблется от 15–20 м до 50 км в сложных руслах. Рисунок отложений часто имеет ветвистую, сетчатую форму. В дельтах разветвленная сеть русел создает определенную обстановку отложения песков, существенно отличающую-

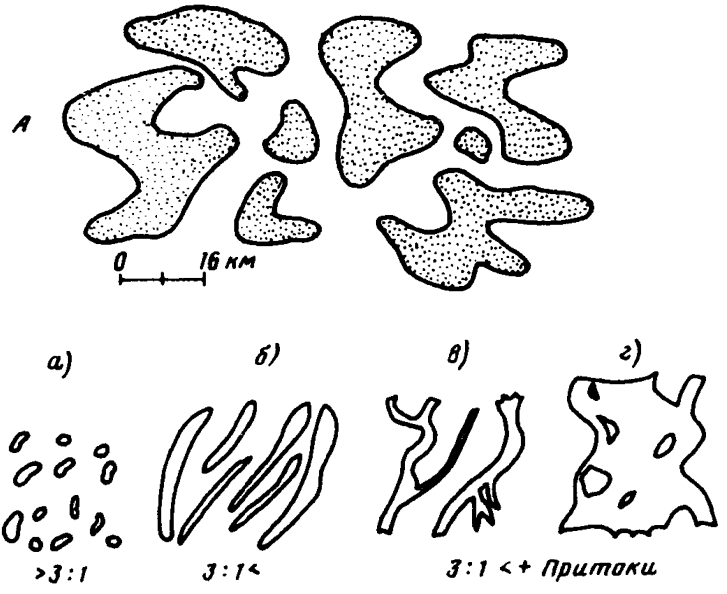


Рис.2. Обычные формы песчаных тел
А – пласты или покровы; *Б* – удлиненные: *а* – линзовидные, *б* – лентовидные; *в* – дендровидные; *г* – пояса

ся от отложений в аллювиальной долине. Здесь образуются ветвящиеся бары, представляющие собой вытянутые, иногда прямолинейные залежи. Отложения морского шельфа имеют чрезвычайно разнообразные размеры и формы. Они могут залегать в виде неправильных небольших линз, удлиненных лентовидных залежей, а также обширных покровов, распространяющихся на многие километры. Зандровые пески залегают, как правило, в виде покровных залежей.

1.11. В осадочной оболочке Земли пески составляют 18–21% [33]. В пределах территории СССР они занимают площадь 3,5 млн.км^2 (16%). Наибольшее значение среди них имеют аллювиальные и водно-ледниковые пески, ими занято более половины всей площади. Четверть территории, занятой песками, приходится на породы эолового генезиса. Остальные отложения развиты в меньшей степени: морские – 7–8% площади, озерные – 1–2% и т.д. Кроме того, значительные территории заняты нерасчлененными песчано-глинистыми породами.

ХАРАКТЕРИСТИКА ХИМИКО-МИНЕРАЛЬНОГО СОСТАВА ПЕСКОВ

1.12. Минеральный состав имеет большое значение при исследовании песков, так как влияет на их прочность, деформируемость, плотность, адсорбционные, тепловые и электрические свойства. Помимо этого, знание минерального состава в некоторых случаях дает возможность прогнозировать изменение свойств песков после окончания строительства.

Минеральный состав песков характеризуется составом компонентов их твердой фазы. Он определяется, как правило, источником сноса и лишь частично преобразуется процессами седиментации. Важной особенностью минералов является их избирательная способность к истиранию, в результате чего зерна более мягких минералов приобретают меньшие размеры по сравнению с более твердыми. Это приводит к тому, что в процессе транспортировки пески, возникшие из одного и того же источника, отличаются по минеральному составу в разных частях бассейна седиментации.

В основном пески состоят из минералов, которые могут быть представлены обломками кристаллов, кристаллами, обломками горных пород, а также содержать гумус или остатки разложившихся растений и животных. Пески в большинстве случаев представляют собой полиминеральные образования. В их составе встречаются в основном 25—30 минералов, однако практическое значение имеют 4—5 минералов, %: кварц – 70, каолин – 8; полевой шпат – 8; кальцит – 7; доломит – 3; хлорит – 1; разные минералы – 3.

1.13. Кварцевые пески – наиболее распространенный в земной коре тип песков. Возникновение и накопление их происходит, как правило, в условиях тектонического покоя или в платформенных условиях, в областях гумидного климата, где возможно глубокое разложение кварцсодержащих пород. Пески встречаются в отложениях верхнего девона, нижнего карбона, юры, мела, палеогена и породах четвертичного возраста. Они встречаются среди отложений всех генетических типов. Сравнительно редкими являются элювиальные пески, образующиеся при выветривании песчаников и кварцитов. Месторождения этих песков имеются на Урале и в Прибайкалье. Флювиогляциальные кварцевые пески встречаются в районе Коломны (Репинское месторождение) и в других районах. Аллювиальные кварцевые пески имеют широкое распространение; в качестве примера можно назвать Луховицкое месторождение в Московской области. Озерные пески встречаются в районе Челябинска (Чуриловское месторождение), эоловые – в Белоруссии, Средней Азии, Поволжье, морские пески – в Подмосковье (Люберецкое месторождение), на Урале (Кичиганское месторождение), а также в приморских районах. Особенно чистые кварцевые пески связаны с месторождениями угля и каолина.

1.14. Химический состав песков определяется их минеральным составом, в связи с этим в песках выделяются четыре группы элементов: щелочные, щелочноземельные, алюминий, кремнезем. Среди щелочных элементов преобладают Na и K, которые содержатся в обломочных зернах щелочных полевых шпатов и мусковита.

Основными носителями щелочноземельных минералов в песках являются карбонаты и глинистые минералы. Наибольшим распространением пользуются Ca и Mg.

Алюминий является единственным представителем третьей группы. Он присутствует в обломках полевых шпатов, слюд и в глинистой фракции. Кремнезем является основной составляющей песков. Его содержание в породах четвертичного возраста достигает 95% и более.

Кроме перечисленных групп в песках присутствует железо в закисной и окисной формах. С накоплением, трансформацией и миграцией соединений железа связана одна из важных особенностей песков – его способность к упрочнению во времени.

Основными химическими соединениями для минералов песков являются окислы и соли. Главнейший окисел SiO_2 – двуокись кремния и кремнезем. В свободном состоянии находится в виде кварца. Помимо кристаллического кварца кремнезем может встречаться в тонкодисперсном состоянии в виде коллоидных частиц (геля кремнезема), а также в виде аморфной рубашки, образующейся на зернах кварца при их дроблении. В связанном состоянии находится в виде кварца. Помимо кристаллического кварца кремнезем может встречаться в тонкодисперсном состоянии в виде коллоидных частиц (геля кремнезема), а также в виде аморфной рубашки, образующейся на зернах кварца при их дроблении. В связанном состоянии присутствует в силикатах, алюмосиликатах и других соединениях. Встречаются в песках окислы железа как водные, так и безводные (содержание их не превышает единиц процента). Это лимонит $2Fe_2O_3\ 3H_2O$, гематит Fe_2O_3, магнетит Fe_2O_4.

Все описанные выше химические соединения характеризуются малой активностью и инертностью, что определяется свойствами входящего в них кремнезема. Некоторым генетическим типам песков присущи определенные особенности химического состава. Так, в аллювиальных песках содержится повышенное количество кремнезема, а в древнем аллювии много водно-растворимых соединений. У ледниковых песков химический состав непостоянен, что связано, очевидно, с особо сложными условиями формирования. В эоловых песках содержится много водно-растворимых соединений.

1.15. Структурно-текстурные особенности песков являются важнейшей характеристикой их строения.

К структурным особенностям относятся гранулометрия песков, морфология их зерен, вид и характер развития связей между ними; к текстурным особенностям – компактность упаковки и ориентировка слагающих пески частиц.

Целью изучения структуры и текстуры песков является выяснение обстановки осадконакопления, генезиса и фациальной принадлежности пород, а также установление природы их физико-механических свойств, чему придается важное значение в генетическом грунтоведении.

Одним из главных показателей структуры песков являются размер частиц и их количественное соотношение. По соотношению частиц разного размера выделяют три типа песков: полидисперсные, бидисперсные и монодисперсные [24] . В полидисперсных содержание частиц нескольких размеров примерно одинаковое, в бидисперсных преобладают частицы двух смежных фракций, а в монодисперсных – одного размера (фракции).

1.16. Морфологический облик частиц – их форма и характер поверхности являются главным образом отражением процессов транспортировки частиц (способов транспортировки, интенсивности и длительности обработки).

Форма песчаных зерен (их внешний облик, габитус) оценивается по способу Мекки баллами: округлые (1), полуокруглые (2), угловатые (3). При этом для большей представительности данных исследований определяется средневзвешенный балл по результатам изучения 300–400 зерен из каждого образца или фракции.

По данным П.И.Фадеева, во всех песках хорошо прослеживается зависимость между формой и размером кварцевых зерен: в крупных фракциях (> 0,5 мм) сосредоточиваются зерна преимущественно округлой формы; во фракциях 0,1–0,5 мм форма зерен смешанная; мелкие фракции (< 0,1 мм) состоят в основном из угловатых зерен (рис.3).

Определенный интерес представляют сведения о характере по-

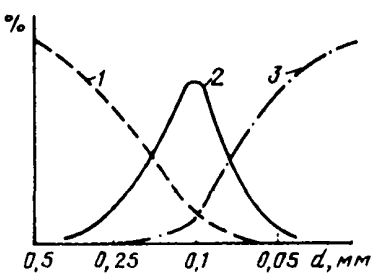


Рис.3. Кривые распределения частиц по степени округлости-угловатости в песках Мещеры
1 – округлые; *2* – полукруглые; *3* – неокруглые (угловатые)

верхности зерен – наличии неровностей, трещин и других особенностях. Обычно проводится изучение ямочных и межъямочных участков, сопровождаемое качественным описанием поверхности зерен.

Морфологический облик песчаных зерен обусловлен комплексом природных условий образования и постгенетических преобразований песчаных пород. По данным ряда авторов, морфологические исследования позволяют достаточно четко выявить генетическую и фациальную принадлежность песков, однако во многих случаях выполнить это с помощью существующих методик достаточно трудно, а иногда и невозможно. Так, пески, находящиеся в центре Сахары, состоят на 90–100% из зерен, имеющих типично эоловую обработку, – круглых и матовых; в прибрежных зонах такие зерна могут отсутствовать полностью. В аллювиальных песках нередко лишь в сотнях километров от истока реки (особенно горных рек) появляются следы водной обработки – зерна становятся окатанными с блестящей поверхностью, при этом сохраняется значительный процент угловатых зерен.

1.17. Одной из косвенных характеристик структуры песков является их пористость – главным образом размер и морфология пор.

Как известно, пористость оказывает решающее влияние на сжимаемость, прочность и ряд других свойств песков. Она изменяется в достаточно широком диапазоне и зависит от крупности песка, наличия тонкодисперсной составляющей, морфологии песчаных частиц и других факторов.

Пористость выше у хорошо отсортированных песков по сравнению с неоднородными по гранулометрическому составу. По данным В.В.Охотина, минимальная пористость достигается при соотношении диаметров трех фракций 16^2:16:1. Наличие глинистых частиц способствует образованию более рыхлых отложений. На повышение пористости влияет увеличение угловатости и шероховатости песчаных зерен.

Наряду с данными об общей пористости (характеризующей в основном текстурные особенности песка) важно знать размер и морфологию пор. Так, по имеющимся данным [15], при одинаковой пористости песчаного материала, представленного в одном случае частицами размером 0,3 мм, а в другом – 0,3–1 мм, водопроницаемость оказывается существенно различной – в 84 раза.

В процессе диагенетических преобразований за счет фильтрации природных вод через толщу песчаных пород в поры может вноситься тонкодисперсная фракция, а также гипс, кальцит, кремнекислота, гидроокислы железа и другие соединения. Это не только уменьшает общую пористость, но, что особенно важно отметить, приводит к формированию кристаллизационных цементационных связей между частицами, существенно повышающих прочностные свойства песков и меняющих характер поведения песков при различных внешних воздействиях.

1.18. Текстура осадочных горных пород отражает обстановку осадконакопления и отличается большим разнообразием.

В песчаных грунтах преобладают, как правило, слоистые текстуры.

Слоистость в толщах песчаных грунтов проявляется в смене пластов, слоев и слойков как в вертикальном, так и в горизонтальном направлении. Выделяют три морфологических типа слоистых текстур: горизонтальную, косую и волнистую. Каждый из этих типов подразделяется в свою очередь на ряд подтипов и видов.

Горизонтальная слоистость встречается в песчаных грунтах озерного, озерно-ледникового, морского (глубинного) и аллювиального происхождения. Волнистая слоистость характера для зоны морских волнений, заливов и озер, речных пойм и эоловых песков. Косая слоистость связана с поступательно-направленным турбулентным движением водной среды в реках, морях и временных потоках.

Кроме основных типов слоистости в песках существуют переходные косоволнистые текстуры, характерные для эоловых песков, отложений морских течений, реже речных пойм, а также более сложные формы, связанные с подводными оползаниями осадков и другими нарушениями.

ПЛЕНОЧНЫЕ ОБРАЗОВАНИЯ НА ПОВЕРХНОСТИ ПЕСЧАНЫХ ЧАСТИЦ

1.19. В большинстве случаев поверхность частиц покрыта тонкой пленкой, придающей пескам желтовато-бурую и красноватую окраску.

Поверхностные пленки образуются на зернах песка в процессе формирования и последующих диагенетических преобразований (физической адсорбции из растворов и хемосорбций). По минеральному и химическому составу различают два типа пленок в песках – силикатный и железистый, главными химическими компонентами которых являются окись кремния, глинозем и окись железа. В состав силикатных пленок входят один или несколько глинистых минералов, а также глауконит и хлорит, в железистых – минералы железа, реже – марганца.

Выделяются следующие типы пленок на поверхности песчинок.

I тип – глинистый. С поверхностью кварцевых зерен оболочки связаны чаще всего через обменный Ca^{2+}. Вытеснение последнего вызывает отделение оболочек; песок обесцвечивается, давая окрашенные суспензии.

II тип – железистый. Оболочки представляют коллоидный комплекс, состоящий в основном из гидроокислов Fe и Al и прочно связанных с поверхностью песчинок. Вещество оболочек растворяется в минеральных и органических кислотах.

III тип – переходный между I и II типами. Вещество оболочек характеризуется невысоким отношением SiO_2/Al_2O_3 и при обычном значении pH почти электронейтрально.

IУ тип – оболочки смешанного типа, включающие в себя глинистые оболочки (оболочки I типа) с более грубыми частицами и двойные оболочки, у которых внутренний слой состоит из железистого, а внешний – из глинистого вещества.

Пленки различных песков европейской части СССР представляют собой агрегаты из микроскопических частиц и чешуек размером до 0,05–0,5 мм.

Вещество оболочек может находиться либо в кристаллическом, либо в коллоидно-аморфном или метастабильном состоянии. Состав пленок отражает особенности генезиса и парагенезиса песков.

Наибольшей механической устойчивостью обладают железистые пленки, меньшей – пленки кристаллического строения – каолинитовые, гидрослюдистые и смешанного состава.

В процессе формирования морских песков чаще всего образуются гидрослюдистые, реже монтмориллонитовые пленки, в аллювиальных – каолинит – гидрослюдистые, в ледниковых – гидрослюдистые. На стадии диагенеза формируются силикатные, железистые и смешанные пленки. Среди силикатных наиболее распространены гидрослюдистые пленки, особенно характерные для средних широт. Каолинитовая пленка типична для жаркого гумидного климата.

1.20. Поверхностные пленки играют важную существенную роль в упрочнении песков. Из-за малой удельной поверхности песчаных зерен (десятки, сотни квадратных сантиметров в 1 г породы) в песках практически не возникает первичное сцепление (обусловленное водно-коллоидными и молекулярными силами), характерное для глинистых пород. В связи с этим долгое время пески рассматривались как несвязные, не обладающие сцеплением породы. Однако последними исследованиями доказано, что в процессе диагенеза во многих песках возникает и развивается сцепление упрочнения (по терминологии Н.Я.Денисова) за счет взаимодействия пленочных образований на поверхности песчаных зерен. Это могут быть пленки кремниевой кислоты, толщина которых достигает нескольких десятков ангстрем, железистые новообразования или глинистые пленки, резко увеличивающие прочность породы при ее подсыхании.

Процессы физико-химического взаимодействия частиц важны не только с точки зрения познания природы прочности песков. Они имеют и большое практическое значение. В промышленном, гражданском и гидротехническом строительстве все шире используется намыв песка для различных целей.

Работами Гидропроекта, МИСИ, ПНИИИС и многих других организаций установлено, что на свойства намытых песков существенно влияют развивающиеся в них процессы упрочнения, роль которых со временем увеличивается: весьма заметно повышается

сопротивление сдвигу, сопротивление внедрению зондов, возрастают скорости распространения продольных и поперечных волн, уменьшаются осадки, улучшаются условия возведения зданий, повышаются устойчивость профильных намывных сооружений и динамическая устойчивость намытых массивов.

Этот процесс начинает развиваться с первых дней после окончания намыва и продолжается в течение нескольких лет, в том числе после завершения самоуплотнения намытых песков. Наиболее интенсивно процесс упрочнения развивается в первые 1–2 года, заметно продолжаясь до 3–4 лет после окончания намыва. Рост упрочнения к 5–6 годам становится обычно малозаметным, хотя имеются данные о фиксации этого процесса и в более поздние сроки. Все это следует принимать во внимание при проектировании намывных сооружений, организации геотехнического контроля за их возведением, проведении изыскательских работ на намывных территориях и прогнозировании изменения свойств намытых песков во времени и под влиянием различных техногенных воздействий. Это позволит более обоснованно назначать расчетные характеристики намытых грунтов на период строительства и эксплуатации сооружений.

2. СТРОИТЕЛЬНЫЕ СВОЙСТВА ПЕСКОВ

ОСНОВНЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О СТРОИТЕЛЬНЫХ СВОЙСТВАХ ПЕСКОВ И ГЕНЕТИЧЕСКОМ ПОДХОДЕ К ИХ ИЗУЧЕНИЮ

2.1. Широкое использование песчаных пород в качестве грунтов, т.е. в качестве основания, среды и материала для возведения различных сооружений, базируется на использовании и мобилизации их определенных свойств.

Постановка соответствующих изыскательских работ, прогнозирование взаимодействия сооружений с песчаными грунтами, проектирование земляных сооружений из песков, инженерно-геологическое обоснование проекта производства строительных работ, решение широкого круга вопросов охраны геологической среды и ряда других задач требуют знания прочности, сжимаемости, динамической устойчивости, водопроницаемости песков, подверженности их разнообразным физико-геологическим процессам и явлениям, закономерностей гранулометрического фракционирования, уплотняемости, формирования структурных связей. Изучение песков некоторыми методами невозможно без учета их влагоемкости, электрических, магнитных и других свойств.

2.2. Свойства песков в строительной практике проявляются под влиянием различных природных и техногенных воздействий, при этом пески оказываются в измененном напряженном и влажностном режиме, нередко в условиях нарушения естественной

структуры. Как правило, решение многих практических задач требует изучения, оценки и одновременного учета определенного комплекса свойств песчаных грунтов. В этой связи представляется целесообразным и правомерным дать следующее определение понятию "строительные свойства песков".

Под строительными свойствами песков следует понимать их физические, физико-химические, водные и физико-механические свойства, проявляющиеся под влиянием разнообразных природных и техногенных воздействий при строительстве и эксплуатации инженерных сооружений.

2.3. Оценка каждого строительного свойства песка требует рассмотрения и учета комплекса основных факторов, определяющих это свойство: внутренних (состав, строение, состояние) и внешних (вид, характер и величина воздействия), а также корреляции его с показателями других свойств.

Только такой комплексный подход обеспечивает возможность объективного и надежного решения широкого круга практических вопросов:

разработки методики и методов инженерно-геологического изучения песков;

обоснованной оценки показателей строительных свойств песков;

прогнозирования изменения свойств песков в процессе строительства и эксплуатации сооружений;

выбора методов технической мелиорации песков;

установления требований к технологии производства строительных работ при проходке котлованов, организации водопонижения, возведению насыпных и намывных сооружений из песков;

обоснованного подхода к выбору песков-аналогов для решения специальных вопросов на первых стадиях проектирования;

осуществления оптимальной методики геотехнического контроля за возведением земляных сооружений из песков;

составления инженерно-геологической и строительной классификации песков;

разработки соответствующих нормативно-методических документов.

2.4. Успешное изучение песчаных грунтов как многокомпонентных систем определенного состава, строения, состояния и свойств, изменяющихся во времени под влиянием природных и техногенных процессов, возможно только на генетической основе.

"Генетический подход при изучении грунтов является методологической основой грунтоведения, благодаря которой оно относится к наукам геологического цикла" [22, с.8].

Следует заметить, что данное положение далеко не всегда реализуется в строительной практике. В известной мере это связано с недостаточной разработкой и конкретизацией вопроса о сущности генетического подхода к изучению строительных свойств грунтов, в частности песков. Необходимые мероприятия по обеспечению

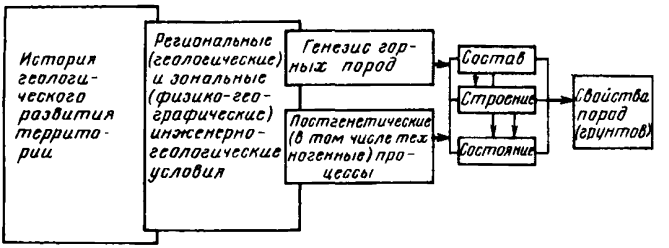


Рис.4. Схематическая причинно-следственная связь между генетическими факторами и комплексами категорий грунтовых характеристик

генетического подхода к изучению строительных свойств песков приведены в нижеследующих пунктах.

2.5. Исходя из теоретических положений, выдвинутых академиком Е.М.Сергеевым и развиваемых его школой, представляется правомерным дать следующую трактовку понятию "генезис пород": генезис характеризует происхождение горных пород (грунтов), особенности их формирования, существования и поведения в определенных геологических и физико-геологических условиях под воздействием природных и техногенных процессов, в том числе постгенетических.

2.6. История развития каждого района, его региональные (геологические) и зональные (физико-географические) условия, а также техногенные воздействия оказывают определенное влияние на генетические особенности горных пород и их постгенетические изменения. Все это обусловливает конкретный состав, строение, состояние каждой разновидности горных пород и в конечном итоге строительные свойства грунтов и их изменения при техногенных воздействиях (рис.4).

2.7. Осуществляя генетический подход к изучению и оценке строительных свойств песков, как и любых других горных пород, следует выделять разный уровень учета генезиса:

макроуровень – учет основных общих особенностей, присущих данному генетическому типу пород;

мезоуровень – учет характерных особенностей данного генетического типа пород применительно к определенным региональногеологическим и зонально-географическим условиям;

микроуровень – учет специфических особенностей состава, строения и состояния пород, в первую очередь их структурных особенностей.

Макроуровень влияет на выработку методики изысканий; мезоуровень уточняет методику и методы изысканий; микроуровень позволяет понять природу изучаемых показателей и облегчает интерпретацию результатов изысканий.

Следует подчеркнуть, что большинство признаков состава,

строения и состояния песков являются генетически унаследованными; их объективная характеристика може быть дана только при использовании комплекса соответствующих показателей, наиболее полно и ярко отражающих роль генезиса как главного фактора, обусловливающего инженерно-геологические особенности любой горной породы.

2.8. Исходя их положений, сформулированных в пп.2.4–2.7, сущность генетического подхода к изучению строительных свойств песков заключается в выполнении следующих требований:

учитывать общие инженерно-геологические особенности, присущие данному генетическому типу породы;

учитывать характерные особенности данного генетического типа породы применительно к определенным регионально-геологическим и зонально-географическим условиям;

выявлять и оценивать соответствующими показателями генетические признаки породы;

устанавливать и учитывать природу физических, физико-химических и физико-механических свойств породы;

учитывать специфические особенности состава, строения и состояния пород при характеристике их строительных свойств;

проводить инженерно-геологические изыскания и исследования грунтов по методике и с применением методов, учитывающих генетические особенности грунтов;

осуществлять интерпретацию результатов лабораторных и полевых исследований грунтов с использованием комплекса показателей, отражающих их генетические особенности;

составлять прогнозы поведения грунтов и изменения их свойств в процессе строительства и в период эксплуатации сооружений с учетом данных о генетических особенностях и природе свойств грунтов (рис.5).

2.9. Необходимость и целесообразность учета генетических особенностей песков при изучении их строительных свойств подтверждается многочисленными исследованиями, а также успешной практикой составления региональных норм.

При выполнении изыскательских и исследовательских работ, интерпретации и сопоставлении опытных данных с материалами нормативно-методических документов рекомендуется учитывать следующие результаты производственных исследований характера и степени влияния генезиса песков Прибалтийского региона на их строительные свойства.

а) Влияние генезиса песков на сопротивление динамическому зондированию (по данным В.И.Лебедева, для песков средней крупности при коэффициенте пористости $e=0{,}67$) характеризуется следующими данными:

пески	$eo\,Q_4$	$a\,Q_4$	$m\,Q_4$	$fg\,Q_3$
$P_д$, МПа...	1,5	3	6	8

Нетрудно видеть, что по показателю $P_Д$ эоловые (eoQ_4) и аллювиальные (aQ_4) пески, согласно СНиП II-15-74, относятся к рыхлым, а морские (mQ_4) и флювиогляциальные (fgQ_3) — к средней плотности, хотя и обладают одинаковой пористостью.

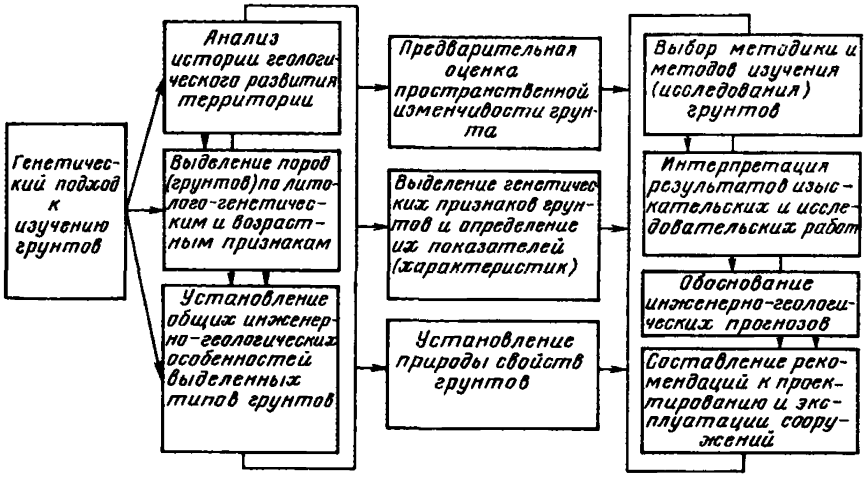


Рис.5. Логическая схема генетического подхода к инженерно-геологическому изучению грунтов

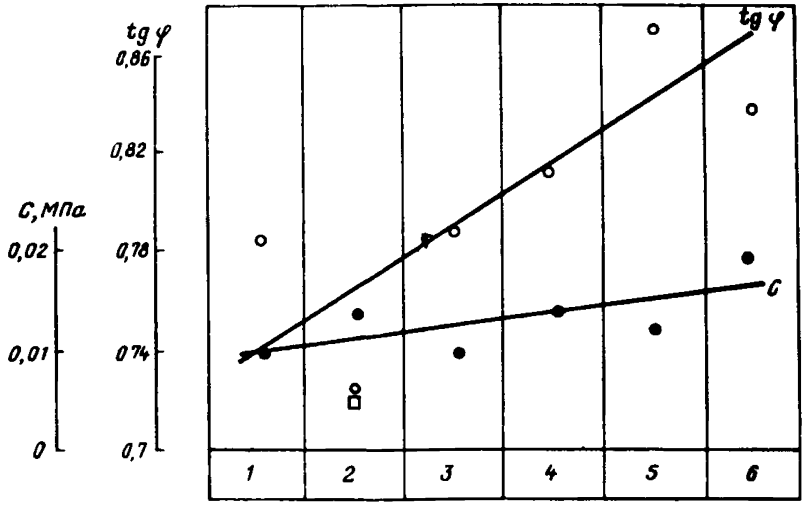


Рис.6. Закономерность изменения показателей механических свойств (средние значения) тонкозернистых, плотных (по J_d) песков территории Вильнюса в зависимости от их генезиса и возраста (по материалам К.Дундулиса и Р.Микшаса [9])

$1 - aQ_4$; $2 - aQ_3^{bl}$; $3 - fg, g^t Q_3^{bl}$; $4 - fg$, lg Q_{2-3}; $5 - fg$, lg Q_2^{2m-kr}; $6 - fg$, lg Q_{1-2}

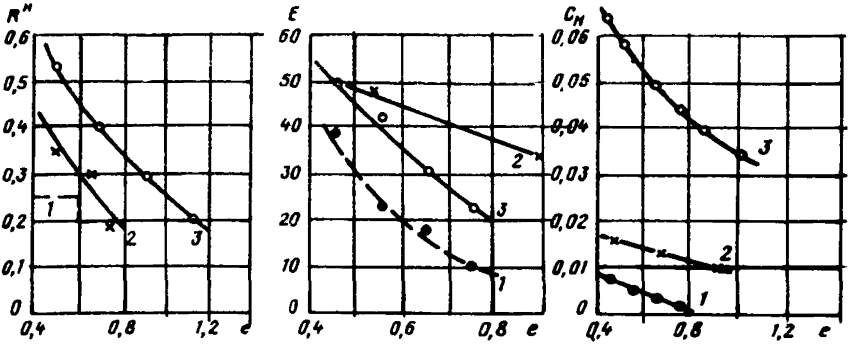


Рис.7. Зависимость нормативного давления $R^н$, модуля деформации E и нормативного удельного сцепления $C^н$ от коэффициента пористости e для пылеватых маловлажных и влажных песков (средние значения)

1 – по СНиП II-15-74 (независимо от генезиса песков); *2* – для ледниковых песков Литвы (по И.Вайчайтису и др.); *3* – для элювиальных песков Урала (по Ю.В.Сырокомскому)

б) Влияние генезиса песков на их механические свойства характеризуется следующими данными:

модуль деформации мелких песков средней плотности на грани с рыхлыми при e = 0,7 равен для эоловых песков 13 МПа, для флювиогляциальных – 44 МПа [34];

модуль деформации и параметры прочности пылеватых песков плотных (по величине коэффициента относительной плотности) в пределах территории Вильнюса закономерно возрастают по генетико-стратиграфическому ряду, приведенному на рис.6.

в) Влияние генезиса на анизотропию деформационных свойств песков и расхождения в величинах модуля деформации, определенных штамповыми и прессиометрическими испытаниями характеризуется следующими данными [29]:

пески	aQ_3	fgQ_3	mQ_4	eaQ_4
$K_{E_{средн}} = \frac{E_{шт}}{E_{прес}}$	2,7	5,9	6,4	8,6

2.10. При определении нормативных значений показателей механических свойств песков по табл.1 прил.2 СНиП II-15-74 следует учитывать, что эта таблица не отражает специфики песков различного генезиса. Отклонения фактических опытных данных могут быть весьма существенными (рис.7).

2.11. Для объективной оценки строительных свойств песков необходимо комплексно изучать их минеральный, химический, биологический, водный и газовый состав. (Распространенное понятие о "гранулометрическом составе" песков следует рассматривать как характеристику их структурных особенностей, см. п. 2.20.)

2.12. Минеральный состав характеризует содержание в песках основных породообразующих и акцессорных минералов и органических веществ, а также иногда обломков различных горных пород (поэтому в общем случае правомерно говорить о минерально-петрографическом составе песков).

Минеральный состав оказывает определенное влияние на гранулометрию и морфологию зерен песков, так как различные минералы обладают разной устойчивостью к выветриванию и, следовательно, в разной степени подвержены диспергированию к морфологической обработке. В этом плане минеральный состав влияет на все те свойства песков, которые непосредственно зависят от их гранулометрии и морфологии.

Минеральный состав песков определяет характер и интенсивность физико-химических процессов, развивающихся на поверхности зерен, в частности образование оболочек зерен и формирование структурных связей. Присутствие даже небольших количеств глинистых минералов и органических веществ оказывает заметное влияние на их влагоемкость и некоторые физико-механические свойства.

Минеральный состав песков непосредственно определяет величину плотности частиц песка. На практике часто приходится сталкиваться с песками, плотность частиц которых значительно отличается от средней величины 2,65–2,66 г/см^3, что заставляет вносить коррективы в расчет ряда характеристик песков.

2.13. Химический состав характеризует прежде всего суммарное содержание легко- и среднерастворимых солей. Естественно, химический состав отражает состав минеральный (содержание различных химических элементов). В понятие химического состава следует включать и состав оболочек песчаных зерен, и органические вещества. Влияние указанных факторов на физико-механические и физико-химические свойства песков очевидно. Несколько подробнее роль пленок гипергенных веществ в формировании структурных связей в песках будет рассмотрена ниже.

2.14. Биологический состав характеризует прежде всего содержание органических веществ. Влияние органики на многие строительные свойства общеизвестно. Следует лишь обратить внимание на результаты, полученные прибалтийскими специалистами и свидетельствующие о том, что особое значение имеет характер органики – присутствие ее в явном виде или в коллоидном состоянии; роль последнего особенно велика [9].

Немаловажное значение, как показали исследования, выполненные В.В.Радиной, П.Э.Роот и другими авторами, имеет содержание в песках микроорганизмов, оказывающих непосредственное влияние на проявление их плывунных свойств и тиксотропные изменения [19, 21].

2.15. Водный состав характеризует количественное и качественное содержание влаги как одного из компонентов многофазной системы, какой являются все грунты.

Для оценки физико-механических свойств песков крайне важно учитывать характерные значения влажности (гигроскопическую, максимальную молекулярную влагоемкость, полную влагоемкость, а также оптимальную влажность), показатели которых ($W_г$, $W_{мм.в}$, $W_{опт}$, $W_{п.в}$) корреспондируют с параметрами физико-механических свойств песков, позволяют выявить особенности поведения песков при различных воздействиях.

2.16. Газовый состав. Практическое значение при оценке некоторых строительных свойств песков, прежде всего их динамической устойчивости, имеет содержание в водонасыщенных песках защемленного воздуха. Как было установлено Я.Л.Коганом, содержание защемленного воздуха может превышать в песках 8%. Присутствие нескольких процентов защемленного воздуха (1–3%) в 3–4 раза уменьшает скорость распределения в песках ударных волн, причем пузырьки воздуха значительно снижают интенсивность динамических воздействий, нередко исключают возможность разжижения песков [12]. Известна также определенная роль газовой составляющей в проявлении плывунных свойств песков.

Из изложенного выше очевидно, что для объективного прогнозирования, оценки и объяснения природы строительных свойств песков необходимы комплексное изучение и характеристика их

Таблица 1

Состав	Категории	Показатель		Примечание
		наименование	количественное значение	
Минеральный	Мономинеральные (монопетрокластические или мономиктовые)	Содержание основных породообразующих минералов или обломков пород, %	Одно наименование >90	Наименование песка устанавливается по названию основного (основных) породообразующих минералов
	Биминеральные (олигомиктовые)		Два наименования >90	
	Полиминеральные (полипетрокластические или полимиктовые)		Более двух наименований >90	

Продолжение табл. 1

Состав	Категории	Показатель		Примечание
		наименование	количественное значение	
Химический (для песков различного минерального состава)	Незасоленные Слабозасоленные Среднезасоленные Высокозасоленные	Суммарное содержание легко- и среднерастворимых солей P_3, % к весу воздушно-сухого	$P_3 < 0{,}5$ $0{,}5 \leqslant P_3 < 1$ $1 \leqslant P_3 \leqslant 5$ $P_3 > 5$	Дополнительно характеризуется содержанием химических элементов (в первую очередь SiO_2), а также типом оболочек зерен (глинистая, карбонатная, железистая, кремнистая и др.)
Биологический	Чистые Малоорганосодержащие Среднеорганосодержащие Органосодержащие Заторфованные	Относительное содержание растительных остатков q. Содержание органических веществ P_O, %	$q = 0$; $P = 0$ $0 < q < 0{,}02$; $0 < P < 2$ $0{,}02 \leqslant q < 0{,}05$; $2 \leqslant P < 5$ $0{,}05 \leqslant q \leqslant 0{,}1$; $5 \leqslant P \leqslant 10$ $q > 0{,}1$; $P > 10$	Дополнительно характеризуется наличием органики в явном виде или в коллоидном состоянии, а также содержанием микроорганизмов
Водный	Водонесодержащие Незначительно водосодержащие Маловодосодержащие Средневодосодержащие Высоководосодержащие	Количественное содержание различных видов влаги W, %: гигроскопической $W_г$; связанной $W_{м.м.в}$; оптимальной $W_{опт}$; полной влагоемкости $W_{п.в}$	$W < W_г$ $W_г < W < W_{м.м.в}$ $W_{м.м.в} < W < W_{опт}$ $W_{опт} < W < W_{п.в}$ $W \approx W_{п.в}$	Дополнительно характеризуется химическим составом и минерализацией воды

Продолжение табл. 1

Состав	Категории	Показатель		Примечание
		наименование	количественное значение	
Газовый (для водонасыщенных песков)	Газонесодержащие	Содержание защемленного воздуха $P_г$, %	$P_г < 0{,}05$	Дополнительно характеризуется составом газа
	Малогазосодержащие		$0{,}05 \leqslant P_г < 3$	
	Среднегазосодержащие		$3 \leqslant P_г \leqslant 8$	
	Высокогазосодержащие		$P_г > 8$	

вещественного состава. Практическая реализация такого подхода в строительной практике требует введения в нормативно-методические документы, в частности в СНиП, более полной, чем в настоящее время классификации песчаных грунтов по составу. Предлагаемое подразделение песков по основным категориям их состава с указанием контролируемых показателей и количественных значений соответствующих критериев приведено в табл. 1.

СТРОЕНИЕ ПЕСКОВ И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА ИХ СВОЙСТВА

2.18. Под строением грунтов следует понимать их сложение из минеральных частиц различной крупности, характеризуемое определенной структурой и текстурой.

2.19. В общем случае под структурой понимается совокупность признаков строения горных пород, включая размер слагающих элементов (отдельных частиц, агрегатов, цемента), их количественное соотношение, морфологию (форму и характер поверхности), а также характер взаимосвязи их между собой.

Говоря о структурных особенностях песков, целесообразно выделять следующие признаки: дисперсность, сортированность, гранулометрическую неоднородность, морфологию и структурные связи.

2.20. Дисперсность характеризует крупность песков или, как принято говорить, их гранулометрический состав. Это один из важнейших признаков, весьма ощутимо влияющий на все их строительные свойства. Хотя роль гранулометрического состава хорошо известна, следует учитывать два обстоятельства.

а) В пределах каждого вида песка по крупности (по СНиП II-15-74) наблюдается достаточно широкий диапазон изменения содержания размерных фракций. Анализ многочисленных факти-

ческих материалов по пескам различного генезиса, возраста и крупности для разных регионов Союза ССР показывает следующее: расхождения в содержании преобладающих фракций в песках средней крупности достигают 40–70%, а в мелких – 25–30%; расхождения в содержании остальных песчаных фракций составляют до 10–25%, уменьшаясь при переходе от крупных песков к пылеватым. Естественно, это не может не сказываться на варьировании свойств песков в пределах одного гранулометрического вида.

б) В принятой в СНиП II-15-74 классификации песков по крупности отсутствуют глинистые пески, не обладающие свойством пластичности ($J_p < 0{,}01$), но содержащие в своем составе глинистую фракцию иногда до 10%. Такие пески нередко встречаются среди коренных морских и вулканогенных отложений, а также техногенных образований, например, в хвостохранилищах. Хотя тонкодисперсная фракция в таких песках часто представлена неглинистыми минералами, активная роль ее в проявлении ряда свойств песков очень заметна. Значение данного факта существенно, в частности, в связи с тем, что в строительной практике при гранулометрическом анализе часто не определяется раздельное содержание частиц размером менее 0,1–0,05 мм и тем более менее 0,01–0,005 мм. Поэтому наличие и роль глинистой составляющей остаются недооцененными, а их отрицательное проявление оказывается иногда печальным сюрпризом.

2.21. Сортированность характеризует соотношение преобладающих песчаных фракций. В каждой разновидности песка, как правило, имеется две, реже три преобладающие (в процентном отношении) размерные фракции.

Данную структурную особенность песков целесообразно оценивать двумя показателями (критериями): суммарным содержанием преобладающих фракций и коэффициентом сбега, предложенным В.В.Охотиным.

а) По первому критерию пески целесообразно подразделять, согласно предложению Е.М.Сергеева, на монодисперсные, бидисперсные и полидисперсные. Однако при этом следует иметь в виду, что изменение содержания и, следовательно, соотношения преобладающих фракций заметно влияет на многие показатели состояния и свойств песков (рис.8 и 9).

б) Второй критерий представляет собой отношение содержания двух смежных фракций:

$$K_c = \frac{q_2}{q_1},$$

где q_1 и q_2 – веса фракций с размерами частиц d_1 и d_2 соответственно, причем $\frac{d_2}{d_1} = 2$. Как было установлено В.В.Охотиным, наименьшая пористость может быть получена при значении $K_c \approx 0{,}8$, однако для практических целей данный показатель почти не применялся и пески по нему ранее не классифицировались.

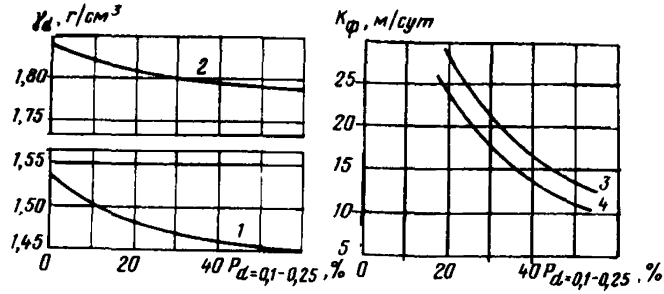


Рис.8. Зависимость предельных плотностей скелета γ_d и коэффициента фильтрации $K_ф$ от содержания фракций 0,1–0,25 мм для песков средней крупности, намытых в плотины дамбы Рижской ГЭС

1 – γ_d; *2* – γ_d; *3* – при $J_d = 0,33$; *4* – при $J_d = 0,5$

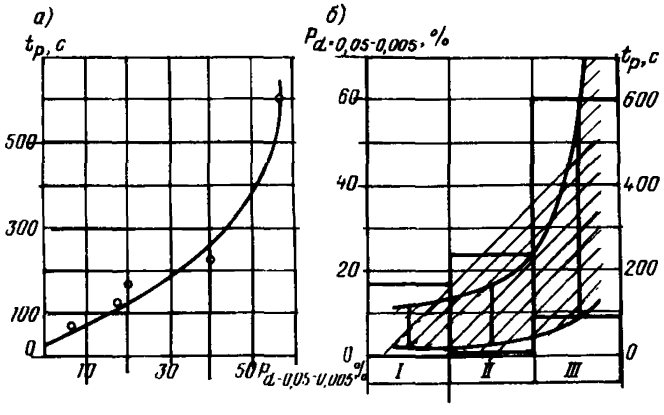


Рис.9. Влияние содержания пылеватой фракции на время нахождения песка в разжиженном состоянии

а – по данным П.Л.Иванова; *б* – интерпретация данных О.А.Сильченко о содержании пылеватой фракции в четвертичных песках Мангышлака средней крупности *(I)*, мелких *(II)* и пылеватых *(III)*

Проведенные исследования в песках разной крупности, разного генезиса и из разных регионов Союза ССР выявили ряд примечательных закономерностей. Практически для всех изученных песков установлен общий типичный характер изменения величины K_C в пределах песчаных фракций, причем наиболее чувствительным к изменению грансостава является $K_{c1} = \frac{P_{0,25-0,1}}{P_{0,1-0,05}}$ (рис.10). Этот показатель, а также $K_{c2} = \frac{P_{0,5-0,25}}{P_{0,25-0,1}}$ и $K_{c3} = \frac{P_{1-0,5}}{P_{0,5-0,25}}$ коррелируют с величиной коэффициента уплотняемости песков $F = \frac{e_{макс} - e_{мин}}{e_{мин}}$ (см. рис.10).

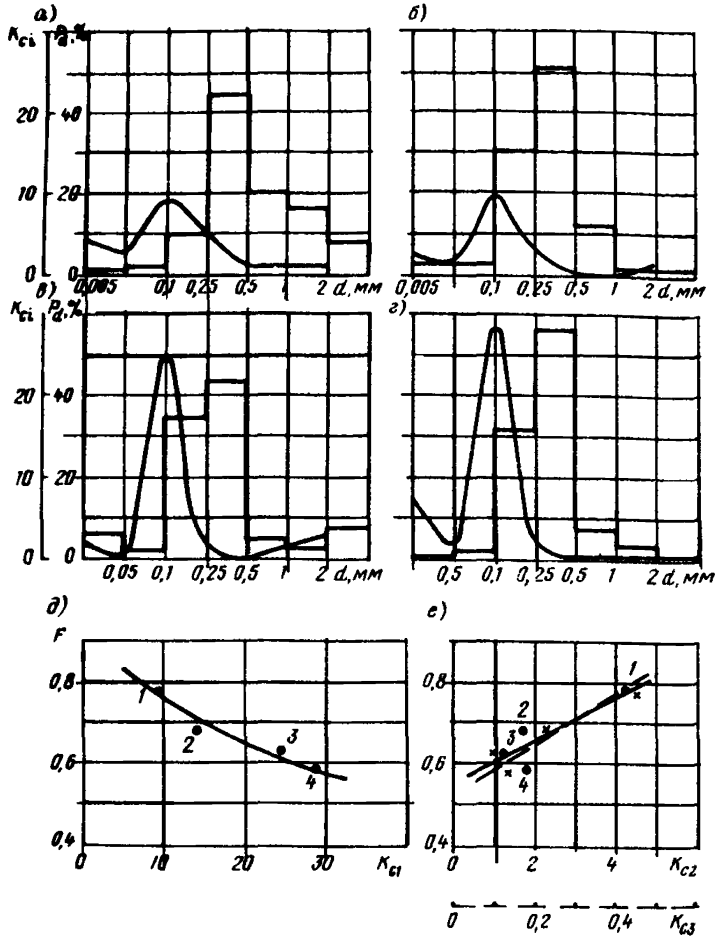


Рис.10. Гистрограммы гранулометрического состава и графики изменения коэффициента сбега по смежным фракциям $K_{c\ell}$ для намывных песков средней крупности по объектам *а* – Курская АЭС (1); *б* – Рижская ГЭС (2); *в* – Приморская ГРЭС (3); *г* – Нововоронежская АЭС (4); графики зависимости коэффициента уплотняемости песков F от характерных показателей коэффициента сбега: *д* – K_{c1}; *е* – K_{c2}; K_{c3}

Последние данные свидетельствуют о том, что коэффициент сбега является одним из показателей, заметно влияющих на физико-механические свойства песков. Подтверждением этому служат данные тарирования забивного зонда, полученные в намывных песках плотин и дамб Рижской ГЭС (рис.11).

Рассмотренные материалы показывают, что природные и техногенные пески не являются оптимальными смесями и обладают различной степенью сортированности. В первом приближении по

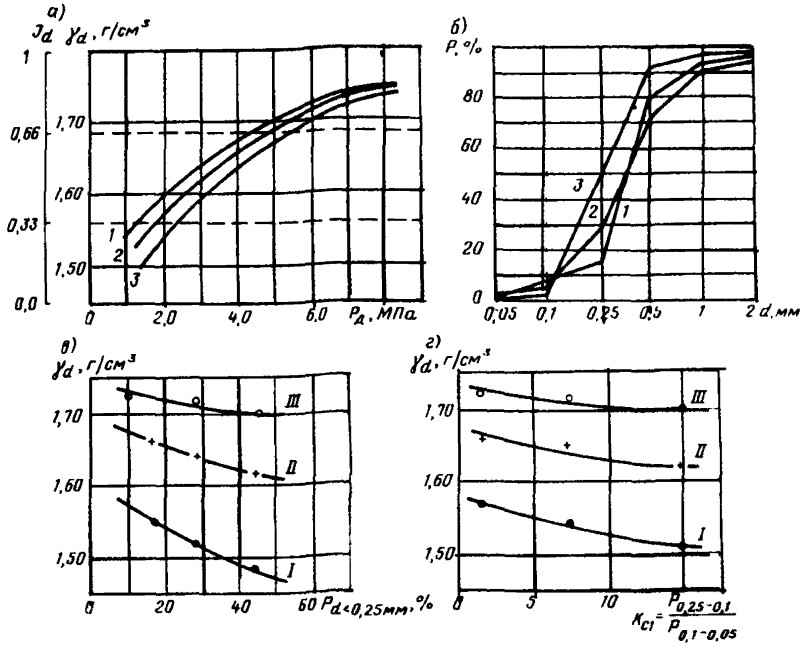


Рис.11. Результаты тарирования УБП-15 в намывных песках средней крупности (Рижская ГЭС) и анализ опытных данных

а – тарировочный график $\gamma_d = f(P_д)$; *б* – графики гранулометрического состава песков для объектов тарирования УБП-15 *1, 2, 3*; *в* – зависимости $\gamma_d = f(P_{d<0,25})$; *г* – $\gamma_d = f(K_{c1})$ для трех значений $P_д$, МПа: *I* – 1; *II* – 3,5; *III* – 6

показателю K_c можно выделить следующие категории песков по сортированности:

оптимально сортированные $K_{c1} > 25$;

среднесортированные $25 \geqslant K_{c1} > 15$;

малосортированные $15 \geqslant K_{c1} \geqslant 5$;

несортированные $K_{c1} < 5$.

2.22. Под гранулометрической неоднородностью песков понимается диапазон размеров слагающих их частиц, контролируемый различными параметрами неоднородности. Чем больше этот диапазон и абсолютная величина соответствующего параметра, тем больше гранулометрическая неоднородность песка.

Известны следующие показатели, предложенные для характеристики гранулометрической неоднородности песков:

коэффициент (или степень) неоднородности $U = \frac{d_{60}}{d_{10}}$ (Хазен);

коэффициент сортировки $S_p = \frac{d_{90}}{d_{10}}$ (П.И.Фадеев);

коэффициент сортировки $S_0 = \frac{d_{75}}{d_{25}}$ (Траск);

параметр неоднородности $\Pi = d_{50}\frac{d_{90}}{d_{10}}$ (В.Д.Мелентьев);

параметр максимальной неоднородности $\Pi_м = d_{50}\frac{d_{95}}{d_5}$ (И.В.Дудлер).

Анализ многочисленных изыскательских и экспериментальных материалов показал, что из всех указанных показателей наименьшей чувствительностью к варьированию гранулометрической неоднородности песков обладает показатель U, который рекомендован СНиП II-15-74 (рис.12). Наибольшей чувствительностью обладают показатели $П_м$ и $S_р$, однако $П_м$ представляется более предпочтительным, поскольку он как бы координирует характеристику гранулометрической неоднородности песка с медианным диаметром слагающих его частиц.

Выявленный диапазон изменения показателей гранулометрической неоднородности настолько велик, что не может не влиять на многие свойства песков, в частности на предельные плотности и уплотняемость песков при различной влажности, сопротивляемость зондированию, угол внутреннего трения, суффозионную устойчивость и др.

Действующий СНиП II-15-74 не классифицирует пески по степени неоднородности; в предшествовавшем СНиП II-Б.1-62 по показателю U выделяли две категории песков: однородные при $U \leqslant 3$ и неоднородные при $U > 3$. В практике гидромеханизации критерием для выделения тех же категорий служат величины $U \leqslant 2.5$ и $U > 2,5$ соответственно [СНиП II-53-73].

Известна трехчленная классификация песков по показателю $S_р$, предложенная П.И.Фадеевым. Анализ многочисленных литературных данных и предварительные экспериментальные исследования показывают целесообразность выделения пяти категорий гранулометрической неоднородности песков, которые могут быть в первом приближении охарактеризованы каждым из указанных выше показателей (табл.2).

Таблица 2

Категории	Абсолютные значения показателей			
	$U=\frac{d_{60}}{d_{10}}$	$n=d_{50}\frac{d_{90}}{d_{10}}$	$S_р=\frac{d_{90}}{d_{10}}$	$П_м=d_{80}\frac{d_{95}}{d_5}$
Однородные	< 2	<1,5	<3	<4
Квазиоднородные	2–3	1,5–4	3–5	5–8
Неоднородные	3–5	4–10	5–20	8–40
Повышенной неоднородности	5–10	10–20	20–50	40–100
Исключительно неоднородные	>10	>20	>50	>100

Использование показателей $П_м$ и $S_р$ для установления зависимостей физико-механических свойств песков от степени (категории) их гранулометрической неоднородности является наибо-

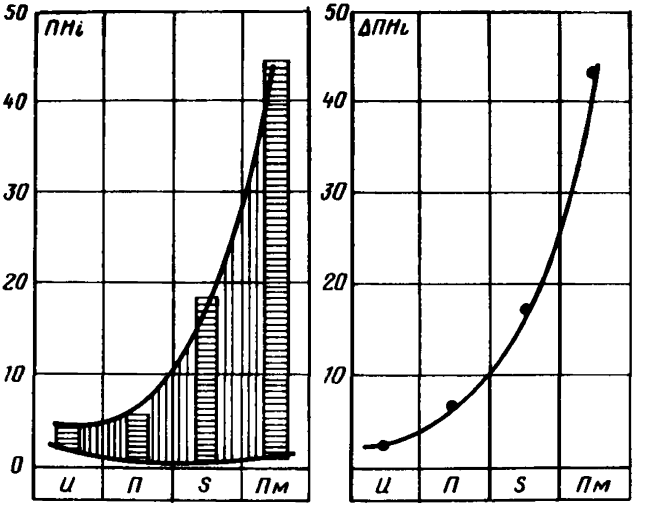


Рис.12. Диапазоны изменения различных параметров гранулометрической неоднородности песков средней крупности различного генезиса, возраста и регионов СССР и отвечающие им интервалы изменений тех же параметров

лее обоснованным и перспективным по сравнению с рекомендованным СНиП II-15-74 показателем U .

2.23. Морфология зерен песков характеризует степень обработанности песчаных зерен, выражающуюся в их различной форме и в разном характере поверхности. Морфология зерен отражает генетические особенности песков на микроуровне и поэтому изучается, как правило, специальными микроскопическими методами.

Рекомендуемые методика и методы изучения морфологии песчаных зерен и песков в целом, а также морфологические показатели (параметры) песков указаны в разд.5 данных рекомендаций (пп. 5.13–5.23).

Морфологические особенности зерен песков и их влияние на эффект зацепления, образование цементационных связей и удерживание влаги схематически показаны на рис.13. Зависимости некоторых показателей строения, состояния и свойств песков от обобщенного показателя морфологии показаны на рис.14.

2.24. Структурные связи, как подчеркивает академик Е.М.Сергеев [21, 22], являются важнейшей структурной особенностью всех горных пород (грунтов), в том числе и песков. Они отражают характер и степень взаимодействия между отдельными структурными элементами, применительно к пескам – между отдельными частицами (зернами) и иногда между их агрегатами.

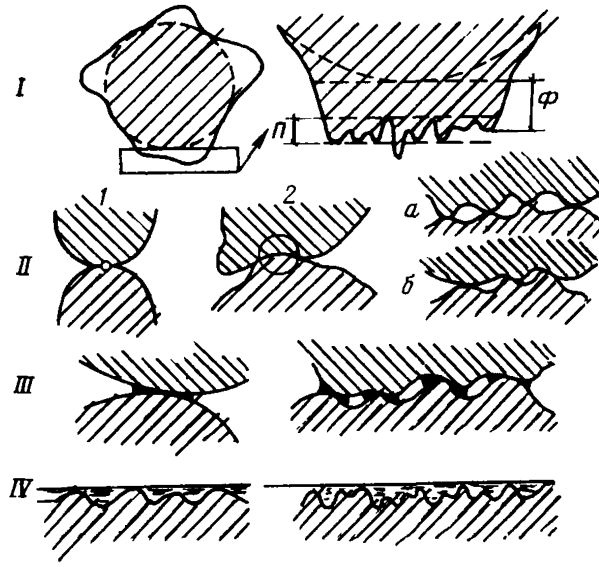


Рис.13. Элементы морфологии зерен песков и их влияние на зацепление между зернами, образование цементационных связей и содержание физически связанной влаги

I – дефекты формы (Ф) и поверхности (П) зерна; *II* – контакт зерен песков: *1* – идеально-обработанных; *2* – необработанных с минимальной *(а)* и максимальной *(б)* притертостью шероховатой поверхности; *III* – образование цементационных связей (затушеваны) при контакте обработанных и необработанных зерен; *IУ* – различные соотношения количества неровностей поверхности зерна и удерживаемой влаги

С практической точки зрения в песках целесообразно выделять четыре категории структурных связей разной физико-химической природы, обусловливающих существенно различную степень прочности, различную изменчивость ее под влиянием разных внешних воздействий. Это капиллярная, морфологическая, цементационная неводостойкая и цементационная водостойкая связность.

Капиллярные структурные связи $C_{кап}$ малы по своему энергетическому уровню (обычно $C_{кап} < 0{,}003$ МПа), однако их влияние на механические свойства пород может быть заметным (Д.Д.Баркан, Керизель и др.).

Морфологические структурные связи, обусловленные эффектом зацепления зерен песков $C_{морф}$ или $C_{зац}$, нередко обладают заметно большим энергетическим уровнем. Величина $C_{кап}$ может достигать 0,005–0,01 МПа. Их роль может быть весьма существенной в проявлении прочностных и деформационных свойств пес-

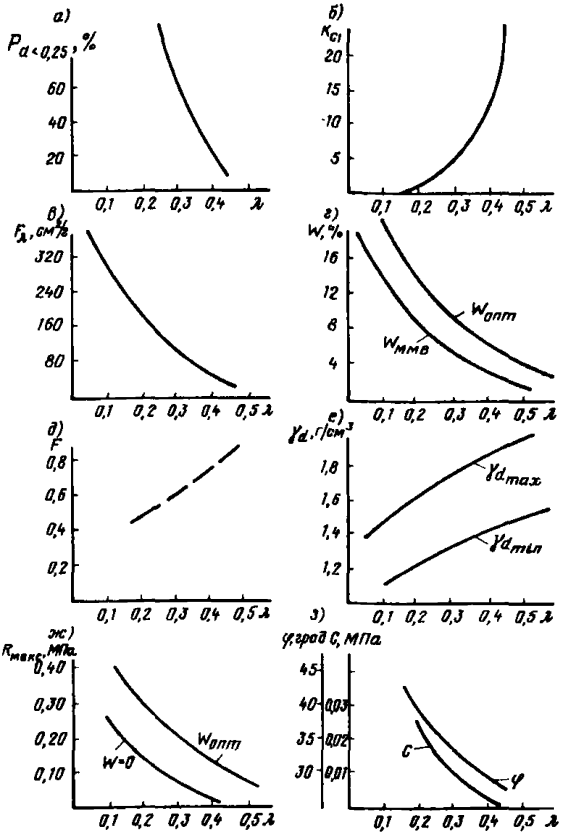


Рис.14. Характер зависимостей между показателем морфологии зерен и показателями состава, строения и свойств песков

а – содержанием фракций менее 0,25 мм; *б* – коэффициентом сбега K_{cl}; *в* – удельной поверхностью песка F_λ; *г* – максимальной молекулярной влагоемкостью $W_{м.м.в}$ и оптимальной влажностью $W_{опт}$; *д* – коэффициентом уплотняемости F; *е* – предельными плотностями скелета γd_{max} и γd_{min}; *ж* – максимальным удельным сопротивлением пенетрации R_{max}; *з* – параметрами сопротивления песка сдвигу φ и C (по данным А.Д.Потапова)

ков, их динамической устойчивости (Н.Н.Маслов, П.Л.Иванов, Хансен и Ландборн и др.).

Цементационные связи обладают наибольшим энергетическим уровнем. Они являются следствием длительного упрочнения песков на разных стадиях литогенеза и эпигенеза, могут явиться следствием техногенных воздействий. Поэтому эффект проявления их назван Н.Я.Денисовым как действие "сцепления упрочнения" $C_{упр}$. Величина $C_{упр}$ или $C_{цем}$ изменяется в широких пределах, часто от 0,005 до 0,02–0,05 МПа, достигая значений 0,1–0,15 МПа в элювиальных и искусственно закрепленных песках. Нарушение цементационных связей приводит к наиболее ощутимому снижению прочности песков – иногда в 2–3 раза.

Следует различать неводостойкие и водостойкие цементационные связи в зависимости от вида цементирующих веществ и их изменчивости при обводнении.

Цементационные связи в песчаных грунтах, обусловленные пленками гипергенных веществ, оказывают существенное влияние на механические свойства песков. В частности, необходимо учитывать следующие данные [9]:

присутствие пленок на зернах кварца в песчаных породах увеличивает их удельную поверхность в 2–2,5 раза, что повышает прочность связей в песках;

железистые пленки обусловливают более хрупкий характер цементационных связей, а преобладание глинистых пленок придает пластический характер цементационным связям;

нарушение сложения тонкозернистых песков с железистыми пленками снижает параметры прочности песков (при $J_d = 0{,}6$) в таких соотношениях: C – от 0,013 до 0,008 МПа; $\operatorname{tg}\varphi$ – от 0,7 до 0,613; для мелких песков соответственно от 0,027 до 0,02 МПа и $\operatorname{tg}\varphi$ от 0,635 до 0,570. Еще более заметные изменения происходят при удалении пленок (C снижается до 0,001 и 0,004 МПа, а $\operatorname{tg}\varphi$ повышается до 0,748 и 0,710 соответственно). Аналогичные изменения наблюдаются в песках с глинистым типом пленок; для песков территории Вильнюса, обладающих развитыми цементационными связями, при испытании их штампами до некоторого предела нагрузки P_0 наблюдаются ничтожно малые вертикальные деформации (обычно менее 0,1 мм). Величина P_0 изменяется в пределах от 0,05 до 0,25 МПа, при этом наблюдается четкое возрастание P_0 по мере перехода от более молодых и более древним песчаным породам. Величина P_0 возрастает с увеличением плотности песков, так как чем плотнее песок, тем больше потенциальная возможность формирования структурных цементационных связей; с увеличением влажности роль неводостойких цементационных связей снижается, что вызывает уменьшение сопротивляемости песков сжатию.

Таким образом, структурные связи в песках обусловливают, с одной стороны, повышенные показатели механических свойств, с другой, – их изменчивость при нарушении природного сложения песков.

Количественную оценку структурной связности песков целесообразно давать с помощью следующего комплекса показателей: параметра структурной прочности (сцепления) C, определяемого в большинстве случаев по данным испытания песков на сдвиг; коэффициента изменчивости сцепления после обводнения K_w^c, определяемого как отношение величин параметра структурной прочности до и после водонасыщения песка; показателя упрочненности $П_у$, определяемого как отношение характеристик механических свойств песков до и после нарушения структурных связей; показателя структурности $П_с$, определяемого по отношению сопротивления песка статическому и динамическому зондированию; величины упругой части деформации песка $S_{упр}$ при испытании его статическими нагрузками на штамп.

2.25. Текстура песков характеризует совокупность признаков строения горных пород, обусловленных пространственным расположением и ориентировкой слагающих их структурных элементов. Текстура песка – это в основном характеристика массива, поэтому ее оценка должна базироваться на полевых методах исследований.

С практической точки зрения по характеру текстуры целесообразно выделять три категории: однородную, слоистую и микрослоистую. Каждая из них может обладать различной пористостью,

Таблица 3

Строение	Категории	Показатель		Примечание
		наименование	количественное значение	
		I. Структура		
Дисперсность (крупность или гранулометрический состав)	Гравелистые Крупные Средней крупности Мелкие Пылеватые Глинистые	Масса частиц P размером d, мм, % к общей массе образца песка в воздушно-сухом состоянии	$d > 2 - P > 25$ $d > 0,5 - P > 50$ $d > 0,25 - P > 50$ $d > 0,1 - P \geqslant 75$ $d > 0,1 - P < 75$ $d < 0,005 - P > 3$	Наименование песка устанавливается по первому удовлетворяющему признаку (сверху вниз). Категория глинистых песков не обладает пластичностью ($J_p < 0,01$)
Сортированность (соотношение преобладающих фракций разной крупности)	Монодисперсные Бидисперсные Полидисперсные	Содержание преобладающих фракций данной крупности, %	Одна фракция >70 Две смежные фракции >70 Две смежные фракции >70	Дополнительно целесообразно определение величины коэффициента сбега K_c

Продолжение табл.3

Строение	Категории	Показатель		Примечание
		наименование	количественное значение	
Гранулометрическая неоднородность	Однородные	Параметр максимальной неоднородности $П_м$	$П_м < 4$	Дополнительно целесообразна оценка показателей степени неоднородности U, коэффициента сортировки S_p, параметра неоднородности $П$, а также статистических параметров гранулометрии – моды, медианы и др.
	Квазиоднородные		$4 \leqslant П_м < 8$	
	Неоднородные		$8 \leqslant П_м < 40$	
	Повышенной неоднородности		$40 \leqslant П_м \leqslant 100$	
	Исключительно неоднородные		$П_м > 100$	
Морфология	Весьма обработанные		$1 \geqslant \lambda > 0,6$	Дополнительно целесообразна оценка морфометрических и морфоскопических параметров морфологии зерен песков (в исследовательских целях)
	Обработанные		$0,6 \geqslant \lambda > 0,4$	
	Слабообработанные		$0,4 \geqslant \lambda > 0,3$	
	Необработанные		$0,3 \geqslant \lambda > 0,25$	
	Весьма необработанные		$0,25 \geqslant \lambda > 0$	
Структурные связи	Капиллярные	Параметр структурной прочности С, МПа Коэффициент изменчивости сцепления при водонасыщении K_w^c	$0 \leqslant C < 0,005$ $K_w^c = 1$	Дополнительно целесообразно оценивать показатели упрочненности $П_у$ и структурности $П_с$ (см. табл.4), а также величину упругой осадки штампа $S_{упр}$
	Морфологические		$0 \leqslant C < 0,02$ $K_w^c \leqslant 1$	
	Цементационные неводостойкие		$0,005 \leqslant C < 0,05$ $K_w^c > 1,5$	
	Цементационные водостойкие		$0,05 \leqslant C \leqslant 0,15$ $K_w^c \leqslant 1,5$	
II. Текстура				
Характер текстуры при разной плотности сложения	Однородные	Характер текстуры оценивается визуально и по параметрам слоистости $K_H = \frac{h}{H}$; $K_L = \frac{l}{L}$;	$K_H = 1$; $K_L = 1$	Для исследовательских целей оценивается ориентировка песчаных частиц
	Слоистые		$K_H \leqslant 0,05$; $K_L \leqslant 0,3$	
	Микрослоистые		$K_H > 0,05$; $K_L > 0,3$	

являющейся одним из важнейших количественных показателей текстуры. Однако даже при равных значениях пористости пески с различным характером текстуры обладают разными физико-механическими и водными свойствами. Надо учитывать, что характер слоистости сказывается на анизотропии свойств песков, результатах определения их плотности при отборе образцов режущими цилиндрами, при испытаниях песков зондированием. При некоторых морфологических особенностях песков (пески с необработанными удлиненными зернами) определенное значение может иметь ориентация частиц, влияющая на сопротивляемость песков сдвигу, особенно в срезных приборах.

Рекомендуемая классификация рассмотренных выше основных категорий строения песков (их структуры и текстуры) приведена в табл.3.

СОСТОЯНИЕ ПЕСКОВ И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА ИХ СВОЙСТВА

2.26. Наряду с категориями состава и строения песков, характеризующих как бы "узловые точки" многокомпонентной системы "грунт", необходимо учитывать еще одну группу категорий, определяющих физическое состояние песков в конкретных природных условиях на фиксированный момент времени.

Физическое состояние песков непосредственно обусловлено особенностями их состава и строения и должно рассматриваться как комплексный генетически унаследованный признак.

2.27. Значение представлений о состоянии песков состоит в том, что при переходе из одной категории состояния в другую происходит существенное, часто резкое, изменение свойств песков как многокомпонентной динамичной системы. При этом важно иметь в виду, что изменение состояния песка может произойти только при изменении соответствующих параметров состава, структуры или текстуры как коренных признаков системы.

2.28. Для практических целей целесообразно выделять категории относительной плотности, строительной уплотненности, относительной упрочненности, относительной водонасыщенности, а также напряженного состояния песчаных грунтов.

2.29. Относительная плотность характеризует состояние песков по плотности по отношению к максимально возможному диапазону ее изменения для данной разновидности песка.

Обычно выделяют три категории относительной плотности песков: рыхлые, средней плотности и плотные.

Работами многих специалистов показана необоснованность принятого СНиП II-15-74 подхода к установлению категории относительной плотности песков по величине коэффициента пористости с учетом только наименования песка по крупности. Такой подход не позволяет объективно оценить рассмотренные выше структур-

ные особенности песков, нередко приводит к ошибочным оценкам и даже казусным ситуациям (известны, например, случаи, когда техническими условиями на возведение намывных сооружений из песков задавались контрольные значения плотности скелета, близкие или даже превышающие предельно плотное сложение данной разновидности песка). Принятый СНиП подход к оценке категории относительной плотности песков по указанной причине часто вызывает затруднения и в интерпретации результатов динамического зондирования.

К объективным критериям для выделения категории относительной плотности песков следует отнести широко известный показатель – коэффициент (индекс) относительной плотности $I_d = \frac{e_{макс} - e}{e_{макс} - e_{мин}}$, а также недавно предложенный и обоснованный И.В.Дудлером и А.Н.Юлиным коэффициент относительной уплотненности песков $F_d = \frac{e_{макс} - e}{e}$ [8]. Практическая значимость последнего показателя заключается в том, что в неупрочненных песках условное динамическое сопротивление забивных зондов ($P_д$ или N) инвариантно по отношению к F_d в песках одного вида крупности независимо от их структурных особенностей

При решении некоторых исследовательских задач целесообразно учитывать следующую более детальную, чем трехгрупповую, классификацию песков по относительной пористости: весьма низкая ($I_d < 0{,}2$; $F_d < 0{,}05$); низкая ($0{,}2 \leqslant I_d < 0{,}4$; $0{,}05 \leqslant F_d < 0{,}15$); средняя ($0{,}4 \leqslant I_d < 0{,}6$; $0{,}15 \leqslant F_d < 0{,}3$); высокая ($0{,}6 \leqslant I_d < 0{,}8$; $0{,}3 \leqslant F_d \leqslant 0{,}5$); очень высокая ($0{,}8 \leqslant I_d \leqslant 1{,}0$; $F_d > 0{,}5$).

Относительная плотность песков существенно влияет на подавляющее большинство свойств пород – физических, механических, динамических, фильтрационных и др.

2.30. Относительная уплотненность характеризует состояние плотности песков по отношению к испытанному ими давлению и склонность песков к определенному характеру объемных изменений, изменений прочности при сдвиге. Так, просадочными свойствами обладают только недоуплотненные пески, повышению плотности и прочности при сдвиге – недоуплотненные и нормально-уплотненные пески, а дилатантному разуплотнению и соответствующему снижению прочности – переуплотненные пески.

Оценка относительной уплотненности песков необходима при решении ряда практических задач, в частности для составления прогноза об изменении прочности песков при динамических воздействиях.

2.31. Относительная упрочненность характеризует степень развития в песках структурных связей.

Специфика структурных связей в песках затрудняет в общем случае изучение их лабораторными методами. Поэтому для характеристики упрочненности песков рекомендуется использовать

результаты испытания их полевыми методами, в частности динамическим и статическим зондированием.

В качестве показателей (критериев) упрочненности песков целесообразно использовать предложенные И.В.Дудлером коэффициент упрочненности $П_у$ и коэффициент структурности $П_с$ [7, 8]:

$$П_у = \frac{\rho_{д.е}}{\rho_{д.н}} \quad \text{или} \quad П_у = \frac{\rho_{дt}}{\rho_{д.о}},$$

где $\rho_д$ – показатель динамического зондирования в естественном и нарушенном сложении песков ($\rho_{д.е}$ и $\rho_{д.н}$);

$\rho_{д.о}$ – начальное сопротивление зондированию искусственно уложенных песков;

$\rho_{дt}$ – то же, через время t после их укладки.

$$П_с = \frac{\rho_q}{\rho_д},$$

здесь ρ_q , $\rho_д$ – показатели статического и динамического зондирования соответственно.

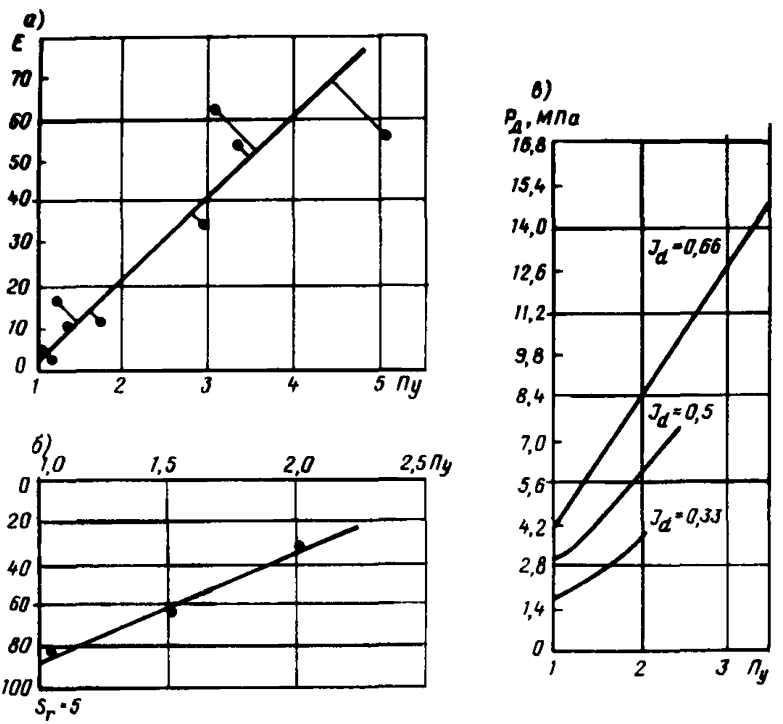


Рис.15. Зависимость от показателя упрочненности намытых песков $П_у$ модуля общей деформации E, средней осадки поверхности после стандартного камуфлетного взрыва $S_п$, сопротивления динамическому зондированию $P_Д$ по объектам

а – Заволжский моторный завод (по результатам обработки данных М.И.Хазанова); *б* – Волжская ГЭС им. XXII съезда КПСС; *в* – Рижская ГЭС

Относительная упрочненность песков весьма существенно влияет на их механические свойства. При прочих равных условиях (пески определенного состава, морфологии, плотности, влажности) чем выше значение показателя упрочненности, тем больше их несущая способность и динамическая устойчивость, величина модуля деформации, сопротивляемость динамическому зондированию и т.д. (рис.15).

Важной информативностью обладает показатель структурности $П_С$. В мировой практике показатель подобного типа используется для расчленения толщ песчано-глинистых грунтов, поскольку их характерные виды заметно отличаются по восприятию статических и динамических нагрузок. В песках этот эффект особенно заметен, но при интерпретации результатов зондирования нередко недооценивается, в том числе нормативными документами. Так, согласно табл.5 СНиП II-15-74, отношение величины ρ_q и ρ_A изменяется в очень небольших пределах – в основном от 1,1 до 1,5 (для мелких водонасыщенных песков от 1,4 до 2,0). Фактически наблюдаются значительно бóльшие изменения $П_С$ – от 1,4 до 7. Это отражает значительно больший диапазон фактически возможной упрочненности песков. Естественно, что чем больше развиты структурные связи, тем больше эффект проявления их при статических воздействиях по сравнению с динамическими. Этим и объясняется в ряде случаев кажущееся "занижение" плотности песков динамическим зондированием по сравнению со статическим при использовании рекомендаций табл.5 СНиП II-15-74.

2.32. Относительная водонасыщенность характеризует степень заполнения пор песка водой. Ее показателем принято считать индекс водонасыщенности (или степень водонасыщения) I_w, по величине которого выделяются маловлажные, влажные и водонасыщенные пески. При решении некоторых практических и исследовательских задач целесообразно выделять еще одну категорию относительной водонасыщенности песков – это пески очень маловлажные при $I_w < 0{,}1$, что обычно отвечает такому содержанию влаги, когда влажность песков меньше величины максимальной молекулярной влагоемкости. Так, например, основной процесс самоуплотнения намытых на сухое основание песков завершается к моменту завершения водоотдачи песков, т.е. при снижении влажности до $W \approx W_{м.м.в}$, что отвечает $I_w < 0{,}1$.

Следует учитывать, что относительная водонасыщенность влияет не только на многие физико-механические свойства песков, но и на методику изучения их полевыми и лабораторными методами.

2.33. Напряженное состояние характеризует напряжения, развитые в массиве или в образце песков (под влиянием природного давления, статических и динамических нагрузок от сооружения) и фиксируемые либо по величине контактных напряжений между отдельными структурными элементами, либо по величине порового давления воды в водонасыщенных песках.

Напряженное состояние песков существенно влияет на их физико-механические свойства.

С увеличением напряженного состояния повышается мобилизация структурных связей, особенно морфологического типа, возрастают силы трения между отдельными частицами. Это обусловливает возрастание сопротивляемости песков сдвигу, т.е. повышает их прочность, динамическую устойчивость песков, величину модуля упругости, сопротивление зондированию (особенно статическому); уменьшает подверженность песков объемным изменениям, их сжимаемость; положительно сказывается на раз-

Таблица 4

Состояние	Категории	Показатель	
		наименование	количественное значение
Относительная плотность	Низкая (рыхлые)	Индекс относительной плотности J_d. Коэффициент относительной уплотненности F_d	$J_d < 0{,}33$; $F_d < 0{,}1$
	Средняя (средней плотности)		$0{,}33 \leqslant J_d \leqslant 0{,}66$; $0{,}1 \leqslant F_d \leqslant 0{,}3$
	Высокая (плотные)		$0{,}66 < J_d \leqslant 1{,}0$; $F_d > 0{,}3$
Относительная уплотненность	Недоуплотненные	Коэффициент пористости e Пористость n Сопротивление сдвигу τ	$e_p^{ест} > e_p^{компр}$
	Нормально уплотненные		$e^{ест} = e_p^{компр}$; $n_{ест} \geqslant n_{крит}$; $\tau_{макс} \leqslant \tau_{длит}$
	Переуплотненные		$n_{ест} < n_{крит}$; $\tau_{макс} > \tau_{длит}$
Относительная упрочненность	Неупрочненные	Коэффициент упрочненности $П_y$. Коэффициент структурности n_c	$П_y = 1$; $П_c < 1{,}5$
	Слабоупрочненные		$1 < П_y < 1{,}5$; $1{,}5 \leqslant П_c < 2$
	Упрочненные		$1{,}5 \leqslant П_y \leqslant 2{,}5$; $2 \leqslant П_c < 5$
	Сильноупрочненные		$П_y > 2{,}5$; $П_c > 5$
Относительная водонасыщенность	Очень низкая (очень маловлажные)	Индекс водонасыщенности J_w	$J_w < 0{,}1$
	Низкая (маловлажные)		$0{,}1 \leqslant J_w < 0{,}5$
	Средняя (влажные)		$0{,}5 \leqslant J_w < 0{,}8$
	Высокая (водонасыщенные)		$0{,}8 \leqslant J_w \leqslant 1{,}0$

витии процессов упрочнения песков и на снижении интенсивности развития ряда неблагоприятных физико-геологических процессов и явлений.

Вопрос о выделении категорий напряженного состояния требует дополнительного изучения. В первом приближении надо ориентироваться на следующие категории, различающиеся по величине нормального напряжения σ, МПа: ненапряженное ($\sigma < 0{,}02$); малонапряженное ($\sigma = 0{,}02 \div 0{,}2$); средненапряженное ($\sigma = 0{,}2 \div 0{,}5$); высоконапряженное ($\sigma \approx 0{,}5 \div 1$), весьма высоконапряженное ($\sigma > 1$).

2.34. При изучении и оценке строительных свойств песков следует учитывать комплекс физических состояний песков. Предлагаемое выделение основных категорий состояния песков и определяющих их критериев приведено в табл.4.

ОСНОВНЫЕ КАТЕГОРИИ СТРОИТЕЛЬНЫХ СВОЙСТВ ПЕСКОВ

2.35. С инженерно-геологической точки зрения решение большинства практических задач требует не только определения того или иного свойства песков и характеристики его конкретным показателем, но и четкого выделения основных категорий соответствующего строительного свойства. Это необходимо не только для принятия проектных решений (особенно на первой стадии проектирования), но, что особенно важно отметить, и для обоснования методики и методов изучения песчаных грунтов.

2.36. Для наиболее часто встречающихся инженерных задач необходима оценка таких основных свойств, как прочность, сжимаемость, динамическая устойчивость, уплотняемость, влагоемкость и водопроницаемость песков.

Основные категории этих свойств песков, контролируемые показатели и их количественные значения приведены в табл.5.

Таблица 5

Свойства	Категории	Показатель	
		наименование	количественное значение
Прочность	Непрочные	Сцепление C, МПа. Угол внутреннего трения φ, град	$C = 0$; $\varphi < 25$
	Малопрочные		$0 < C < 0{,}005$; $25 \leqslant \varphi < 40$
	Прочные		$0{,}005 \leqslant C \leqslant 0{,}02$; $30 \leqslant \varphi \leqslant 40$
	Высокопрочные		$C > 0{,}02$; $\varphi > 40$

Продолжение табл.5

Свойства	Категории	Показатель	
		наименование	количественное значение
Деформационность (сжимаемость)	Сильно сжимаемые	Модуль общей деформации E, МПа	$E < 5$
	Сжимаемые		$5 \leqslant E < 20$
	Малосжимаемые		$20 \leqslant E \leqslant 50$
	Незначительно сжимаемые		$E > 50$
Динамическая устойчивость (потенциальная возможность разжижения и объемных изменений)	Неустойчивые	Индекс относительной плотности J_d. Показатель упрочненности $П_у$	$J_d < 0{,}3$; $П_у \simeq 1$
	Слабоустойчивые		$0{,}3 \leqslant J_d < 0{,}4$; $1 < П_у < 1{,}5$
	Устойчивые		$0{,}4 \leqslant J_d \leqslant 0{,}6$; $1{,}5 \leqslant П_у \leqslant 2{,}4$
	Высокоустойчивые		$J_d > 0{,}6$; $П_у > 2{,}5$
Уплотняемость	Высокая	Коэффициент уплотняемости F	$F < 0{,}6$
	Средняя		$0{,}6 \leqslant F < 0{,}7$
	Низкая		$0{,}7 \leqslant F < 0{,}8$
	Очень низкая		$F > 0{,}8$
Влагоемкость	Низкая	Максимальная молекулярная влагоемкость $W_{м.м.в}$, %	$W_{м.м.в} < 2$
	Средняя		$2 \leqslant W_{м.м.в} < 5$
	Высокая		$5 \leqslant W_{м.м.в} \leqslant 10$
	Очень высокая		$W_{м.м.в} > 10$
Водопроницаемость	Очень сильноводопроницаемые	Коэффициент фильтрации $К_ф$, м/сут	$К_ф > 50$
	Сильноводопроницаемые		$10 < К_ф \leqslant 50$
	Водопроницаемые		$1 \leqslant К_ф \leqslant 10$
	Слабоводопроницаемые		$К_ф < 1$

2.37. В табл.5 выделение соответствующих категорий строительных свойств песков дается по одному-двум основным показателям. Эти показатели следует рассматривать как необходимые, но недостаточные для полной характеристики ряда свойств песков. Ряд дополнительных показателей указан в пп.2.38–2.42.

2.38. При характеристике прочностных и деформационных свойств песков крайне важно оценивать, как меняются они при водонасыщенности. Для этого следует определять коэффициент изменчивости показателей этих свойств при водонасыщении:

$$K_w^E = \frac{E_{\text{маловл}}}{E_{\text{водонас}}}; \quad K_w^C = \frac{C_{\text{маловл}}}{C_{\text{водонас}}}; \quad K_w^\varphi = \frac{\varphi_{\text{маловл}}}{\varphi_{\text{водонас}}}.$$

В ряде случаев эти показатели имеют большее значение для практики, чем, например, известный показатель

$$K_E = \frac{E_{\text{макс}}}{E_{\text{мин}}}.$$

Для решения некоторых задач по оценке прочностных свойств песков необходимо определять показатели длительной и критической прочности. Для характеристики структурных особенностей песков и оценки изменения их деформационных свойств при нарушении структуры полезно определять величину упругой части деформации при испытаниях песков штампами и т.д.

2.39. Объективная оценка динамической устойчивости песков и, что особенно важно отметить, уяснение причин отнесения песков к той или иной категории динамической устойчивости могут быть получены, как правило, только при одновременном анализе нескольких показателей, комплексно характеризующих особенности состава, строения, состояния и свойств песков. Поэтому для оценки динамической устойчивости, в частности возможности разжижения, водонасыщенных песков целесообразно ориентироваться на групповые критерии. Наиболее эффективно оценка динамической устойчивости песков может быть установлена на основании испытаний и исследований песчаных массивов полевыми методами. В этом случае категории динамической устойчивости песков могут быть определены по критериям, приведенным в табл.6 и рекомендованным "Руководством по оценке плотности и возможности разжижения малосвязных грунтов методом взрывного

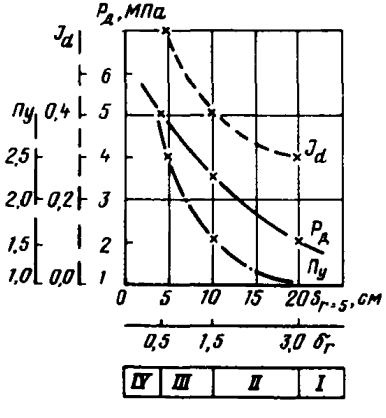


Рис.16. Графики зависимостей между показателями, используемыми для оценки разжижаемости водонасыщенных песков

I, II, III, IV – категории динамической устойчивости песков (по табл.6)

зондирования", разработанным ВНИИГ им. Б.Е.Веденеева и ЛПИ им. М.И.Калинина с участием МИСИ им. В.В.Куйбышева в 1981–1982 гг.

Между указанными в табл.6 критериями наблюдается четкая корреляция (рис.16).

Таблица 6

Категория динамической устойчивости и возможность разжижения	Осадки поверхности при взрыве		Сопротивление динамическому зондированию, МПа		Степень упрочненности $П_у$	Относительная плотность $J_д$	Характер изменения плотности и прочности после взрыва
	S_R, см	δ_R, %	$\rho_{д\,ср}$	$\rho_{д\,мин}$			
I. Неустойчивые (разжижение неизбежно)	Более 20	Более 3	Более 20	Менее 7	1	Менее 0,3	Значительное увеличение плотности и прочности
II. Слабоустойчивые (разжижение вероятно)	20–10	3–1,5	20–35	7–14	1–1,5	0,3–0,4	Ощутимое повышение плотности и прочности
III. Устойчивые (разжижение маловероятно)	10–4	1,5–0,5	35–50	14–20	1,5–2,5	0,4–0,6	Несущественное изменение плотности и прочности
IУ. Высокоустойчивые (разжижение невозможно)	Менее 4	Менее 0,5	Более 50	Более 20	Более 2,5	Более 0,6	Ощутимое, иногда значительное, снижение прочности; возможно разуплотнение

Примечания: 1. S_R – средняя осадка поверхности песка в пределах эффективного радиуса R камуфлетного взрыва стандартного заряда ВВ нормальной мощности весом $C = 5$ кг., $R = k\sqrt[3]{C}$, где k – коэффициент, равный для гравелистых песков 1,0, песков крупных – 2,0, песков средней крупности – 3,0.

2. δ_R – относительная осадка поверхности песка в зоне R при C;

3. $P_д$ – условное динамическое сопротивление при испытании песков динамическим зондированием стандартной установкой УБП-15М.

4. Ориентировочное изменение плотности-прочности по данным динамического зондирования для выделенных категорий динамической устойчивости составляет: I – $\Delta P_д$ + 30%; II – от +10 до +30%; III – в пределах ±10%; IУ – от –10 до –20% и более.

2.40. Категории уплотняемости песков выделены в табл.6 по величине коэффициента уплотняемости

$$F = \frac{e_{макс} - e_{мин}}{e_{мин}}.$$

Вместе с тем известно, что это свойство песков зависит от их начальной плотности–влажности. Наиболее эффективно уплотнение песков происходит при оптимальной влажности. Поэтому, оценивая уплотняемость песков, необходимо определять величину оптимальной влажности и устанавливать рабочий диапазон влажности, при котором достигается расчетная плотность скелета песков. Ориентировочно величина оптимальной влажности песков может быть определена по формуле

$$W_{опт} = 1,15\ W_{м.м.в} + 2,5,$$

где $W_{м.м.в}$ – максимальная молекулярная влагоемкость.

2.41. В табл.6 указаны категории влагоемкости песков, хотя это свойство значительно меньше выражено в песках по сравнению с глинистыми грунтами и обычно не принимается во внимание при изучении и оценке строительных свойств песков. Однако исследования последних лет показали, что для решения ряда практических задач учет этого свойства необходим и для песчаных грунтов. Это касается, в частности, решения вопросов прогнозирования времени консолидации намывных песков, ориентировочной оценки величины оптимальной влажности песков, оценки влияния влажности песков на их механические свойства и т.д. В качестве критерия для выделения категорий песков по влагоемкости целесообразно использовать величину максимальной молекулярной влагоемкости, которая, как установлено, является одним из показателей их структурных особенностей и может изменяться в сравнительно большом диапазоне абсолютных значений.

2.42. Оценку категории водопроницаемости песков, как правило, следует проводить по величине коэффициента фильтрации. В ряде случаев дополнительно необходимо оценивать величину удельного водопоглощения и степень фильтрационной анизотропии.

МЕТОДИКА ИЗУЧЕНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ СВОЙСТВ ПЕСКОВ НА ОСНОВЕ УЧЕТА ИХ ГЕНЕТИЧЕСКИХ ПРИЗНАКОВ

2.43. Рассмотренные в предыдущих разделах представления о генезисе песков, о сложной и многофакторной природе их свойств, о тесной взаимосвязи и взаимовлиянии особенностей состава, строения, состояния и свойств определяют необходимость комплексного подхода к изучению и оценке строительных свойств песков с современных позиций генетического грунтоведения. Генетический подход к изучению строительных свойств грунтов требует выявлять и оценивать соответствующими показателями основные генетические признаки.

Генетические признаки выражены в особенностях состава,

строения и состояния грунтов, а проявляются в их инженерно-геологических (строительных) свойствах.

Строго говоря, все рассмотренные выше признаки (показатели) состава, строения и состояния песков отражают их генетические особенности, однако далеко не все признаки (особенно отдельно взятые) настолько характерны, чтобы по ним можно было однозначно оценить эти генетические особенности песков.

2.44. По степени характерности к генетическим признакам песков следует отнести:

среди структурных особенностей – морфологию песка, соотношение содержания преобладающих фракций и гранулометрическую неоднородность, характер и степень развития структурных связей;

среди особенностей физического состояния – относительные плотность, уплотненность и упрочненность песков;

среди особенностей состава наиболее значимы химико-минеральный и биологический составы.

2.45. Исходя из факта взаимообусловленности и взаимовлияния особенностей состава, строения и состояния песков целесообразно в общем случае отнести к важнейшим группам генетических признаков (и их показателей), наиболее существенно влияющих на строительные свойства песков, следующие:

гранулометрические особенности, контролируемые группой показателей P_d, K_C, $П_М$ и др. (см. табл.1 и 3);

морфологические особенности, контролируемые обобщенным показателем λ;

относительная плотность и уплотненность, контролируемые показателями J_d и F_d;

относительная упрочненность, контролируемая показателями $П_У$ и $П_d$.

Важными дополнительными показателями, характеризующими генетические признаки песков, являются значения предельных плотностей ($\rho_{d\,макс}$, $\rho_{d\,мин}$ и $\rho_{d\,макс} - \rho_{d\,мин}$), максимальная молекулярная влагоемкость ($W_{м.м.в}$) и оптимальная влажность ($W_{опт}$), а также коэффициент уплотняемости песков (F).

2.46. Выполненные исследования показывают перспективность поиска новых, не использовавшихся ранее показателей, комплексно отражающих определенную совокупность особенностей состава, строения, состояния и иногда свойств песков. К числу таких показателей следует отнести, например, коэффициент относительной уплотненности песков F_d. Эффективность использования этого показателя видна из рассмотрения рис.17, на котором показаны результаты тарирования легкого забивного зонда в нескольких разновидностях песков средней крупности в первые дни после намыва их в земляные плотины. Характеристика этих песков дана в табл.7.

Таблица 7

№ кривых на рис.17		1	2	3	4
Объект		Приморская ГРЭС	Курская АЭС	Ново-Воронежская АЭС	Рижская ГЭС
Геологический индекс песков карьеров		$a\,Q_3$	$a\,Q_4$	$a\,Q_4$	$f_g\,Q_2$
Содержание минералов, %	Кварц	44,3	78,2	94,1	83,1
	Полевые шпаты	10,4	10,9	3	6,31
	Обломки осадочных пород	38,12	–	–	–
Содержание размерных фракций, %	>2	7	7,9	0,6	1,6
	2–1	3	16,4	2,3	1,2
	1–0,5	4,5	19,9	7,3	11,9
	0,5–0,25	43,2	44	56,4	51,1
	0,25–0,1	34,6	10,2	31,4	30,1
	0,1–0,05	1,4	1,1	1,1	2,1
	0,05–0,005	3,3	0,4	0,8	1,3
	0,005	2,8	0,1	0,1	0,7
Содержание фракции размером меньше 0,25 мм, %		57,7	88,2	66,6	65,3
Показатели гранулометрической неоднородности	U	2,9	2,6	2,4	2,6
	Π	3,1	3,8	1,2	1,5
	S_p	10,9	8,3	3,7	5
	$\Pi_м$	44,1	10,1	2	2,3
Коэффициенты сбега	K_{c1}	1,2	4,3	1,8	1,7
	K_{c2}	24,7	9,3	28,5	14,3
Показатели морфологии	α	0,273	0,404	0,472	0,398
	β	0,765	0,839	0,860	0,767
	K	0,209	0,340	0,406	0,301
	R'	3,75	8,46	7,15	5,52
	λ	0,340	0,452	0,441	0,386
Плотность минеральной части, г/см^3	γ_s	2,66	2,66	2,66	2,66
Предельные плотности скелета, г/см^3	$\gamma_{d\,min}$	1,26	1,38	1,46	1,48
	$\gamma_{d\,max}$	1,58	1,74	1,74	1,8
Максимальная молекулярная влагоемкость $W_{м.м.в}$, %		7	3,2	3,9	3,4

Продолжение табл.7

№ кривых на рис.17	*1*	*2*	*3*	*4*
Объект	Приморская ГРЭС	Курская АЭС	Ново-Воронежская АЭС	Рижская ГЭС
Коэффициент уплотняемости *F*	0,62	0,77	0,58	0,68

Примечание: Наименование песков по категориям состава, строения, состояния и свойств (по табл.1, 3–5, 11):

1 – олигомиктовые, средней крупности, бидисперсные, повышенной неоднородности, слабообработанные (несферичные, незначительно угловатые, весьма шероховатые), высокой влагоемкости, средней уплотняемости;

2 – полиминеральные (кварцево-полевошпатовые), средней крупности, полидисперсные, неоднородные, обработанные (малосферичные, слабоокатанные, гладкие), средней влагоемкости, низкой уплотняемости;

3 – мономинеральные (кварцевые), средней крупности, бидисперсные, однородные, обработанные (малосферичные, слабоокатанные, слабошероховатые), средней влагоемкости, высокой уплотняемости;

4 – полиминеральные (кварцево-полевошпатовые), средней крупности, бидисперсные, однородные, слабообработанные (несферичные, слабоокатанные, шероховатые), средней влагоемкости, средней уплотняемости.

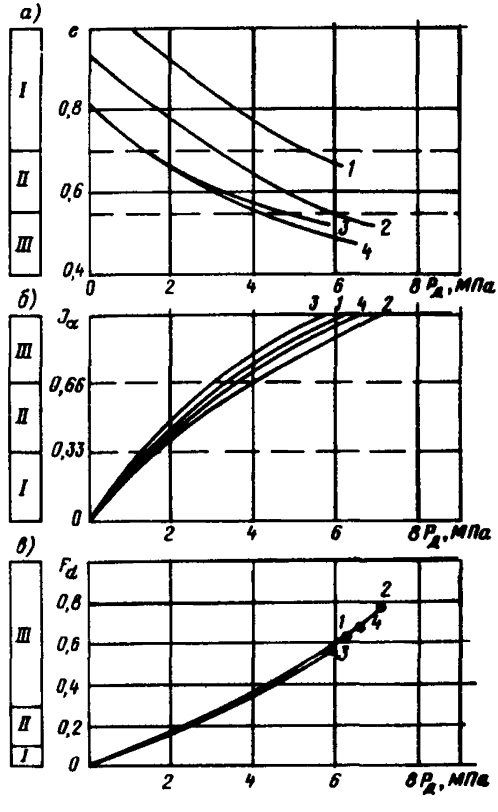


Рис.17. Тарировочные графики легкого забивного зонда ЛЗЗ-3 в намывных песках средней крупности

а – $e = f(R_д)$; *б* – $J_\alpha = f(R_д)$; *в* – $F_d = f(P_д)$ (по данным А.Н.Юлина); *1* – Приморская ГРЭС; *2* – Курская АЭС; *3* – Ново-воронежская АЭС; *4* – Рижская ГЭС; *I, II, III* – категории относительной плотности и относительной уплотненности изученных песков (по табл.4)

Различия в структурно-генетических особенностях этих песков не позволяют получить общую тарировочную зависимость вида $e = f(\rho_д)$ и однозначно оценить степень их плотности по рекомендации СНиП II-15-74 (рис.17*д*). Более точную оценку относительной плотности дало использование показателя J_d: тарировочные кривые сближаются и зоны, в которых ошибочно могут быть оценены "смежные" категории степени плотности песков, оказываются сравнительно невелики, но и в этом случае для изученных песков не наблюдается однозначной связи между J_d и $\rho_д$ (рис. 17,*б*). Использование же показателя F_d обеспечивает практически инвариантность рассматриваемой зависимости, т.е. показатели F_d и $\rho_д$ однозначно, комплексно характеризуют структурные особенности и состояние изученных песков по плотности.

Подобный подход к изучению песков с характеристикой их генетических признаков соответствующими показателями позволяет более объективно оценивать свойства песков, подбирать пески-аналоги, прогнозировать тарировочные зависимости вида $F_d = f(\rho_д)$, обоснованно подходить к выбору методики и методов их исследования и к интерпретации получаемых результатов.

2.47. При изучении и оценке каждого свойства песка следует учитывать, что взаимосвязь и взаимовлияние рассмотренных выше категорий состава, строения, состояния и свойств песков характеризуются, образно говоря, различным энергетическим уровнем. Условно можно выделить взаимосвязи трех порядков: наиболее сильное, прямое влияние одной категории на другую – связь I порядка; среднее, прямое или косвенное, влияние – связь II порядка; слабое, в основном косвенное, влияние – связь III порядка.

Например, при оценке динамической устойчивости водонасыщенных песков:

влияние относительной плотности, относительной упрочненности, характера и степени развития структурных связей следует отнести к энергетическим связям (факторам) I порядка;

влияние гранулометрического состава, морфологии зерен, содержания защемленного воздуха и напряженного состояния – к энергетическим связям (факторам) II порядка;

влияние минералогического, химического, биологического состава и характера текстуры – к энергетическим связям (факторам) III порядка.

3. ОТБОР ОБРАЗЦОВ ПЕСЧАНЫХ ГРУНТОВ

ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ОБРАЗЦАМ

3.1. В настоящее время отбор образцов песчаных грунтов является одной из важных операций опробования массивов, выполняемой на различных этапах инженерно-геологических изысканий. В зависимости от назначения и метода испытания грунта к образцам предъявляются определенные требования, большинство которых описано в действующих нормативных и методических документах.

К числу основных требований относятся: типичность для определенного инженерно-геологического элемента; соответствие петрографического и гранулометрического (зернового) состава природному составу; оптимальность массы (объема) грунта в образцах, достаточной для геологического его описания или проведения необходимого комплекса лабораторных исследований и контрольных определений.

3.2. На различных этапах изысканий отбираются образцы с нарушенной структурой в основном для геологической документации, установления значений классификационных и прямых показателей состава и свойств грунтов. Минимальный объем такого образца составляет 1 $см^3$. Для характеристики классификационных показателей песчаного грунта необходимо иметь образец грунта массой 0,1–2 кг в зависимости от размера частиц песка и наличия включений.

К числу классификационных показателей песчаных грунтов относятся гранулометрический состав, коэффициент пористости, влажность, а также для грунтов особого состава и состояния – засоленность, содержание органического вещества, мерзлотное состояние и т.п. Обычно изыскателями производятся массовые определения гранулометрического состава и влажности песчаных грунтов, тогда как число отбираемых монолитов значительно меньше количества образцов песка нарушенного сложения. Как правило, монолиты песка отбираются из опорных обнажений и горно-буровых выработок.

3.3. По данным экспериментальных исследований, в образце, извлеченном из скважины с помощью грунтоноса, различаются зоны с различной степенью нарушенности сложения грунта. В верхней *I* и нижней *III* частях образца, а также в его периферийной части *II* грунт имеет нарушенное сложение (рис.18). Грунт с ненарушенным сложением и природной влажностью располагается только с центральной части *IУ* образца [4]. Оптимальные размеры образцов песчаного грунта ненарушенного сложения, отбираемых из скважин, приведены в табл.8.

Максимальная высота такого образца, из которого затем отбирают один-два монолита, соответствует предельной глубине погружения грунтоноса в грунт, превышение которой вызывает

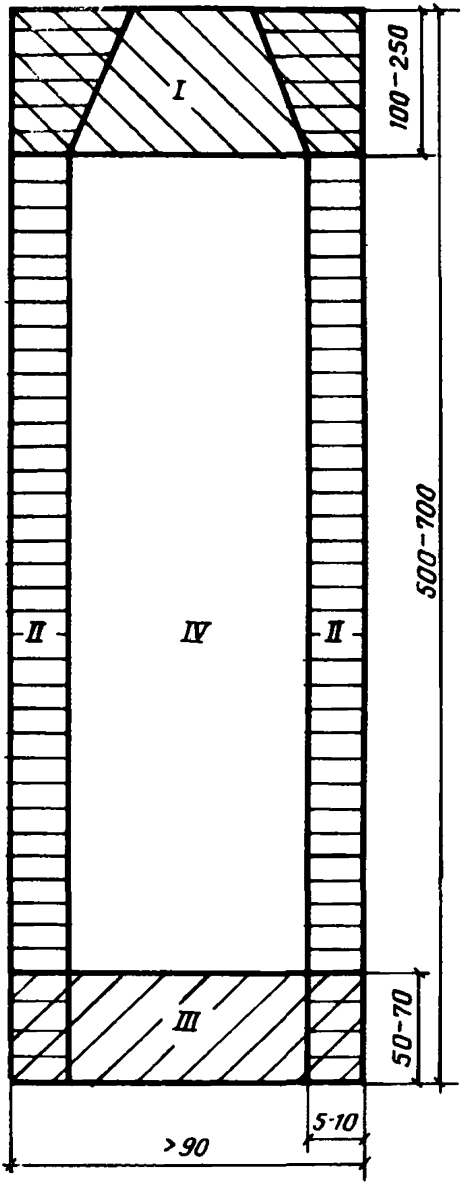


Рис.18. Схематический продольный разрез образца песчаного грунта, отобранного из буровой скважины

нарушение сложения грунта во всем объеме отбираемого монолита. Оптимальная высота монолита по ГОСТ 12071–72 должна находиться в пределах одного–трех его диаметров. Для определения прочностных характеристик песчаных грунтов методом одноплоскостного среза необходимо иметь не менее трех проб высотой по 60 мм. С учетом контрольного испытания четвертой пробы максимальная высота монолита принята равной 270 мм. Такая же высота монолита необходима и для получения двух проб песчаных грунтов диаметром 50 и высотой 100 мм, предназначенных для испытания методом трехосного сжатия. Отбор монолита более 270 мм нецелесообразен, так как при упаковке и транспортировании относительно длинные монолиты легче изгибаются и деформируются, чем короткие.

Диаметр монолита должен превосходить внутренний диаметр колец лабораторных приборов на величину удвоенной средней мощности его периферийной части. Эта часть, в которой грунт имеет нарушенное сложение, образуется в результате взаимодействия грунта с грунтоносом. В монолитах песчаных грунтов средняя мощность этой части составляет 5–7 мм. По ГОСТ 12071–72 диаметр песчаных грунтов должен быть не менее 90 мм.

Таблица 8

Песчаные грунты	Оптимальные размеры образца, мм		Средняя мощность нарушенной периферийной части монолита, мм
	максимальная высота	минимальный диаметр	
Плотные и средней плотности	500	90	7
Рыхлые	500	90	5
Водонасыщенные	700	90	5

МЕТОДЫ И ТЕХНИКА ОТБОРА ОБРАЗЦОВ

3.4. Отбор образцов с нарушенной структурой из горных выработок обычно не вызывает затруднений. Поэтому в настоящей главе рассматриваются методы и техника отбора монолитов песка.

При отборе монолитов песчаных грунтов из горных выработок применяется точечный метод опробования. Основные правила отбора монолитов регламентированы ГОСТ 12071–72. Монолиты отбираются из зачищенных стен и забоя выработок.

Из песков, как правило, отбирают монолиты цилиндрической формы в тонкостенное кольцо с заостренным снаружи нижним краем. Перед отбором монолита внутреннюю поверхность покрывают тонким слоем вазелина.

3.5. Большие по размерам монолиты плотных песков целесообразно отбирать с помощью ручного бура и кольца, оптимальные размеры которых приведены в табл.9. Бур и кольцо должны иметь форму правильного цилиндра. В верхней части бура дополнительно имеются два отверстия для ввода стержня с ручками, а в нижней его части – разведенные зубцы высотой 15–20 мм.

Таблица 9

Инструмент	Диаметр, мм		Высота, мм
	наружный	внутренний	
Бур	146 212	140 206	220 250
Кольцо	144 210	138 204	120 150

3.6. Из горных выработок отбор монолитов средней плотности и рыхлых песчаных грунтов осуществляется способами вдавливания и поинтервального вдавливания. При отборе монолитов

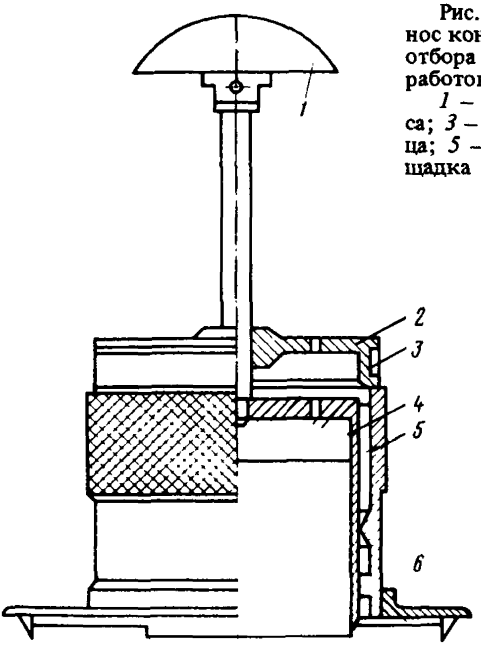


Рис.19. Вдавливаемый грунтонос конструкции ВСЕГИНГЕО для отбора монолитов из горных выработок

1 – ручка; *2* – крышка корпуса; *3* – корпус; *4* – крышка кольца; *5* – кольцо; *6* – опорная площадка

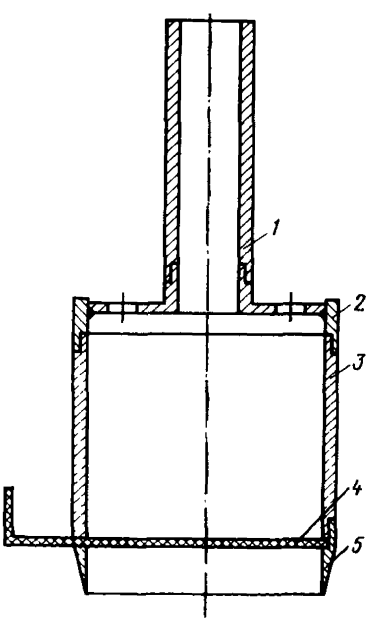


Рис.20. Кольцо с башмаком, оборудованным затворной пластинкой (конструкция ЦТИСИЗ)

1 – ручка; *2* – крышка; *3* – кольцо; *4* – пластинка; *5* – башмак

способом вдавливания используются тонкостенные цилиндрические кольца, имеющие внутренний диаметр не менее 84 мм, угол заострения башмака снаружи до 10°, разность между внутренними диаметрами входного отверстия и внутренней полостью кольца 2–3 мм. Поинтервальное вдавливание применяется для получения монолитов в тонкостенные цилиндрические гладкоствольные кольца, имеющие внутренний диаметр не менее 84 мм, угол наружного заострения до 10°, среднее отношение внутреннего диаметра к высоте не менее 1:1 (рис.19).

3.7. Образцы рыхлых сыпучих песков рекомендуется отбирать в кольцо с башмаком, оборудованным запорной пластиной (рис.20). Внутренняя поверхность кольца и башмака должна иметь форму правильного цилиндра, а суммарная их высота – не менее половины и не более 1,5 диаметра кольца. Башмак и кольцо вдавливают вертикально на глубину, превышающую на 1 см их суммарную высоту. Кольцо окапывают ножом до прорези, в которую вводят пластинку до упора ее в выступы башмака. Затем крышку кольца осторожно снимают, а выступающий за пределы кольца грунт удаляют. Содержимое кольца отправляют в лабораторию для определения объемной массы грунта.

3.8. Основными способами отбора монолитов песчаных грунтов из буровых скважин являются обуривающий и вдавливающий способы.

При обуривающем способе отбора монолитов плотных и средней плотности песчаных грунтов коронка грунтоноса обуривает столбик монолита, который поступает в невращающийся стакан грунтоноса. Скорость вращения грунтоноса не должна превышать 60 об/мин, осевая нагрузка на грунтонос – не более 10 МПа.

При вдавливающем способе отбора монолитов рыхлых песчаных грунтов грунтонос погружается на определенную глубину под действием статической нагрузки со скоростью не более 0,5 м/мин. Внутренний диаметр башмака вдавливаемого грунтоноса должен быть на 0,1–1 мм меньше внутреннего диаметра корпуса или грунтоприемной гильзы.

3.9. Монолиты песчаных грунтов отбираются из скважин с помощью грунтоносов нормального ряда, техническая характеристика и область применения которых приведены в табл.10.

Для отбора монолитов грунтов с помощью обуривающего грунтоноса ГО-1 или ГО-2 проходят скважины диаметром соответственно не менее 160 или 185 мм без применения промывочной жидкости и подлива в них воды.

Грунтонос с помощью бурового станка приводится во вращение со скоростью 50–60 об/мин и осевым давлением не более 100 кг.

Для отбора монолитов грунтов с помощью вдавливаемого грунтоноса ГВ-1 или ГВ-2 проходят скважины диаметром соответственно не менее 108 или 127 мм без применения промывочной жидкости и без подлива в них воды. Подготовленный к работе

Таблица 10

Грунтонос нормального ряда	Индекс грунтоноса	Длина грунтоноса, мм	Наружный диаметр грунтоноса, мм	Наружный диаметр корпуса, мм	Диаметр входного отверстия башмака, мм	Длина гильзы, мм	Внутренний диаметр гильзы, мм	Угол заточки башмака, град	Наружный диаметр гильзы, мм	Масса грунтоноса, кг	Область применения грунтоноса
Обуривающий грунтонос	ГО-1	850	160	127	93	400	94	30	97	42,5	Плотные и средней плотности песчаные грунты
	ГО-2	900	185	146	108	400	108	30	113	45	
Вдавливаемый грунтонос (модель I)	ГВ-1 (I)	565	108	105	96	300	97	8	100	12	Рыхлые песчаные грунты
	ГВ-2 (I)	565	127	125	116	300	117	8	120	15	
Вдавливаемый грунтонос (модель II)	ГВ-3 (II)	760	115	108	96	400	98	10	100	9	То же
	ГВ-4 (II)	760	135	127	115	400	116	10	119	12,8	
Вдавливаемый грунтонос (модель III)	ГВ-5 (III)	965	135	108	86	300	87	7	90	26	Водонасыщенные рыхлые грунты

грунтонос соединяется с буровой штангой и опускается на зачищенный забой скважины. Равномерное вдавливание грунтоноса осуществляется с помощью специального вдавливаемого устройства или штурвала бурового станка. При этом скорость погружения грунтоноса в грунт не должна превышать 0,5 м/мин.

Оптимальная глубина погружения грунтоноса составляет 44 см. После вдавливания на оптимальную глубину грунтонос оставляют в покое на 1—2 мин. При этом в периферийной зоне отобранного образца происходит разуплотнение грунта, образец лучше соприкасается с внутренними стенками башмака и гильзы.

Для отбора монолитов с помощью вдавливаемого грунтоноса ГВ-3 или ГВ-4 проходят скважины диаметром соответственно не менее 115 или 135 мм без применения промывочной жидкости и без подлива в них воды, с перекрытием водоносных горизонтов.

Подготовленный к работе грунтонос с открытым подрезающим устройством соединяется с буровой штангой и осторожно опускается на зачищенный забой скважины. Статическое медленное вдавливание грунтоноса со скоростью не более 0,5 м/мин практически исключает возможность возникновения большого гидродинамического напора воды в отбираемом образце грунта. В процессе вдавливания воздух и грунтовая вода по мере поступления образца во внутреннюю полость грунтоноса вытесняются вверх и через клапан попадают в скважину. Оптимальная глубина погружения грунтоноса в грунт составляет 50—55 см. Превышать эту глубину не рекомендуется, так как отмечается уплотнение грунта в верхней части образца и нарушение сложения грунта во всем объеме отбираемого монолита.

Для отбора монолитов грунтов с помощью вдавливаемого грунтоноса ГВ-5 проходят скважины диаметром не менее 135 мм без применения промывочной жидкости и без подлива в них воды, с перекрытием водоносных горизонтов.

Оптимальная глубина вдавливания грунтоноса в грунт составляет 70 см. При превышении этой глубины отмечается уплотнение грунта в верхней части образца и нарушение сложения грунта во всем объеме отбираемого монолита.

УПАКОВКА, ТРАНСПОРТИРОВАНИЕ И ХРАНЕНИЕ МОНОЛИТОВ

3.10. Монолит песчаного грунта, отобранный из горно-буровой выработки, направляется в инженерно-геологическую лабораторию для выявления состава, состояния и физико-механических свойств грунтов. С целью сохранения ненарушенного сложения и естественной влажности грунта за время начиная от момента отбора до производства испытаний монолит упаковывают.

Монолиты размещают, как правило, в металлических кольцах, у которых по торцам имеются резиновые прокладки. Если такие прокладки отсутствуют, места соединения крышки с тарой по-

крывают двойным слоем изоляционной ленты или заливают смесью парафина с гудроном. При отсутствии жестких крышек торцы тары парафинируют. В последнем случае перед заливкой парафина на открытые торцы кладут 2–4 слоя марли. На верхнюю грань монолита между резиновой прокладкой и крышкой или между слоями парафина кладут этикетку. Вторую этикетку, ориентированную относительно верха и низа монолита, прикрепляют на боковой поверхности жесткой тары. Если грунтонос оборудован грунтоприемной гильзой, сделанной из парафинированной бумаги или пластмассы, то ее после отбора монолита плотно закрывают по торцам крышками. Области сочленения гильзы с крышками покрывают двумя слоями изоляционной ленты или парафинируют.

3.11. Монолиты песчаного грунта должны транспортироваться в деревянных ящиках, подвешенных в кузове автомашины на специальных растяжках. Последние представляют собой резиновые кольца шириной 15–20 см, вырезанные из автомобильной камеры. Скорость движения автомашины с монолитами по грунтовой дороге не должна превышать 5 км/ч, на асфальтированной дороге – 40 км/ч. Транспортирование упакованных в ящики монолитов немерзлых грунтов производят при положительной температуре окружающего воздуха. Допускается транспортирование упакованных в ящики монолитов немерзлых грунтов при отрицательной температуре воздуха при условии, что время транспортирования не будет превышать 3 ч, считая с момента упаковки монолитов в ящики или извлечения из временных хранилищ до доставки их в лабораторию.

3.12. При хранении упакованных монолитов песчаных грунтов соблюдаются следующие требования:

в специальном помещении (камере) должна поддерживаться положительная температура воздуха не ниже плюс 2°С и не выше плюс 20°С и относительная влажность воздуха должна быть в пределах 50–60%;

стены, пол и потолок помещения не должны подвергаться извне резким температурным колебаниям и вибрационным воздействиям;

на полках в один ярус размещаются монолиты, ориентированные относительно верха и низа;

монолиты не должны касаться друг друга и стоек полок;

монолит должен быть размещен на полке всей нижней торцовой поверхностью;

запрещается размещать на монолитах какие-либо предметы;

не разрешается изменять местоположение монолита до наступления времени его вскрытия.

3.13. Продолжительность хранения монолита должна быть минимальной. Непрерывные сложные физико-химические процессы, происходящие в монолите, приводят к перераспределению влаги и некоторому изменению напряженного состояния и объема поро-

ды. В тех случаях, когда грунт монолита имеет хотя бы малейшее сообщение с атмосферой через образовавшиеся в изоляционном слое трещины, отмечается ее обезвоживание не только около тех мест, где имеются эти трещины, но и в пределах всего объема монолита.

Монолиты, получившие повреждения гидроизоляционного слоя при транспортировании и дефекты упаковки или хранения, не должны приниматься к проведению лабораторных испытаний. Упакованные монолиты маловлажных песчаных грунтов должны храниться с момента их отбора до начала лабораторных испытаний не более 3 мес, а монолиты остальных видов грунтов — не более 1,5 мес. При отсутствии специально подготовленного помещения (камеры) монолиты немерзлых грунтов можно хранить во влажных средах (влажные опилки, стружки и т.п.). Монолиты маловлажных песчаных грунтов допускается также хранить при положительных температурах до плюс 30°С. В этих случаях срок их хранения не должен превышать 15 сут.

Требования к отбору, транспортированию и хранению образцов изложены в ГОСТ 12071–72.

ДОСТОВЕРНОСТЬ МЕТОДОВ ОТБОРА МОНОЛИТОВ

3.14. Инженерно-геологические характеристики песков по данным лабораторных анализов существенным образом зависят от качества отбора используемых монолитов. На качество отбора влияют конструкция грунтоотборного устройства и способ его внедрения в грунт.

При вдавливании кольца цилиндрической формы в песках объемная масса грунта внутри кольца, как правило, изменяется и не соответствует объемному весу природного грунта.

При вдавливании кольца в рыхлые или плотные пески вода соответственно отжимается или подсасывается к месту погружения наконечника. Возникающее гидродинамическое давление не превышает 0,01 МПа, но даже такое давление при быстром вдавливании кольца (за 2 с) может уплотнять грунт в образце и является одной из причин нарушения сложения грунта. При медленном вдавливании кольца (за 10–20 с) гидродинамическое давление в песке практически не возникает, так как вода за это время успевает отфильтроваться.

3.15. Изменение объемной массы песка внутри кольца может происходить за счет поступления в кольцо дополнительного объема грунта, а также в результате трения грунта о внутренние стенки кольца. Отмечено [4], что чем меньше угол заострения кольца и чем больше его диаметр, тем меньше изменение объемной массы грунта. Предложена формула для расчета дополнительного объема грунта $V_{доп}$, который попадает в тонкостенное цилиндрическое кольцо в процессе его вдавливания:

$$V_{доп.} = \pi \left(R + \frac{r}{2} \right)^2 h ,$$

где R – внутренний радиус кольца;
h – высота кольца;
r – радиус шарообразной частицы грунта.

3.16. При вдавливании пластин в песчаный грунт нужно учитывать следующие закономерности [5]:

при вдавливающем, забивном и вибрационном рейсовых способах погружения буровых наконечников на глубину 0,5–0,7 м преобладают деформации сдвига;

угол заострения и толщина пластины существенно влияют на развитие зон сдвигов около пластины;

сужение нижней части пластины не оказывает существенного влияния на нарушение сложения песчаного грунта между пластинами;

для отбора монолитов необходимо применять вдавливаемые тонкостенные грунтоносы с углом заострения не более 10° и суженным входным отверстием;

максимальная мощность области развития зон сдвигов вдоль внутренней стенки наконечника равна удвоенной ее толщине, а вдоль внешней стенки – десятикратной толщине.

3.17. Нарушение сложения грунтов в отбираемых образцах несущественно при вдавливании тонкостенных гладкоствольных колец до предельной глубины, а также при применении колец внутренним диаметром не менее 84 мм с углом заострения башмака 7°, с разностью между внутренним диаметром входного отверстия и внутренней полостью кольца 2–3 мм [5].

Предельная глубина $H_{пр}$ погружения грунтоноса в грунт определяется по формуле

$$H_{пр} = R \operatorname{ctg} \left(45^{\circ} - \frac{\varphi}{2} \right),$$

где R – внутренний радиус грунтоноса, мм;
φ – угол внутреннего трения, град.

3.18. Забивной и виброударный способы погружения грунтоноса в грунт не рекомендуется использовать для отбора песков, грунтов, чрезвычайно чувствительных к динамическим воздействиям.

3.19. При вращательном способе происходит трение грунта о внутренние стенки вращающегося стакана, создается значительное давление массивными резцами коронки, а также иногда возникает вибрация грунтоноса из-за большого трения песка. При отборе с помощью обуривающего грунтоноса резцы разрабатывают кольцевой забой скважины и постепенно уменьшает диаметр монолита до размера, равного внутреннему диаметру стакана. В процессе отбора монолит должен приниматься в невращающийся стакан. Вдавливающий способ может находить применение лишь при отборе рыхлых песков, не оказывающих существенного сопротивления погружению грунтоноса.

3.20. Отбор монолитов грунтов различных по составу, состоянию и свойствам с помощью одного универсального наконечника не представляется возможным.

В отобранных различными методами образцах в общей области взаимодействия грунта с наконечником выделяются область изменения текстуры грунта и область существенного изменения физико-механических свойств грунта. Размеры общей области изменяются в зависимости от состава и свойств грунта, а также от способа технологического режима погружения и конструкции наконечников.

Монолиты плотных и средней плотности песчаных грунтов диаметром более 90 мм из буровых скважин рекомендуется отбирать обуривающим методом грунтоносами с опережающей коронкой без применения промывочной жидкости, монолиты рыхлых песков диаметром более 90 мм – вдавливающим методом тонкостенными грунтоносами с суженным входным отверстием по ГОСТ 12071–72.

4. ИЗУЧЕНИЕ ХИМИКО-МИНЕРАЛЬНОГО СОСТАВА ПЕСКОВ

МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ МИНЕРАЛЬНОГО СОСТАВА ПЕСЧАНЫХ ПОРОД

4.1. Минеральный состав песков определяется путем проведения петрографо-минералогического анализа, под которым понимают систему приемов разделения пород на составляющие их компоненты.

Основное внимание следует уделять изучению породообразующих компонентов [15] , которые в основном влияют на инженерно-геологические свойства породы. Примеси, которые более разнообразны по составу компонентов, представляют с точки зрения инженерно-геологической оценки песков меньший интерес, поэтому при их изучении следует обращать внимание в основном на диагностику слабоустойчивых и глинистых минералов, поскольку с ними, как правило, связываются возможные изменения инженерно-геологических свойств песков.

Исследование минерального состава песков следует начинать с момента отбора образцов в обнажении или горных выработок путем тщательного визуального изучения обнажения, стенок шурфа, керна из скважины. Такое исследование позволит выявить некоторые общие черты минерального состава песков – наличие обломков пород, цветных или темно-цветных минералов, пленок, агрегатов, степень ожелезнения и т.д. – и, главное, правильно отобрать наиболее представительные образцы для лабораторных исследований.

4.2. Детальное изучение минерального состава проводят с использованием лабораторных методов, из которых наиболее часто применяют метод разделения минералов тяжелыми жидкостями, методы магнитной и электромагнитной сепарации, исследование минералов под микроскопом (иммерсионный метод). Эти три метода часто применяют совместно, так как минералогический анализ зерен в иммерсии требует предварительной специальной подготовки породы к анализу – разделение ее на фракции по размеру частиц, плотности и магнитным свойствам.

Выбор фракций песчаных грунтов для минералогического анализа осуществляется в соответствии с данными гранулометрического состава. Распределение отдельных минералов в различных по размеру фракциях неодинаково, наибольшее количество минералов сосредоточено во фракциях размером 0,5–0,25, 0,25–0,1, 0,1–0,05 и 0,05–0,01 мм, поэтому разные исследователи предлагают подвергать минералогическому исследованию различные фракции – от одной (чаще 0,25–0,01 мм) до пяти–семи и более. Для инженерно-геологических целей, когда требуется изучить главным образом породообразующие минералы, рекомендуется [15] проводить минералогический анализ для монодисперсных песков – по одной преобладающей фракции, а для полидисперсных песков – по двум или трем преобладающим фракциям.

Наличие различных пленок на минералах затрудняет их диагностику и делает невозможным выделение доброкачественной тяжелой фракции вследствие присутствия легких минералов с железистыми пленками. Поэтому перед разделением минералов тяжелой жидкостью применяются специальные методы обработки с целью удаления таких пленок.

4.3. Пробы, подготовленные к анализу, в дальнейшем разделяются тяжелыми жидкостями на две фракции: легкую (плотность <2,9 г/см^3) и тяжелую (плотность >2,9 г/см^3). Для этого разделения выбирают жидкость с соответствующей плотностью. Рекомендуется [14] применять жидкость с плотностью 2,9–2,8 г/см^3.

Тяжелые минералы, содержащиеся, как правило, в незначительных количествах, не представляют большого интереса и могут или вовсе не подвергаться дальнейшим исследованиям, или быть определены только качественно. Исключение составляют лишь слабоустойчивые минералы (оливин, глауконит, авгит, кальций и др.), которые должны изучаться не только качественно, но и количественно.

Среди минералов тяжелой фракции значительную часть обычно составляют минералы, обладающие сильными магнитными свойствами: самородное железо, магнетит, титаномагнетит, ильменит, франклинит, пирротин. Такие минералы могут быть выделены в отдельную фракцию. Для этого тяжелую фракцию рассыпают тонким слоем на листе чистой бумаги или на стеклянной пластинке. Затем конец обычного подковообразного магнита (или магнитного бруска) обворачивают папиросной бумагой и медленно прово-

дят им по рассыпанному материалу. Приставшие к магниту минералы легко отделяются от него при извлечении магнита из бумаги. Эту операцию рекомендуется повторять два-три раза. Если тяжелая фракция содержит кроме сильномагнитных минералов минералы среднемагнитные и со слабыми магнитными свойствами, то извлечение их производится при помощи электромагнита, напряженность электромагнитного поля которого регулируется силой тока.

4.4. Из выделенных тяжелой жидкостью легкой и тяжелой фракций приготавливаются препараты для микроскопического исследования [14]. Порошок фракции тщательно перемешивают, небольшое количество набирают на кончик покровного стекла и осторожно рассыпают тонким слоем на предметном стекле. Затем зерна покрывают покровным стеклом и осторожно вводят иммерсионную жидкость. При исследовании тяжелой фракции применяют жидкость с показателем преломления 1,630–1,650, а при исследовании легкой фракции – с показателем преломления 1,542. Под микроскопом просматривается разное число песчаных зерен – от 100 до 1000, чаще 400–500, и по ним подсчитывают количество того или иного минерала в пробе.

4.5. Количественную минералогическую характеристику рекомендуется [14] проводить только в легкой фракции, выражая содержание минералов в процентах ко всей навеске. Содержание тяжелых минералов в большинстве случаев может быть выражено суммарно. Обязательный количественный подсчет должен быть проведен также для слабоустойчивых минералов даже в том случае, если они составляют примесь.

Если для инженерно-геологической характеристики песчаных пород необходимы сведения о качестве и количестве минералов пылеватой и глинистой фракций, то в этом случае применяют другие методы минералогического анализа: метод агрегатов ориентированных частиц, электронно-микроскопический, термический, рентгеноструктурный и т.д.

При этом следует учитывать, что рекомендуется при изучении минералов глинистой фракции использовать комплекс методов, так как универсального метода, с помощью которого можно было бы во всех случаях определить состав ассоциаций минералов глинистой фракции, в настоящее время не существует.

4.6. Метод агрегатов ориентированных частиц основан на применении иммерсионного метода для изучения минералогического состава глинистой составляющей связных грунтов на специально приготовленных препаратах ориентированных частиц. Препараты ориентированных частиц готовят путем медленного выпаривания глинистых частиц на предметном стекле. При этом на стекле осаждается слой глинистых частиц, ориентированных параллельно их наиболее развитой поверхности. Полученные образцы переносят в иммерсионную жидкость, накрывают предметным стеклом и изучают под микроскопом форму частиц и их оптические свойст-

ва, по которым диагностируют минералы глинистой фракции. Этот метод дает хорошие результаты для мономинеральных глин. В полиминеральных глинах определяются также средние значения оптических свойств для комплекса минералов, в результате чего правильная дешифровка минералов становится невозможной.

4.7. Электронно-микроскопический метод позволяет получать изображения минералов при помощи электронных лучей и электромагнитных линз. На пути потока электронов помещается ускоряющее напряжение, под влиянием которого поток электронов приобретает свойства волны, длина которой пропорциональна ускоряющему напряжению. Разрешающая способность микроскопа зависит от длины волны, которая в электронных микроскопах может достигать сотых долей ангстрема. Для изучения глинистых минералов при помощи электронного микроскопа препарат готовится по методу суспензий и помещается на специальную сетку с пленкой-подложкой. При просмотре образца определяются форма частиц, харктер и степень четкости контуров изображения, плотность и размер изображения. На основании визуальной оценки можно определить содержание отдельных минералов: преобладающие, сопутствующие, примесь, незначительная примесь, единичные зерна.

4.8. Термический метод разделяется на два вида анализа: дифференциально-термический анализ (ДТА), дающий кривые нагревания, и термовесовой (термогравиметрический), дающий кривые изменения веса. Первый анализ основан на изучении тепловых эффектов, сопровождающих физико-химические превращения вещества при его нагревании. В процессе нагревания образца в специальной печи фиксируется температура образца. По форме температурной кривой и по значению температуры, при которой возникают резкие изменения процессов, определяют глинистые минералы в образце, сравнивая температурные кривые образцов с кривыми эталонных минералов. Отмечается [14], что расшифровка кривых ДТА для полиминеральных образцов представляет большие трудности. В лучшем случае можно определить преобладающий минерал и один-два минерала примеси.

Анализ кривых изменения веса (или термовесовой) заключается в определении потери веса образца в процессе нагревания путем автоматического взвешивания и регистрации весовых кривых. Форма кривых используется для диагностики некоторых глинистых минералов.

4.9. Рентгеновский метод основан на явлении дифракции рентгеновских лучей от кристаллического вещества. Параллельный пучок монохроматических лучей с определенной длиной волны направляется через центр рентгеновской камеры, где перпендикулярно лучу помещен столбик спрессованного порошка-образца. Основная часть лучей проходит через столбик без изменения и дает на фотопленке, расположенной по внутренней стороне камеры, первичное пятно. Часть рентгеновских лучей, проходя че-

рез робразец, отразится от плоских сеток тех кристаллов, которые располагаются к лучу под углом, удовлетворяющим уравнению Вульфа–Брегга. По рентгенограмме с помощью этого уравнения можно определить межплоскостные расстояния решеток кристаллов и интенсивность рефлексов, по которым определяются глинистые минералы. Рентгеновский метод дает точные результаты для однородных веществ или, в том случае, когда смесь содержит минералы, различных по своим структурным особенностям.

4.10. Кроме этих основных методов иногда применяются также электронно-графический метод, основанный на дифракции электронов от кристаллических решеток минералов, и метод инфракрасной спектроскопии, основанный на изучении спектра поглощения инфракрасных лучей света за счет колебаний атомов кристаллической решетки минералов.

МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ПЕСКОВ

4.11. Химические методы исследования отличаются большим разнообразием и широким применением в изучении грунтов. Они применяются для определения общего или валового содержания химических элементов в грунтах, содержания в них водно-растворимых веществ, слабоустойчивых соединений и т.д.

Валовой химический анализ включает четыре последовательные взаимосвязанные операции [30]:

вскрытие минерального вещества (т.е. перевод его в расплав или раствор) и разложение его на простые соединения;

маскирование или отделение мешающих элементов;

измерение аналитического сигнала;

вычисление содержания определяемого элемента.

Вскрытие минерального вещества осуществляется разными способами: обработкой кислотами, сплавлением или спеканием минерального вещества с другими химическими веществами, нагреванием минерального вещества в присутствии дополнительных химических реагентов. При анализе песков для определения кремнезема SiO_2 как основного химического элемента в большинстве случаев используют сплавление минерального вещества с карбонатами щелочных металлов [30]. Образующиеся при этом силикаты щелочных металлов разлагаются кислотами с выделением коллоидной кремнекислоты. Для полного выделения кремнекислота должна быть обезвожена, что достигается выпариванием с соляной кислотой и высушиванием остатка. Кремнекислота выделяется из раствора быстрее при добавлении желатина. Такой прием исключает необходимость предварительного полного удаления кислот, раствор выпаривают до влажных солей. Количество примесей в осадке кремнекислоты при этом меньше, чем при высушивании с одной соляной кислотой досуха.

Иногда применяются фотометрический метод определения SiO_2, основанный на измерении интенсивности окраски восстановленной формы кремнемолибденовой гетерополикислоты, и спектрофотометрический метод определения двуокиси кремния в виде желтой кремнемолибденовой гетерополикислоты из раствора, полученного в результате разложения навески породы фтористоводородной кислотой.

При анализе мономинеральных песков определение кремнезема может быть выполнено достаточно быстро и точно посредством прямой отгонки кремния в виде SiF_4 (ГОСТ 12642–80). Применение этого метода ограничивается, однако, теми случаями, когда анализируемый материал содержит небольшое количество примесей и силикатов щелочных металлов, полевых шпатов, слюд и т.п., так как наличие последних приводит к завышению содержания SiO_2. Если этих примесей немного, указанной ошибкой можно пренебречь.

4.12. Кремнезем SiO_2 является основным химическим компонентом песчаных грунтов. Все остальные химические компоненты, как правило, присутствуют в незначительных количествах. Из химических элементов, присутствующих в примесях, определяют различные формы соединений железа Fe, алюминий Al, титан Ti, марганец Mn, кальций Ca, магний Mg и некоторые другие.

Для определения этих элементов применяют гравиметрические, фотометрические и комплексоно-метрические методы.

4.13. Гравиметрические (весовые) методы определения содержания химических элементов заключаются в переведении исследуемых элементов в раствор или расплав и связывании этих элементов с другими химическими реагентами, в результате чего образуются устойчивые химические соединения, выпадающие в осадок, который после осаждения, выпаривания и других операций взвешивают.

4.14. Фотометрические методы количественного анализа основаны на переведении определяемого элемента в поглощающее свет соединение. Количество этого продукта реакции устанавливают по относительным величинам, характеризующим интенсивность светопоглощения. Характер и интенсивность светопоглощения связаны с электронным строением атомов и молекул, и прежде всего со строением валентных орбиталей. Молекула или ион обладают поглощением, если под действием излучения (фотонов) их электроны переходят из основного состояния в одно из возбужденных. Окраска или хромофорные свойства вещества могут быть обусловлены электронными переходами в ионе или атоме металла или в реагенте (лиганде), образующем с металлом комплексное соединение.

4.15. Комплексонометрическое титрование основано на образовании устойчивых комплексов определяемого элемента с титрантом. В качестве титранта принимают растворы органических реа-

гентов-комплексонов, отсюда и название метода — "комплексонометрия". Наиболее широко для титрования используют двунатриевую соль этилендиаминтетрауксусной кислоты или комплексон III (ЭДТА; трилон Б). Многие металлы образуют с комплексоном III внутрикомплексные соединения, замещая водород карбоксильных групп и образуя координационную связь с атомами азота.

4.16. Определение содержания гумуса в песках следует выполнять согласно ГОСТ 23740–79. При исследовании песков, не содержащих карбонаты, допускается определять количество органических включений методом прокаливания.

4.17. Кроме рассмотренных выше методов валового анализа существуют также методы вещественного (фазового, или рационального) анализа. В задачу вещественного анализа входит определение в составе песков отдельных соединений того или иного элемента.

В вещественном анализе грунтов используются: физические и физико-химические методы, применение которых основано на зависимости свойств грунтов или отдельных его компонентов от их вещественного состава; химические методы, основанные на избирательном действии растворителей по отношению к различным соединениям, слагающим грунты; расчетные методы, основанные на зависимости вещественного состава от содержания отдельных элементов.

4.18. Извлечение различных соединений из песков производят разнообразными по составу растворителями: водой, растворами солей, различными кислотами, комплексообразующими реагентами и др.

В частности, для характеристики засоленных песков и решения вопросов их мелиорации широко используется водная вытяжка из песков, содержащая легкорастворимые соли и частично соединения, обладающие средней растворимостью. В грунтах в природной обстановке легкорастворимые соединения частично могут находиться в составе поровой воды, частично — в составе твердых фаз песка.

В составе водной вытяжки, как правило, определяют общую сумму водно-растворимых веществ, количество минеральных водорастворимых соединений, щелочность.

Необходимо отметить, что состав водной вытяжки нельзя отождествлять с составом поровой воды. Более того, даже о составе и содержании легкорастворимых солей в песках водная вытяжка дает лишь условное представление, так как на состав вытяжек влияют проценты обмена между катионами легкорастворимых солей, перешедших в вытяжку, и обменными катионами, удерживаемыми на поверхности минералов.

5. ИЗУЧЕНИЕ СТРУКТУРЫ И ТЕКСТУРЫ ПЕСКОВ

ИЗУЧЕНИЕ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА И ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ ПЕСКОВ

5.1. Гранулометрический состав и гранулометрическая неоднородность являются важнейшей структурной характеристикой песков.

Установление численных значений гранулометрических показателей и, следовательно, гранулометрическое классифицирование песков возможны только после проведения гранулометрических анализов и определения фактического гранулометрического состава песка.

5.2. Под гранулометрическим составом песка понимается содержание в нем гранулометрических элементов (обломков пород, минеральных частиц), выраженное в процентах по весу воздушно-сухой навески отдельных размерных фракций.

Размерной фракцией называется совокупность гранулометрических элементов определенной крупности; последовательный ряд размерных фракций представляет собой гранулометрический спектр, а контролируемые размеры гранулометрических элементов называются гранулометрической шкалой. Отношение друг к другу смежных размеров в этой шкале называется ее модулем. Наиболее распространенной в грунтоведении и литологии является десятичная размерная гранулометрическая шкала с модулем $M = \sqrt[20]{10} = 1{,}26$. Эта шкала принята в строительной практике (ГОСТ 12636–67).

5.3. Для практических целей размеры гранулометрических элементов принято измерять в миллиметрах характеризуя их условный диаметр, ибо в общем случае морфологический облик обломков пород, песчаных зерен и пылевато-глинистых частиц, слагающих пески, отличен от шара. В исследовательских целях иногда оперируют понятием "эквивалентные диаметры", которые, по П.И.Фадееву, подразделяются на натуральный, средний проектированный, средний статистический, эквивалентный сферический и "стоксовский" [23].

5.4. Определение гранулометрического состава песка включает разделение слагающих его гранулометрических элементов на размерные фракции (классы крупности) и установление весового содержания каждой фракции, выражаемого в процентах к изучаемой навеске песка.

В исследовательских целях при изучении некоторых разновидностей песков проводится определение их микроагрегатного состава по ГОСТ 12636–67.

5.5. Основными задачами гранулометрического анализа песков являются: установление гранулометрического состава для классификационного определения песка, т.е. отнесения его к определенной категории крупности, сортированности и гранулометричес-

кой неоднородности; подготовка образца песка к определению его минерального, химического и биологического состава, морфологии зерен и песка в целом; изучение пленочных образований и других исследований, которые, как правило, требуют изучения отдельных размерных фракций; проведение специальных исследований для установления оптимальных смесей песчаных грунтов, изучения влияния отдельных фракций на некоторые свойства песков, а также в геолого-литологических целях для реконструкции условий образования, переноса, отложения и существования естественных и техногенных массивов песка.

5.6. Методика гранулометрического изучения песков определяется задачами исследований и структурными особенностями песков. Соответственно следует осуществлять различный подход к отбору образцов и подготовке их к лабораторному изучению, применять различные способы гранулометрического анализа и разную методику обработки получаемых данных, обеспечивающие в конечном итоге требуемый комплекс информации, необходимую точность, детальность и быстроту выполняемых определений.

5.7. Отбор образцов песка для гранулометрического анализа производится в соответствии с требованиями ГОСТ 12536–79, ГОСТ 12071–72, а также с учетом рекомендаций, изложенных в СНиП II-53-73, ГОСТ 12071–72 и в разд. 3 данных Рекомендаций.

5.8. Подготовка образцов песка к гранулометрическому анализу производится в соответствии с требованиями ГОСТ 12536–79 и заключается в удалении хемогенного компонента и органического вещества и в разделении изучаемой пробы на слагающие ее компоненты.

Последовательно выполняются следующие операции:

производится сортировка по засоренности путем опробования на карбонатность и на наличие легкорастворимых солей (по специальному заданию, устанавливаемому программой на инженерно-геологические изыскания);

образец песка просушивается до воздушно-сухого состояния;

отбирается средняя проба квартованием (особенно это необходимо при значительном объеме изучаемого песка);

производится разделение средней пробы песка на слагающие ее компоненты (гранулометрические элементы) одним из следующих способов: механической дезинтеграцией и дезагрегацией, дезинтеграцией с помощью химических веществ, обработкой пробы песка ультразвуком [25, 33].

При массовых анализах наиболее широко используется метод механической дезинтеграции и дезагрегации, заключающийся в разрушении агрегатов высушенного песка растиранием их пальцами или резиновым пестиком в фарфоровой чашке, иногда в дистиллированной воде.

При изучении сцементированных песков (не песчаников) применяют кипячение (до 1–2 ч), иногда в автоклаве, в присутствии

щелочи, перекиси водорода, соляной, уксусной или других кислот. После кипячения снова производят растирание образца вручную или с помощью электромешалки.

Дезинтеграция песка с помощью химических веществ производится при наличии значительного количества хемогенных компонентов и органики. Для их удаления применяют эфир, ацетон, бензин, причем часто используются противокоагуляционные стабилизаторы (наиболее распространенный из них – пирофосфат натрия, вводимый от 5 до 10 $см^3$ на 1 л суспензии), предварительный отмыв солей [25].

Метод ультразвуковой дезинтеграции следует считать перспективным; пока он еще не получил широкого применения.

Следует подчеркнуть важность подготовки образцов песка к гранулометрическому анализу. Несоблюдение соответствующих требований ГОСТ может привести иногда к искажению результатов. В ряде случаев выбор методики подготовки образца требует специальных исследований (например, при изучении песков со значительным содержанием ракушечного детрита или при подготовке образца к морфологическим исследованиям и изучению пленочных образований). Во всех этих случаях исследования проводятся по специальной программе.

5.9. Основными методами гранулометрического анализа песков являются ситовой и седиментометрические.

Ситовой метод является основным для песчаных грунтов и носит самостоятельный характер для песков, не содержащих частиц менее 0,1 мм, и в тех случаях, когда при сокращенном гранулометрическом анализе не требуется разделения фракций размером менее 0,1 мм. Сущность и технология применения этого метода (без промывки и с промывкой водой) хорошо известны. Следует лишь обратить внимание на недостатки ситового метода, требующие регулярного контроля за качеством сит и проведения в необходимых случаях контрольных опытов: быстрый износ сит с латунной сеткой при массовых анализах; непостоянство размеров ячеек проволочных сит; влияние на получаемые результаты формы зерен и продолжительности рассеивания; возможность раздробления отдельных обломков и зерен в песках некварцевого состава.

Седиментометрические методы, основанные на различии в скорости падения в воде частиц разной крупности, применяются обычно в тонкозернистых песках (ГОСТ 12536–79 рекомендует их для изучения только пылеватых песков), однако при специальных исследованиях и с целью контрольных определений эти методы целесообразно применять в песках практически любой крупности, даже в гравелистых, если содержание фракций размером менее 0,1 мм превышает 5–10% (такие случаи довольно часты). Обеспечение детальности выделения тонкодисперсных фракций необходимо как для идентификации разновидностей песков, так и для оценки влияния содержания этих фракций на свойства песков.

Седиментометрические методы всегда применяются при изучении песков в комбинации с ситовым методом. Известно несколько модификаций седиментометрических методов [31] ; наиболее широко применяются (и рекомендуются ГОСТ 12536–79) ареометрический метод (заключающийся в измерении плотности суспензии ареометром в процессе ее отстаивания) и пипеточный метод (заключающийся в выделении отдельных фракций по скорости падения частиц в спокойной жидкости). Сущность этих методов, используемая аппаратура, технология подготовки к испытанию, проведение испытания и обработка получаемых результатов подробно рассмотрены в соответствующих нормативно-методических документах (ГОСТ 12536–79, ВСН 43-71 и др.).

5.10. Для обеспечения объективной интерпретации результатов гранулометрического анализа песчаных грунтов следует соблюдать определенные правила обработки и оформления опытных данных.

Как правило, в строительной практике используется табличная форма представления результатов анализа с приведением содержания отдельных выделенных фракций. Иногда в таблице приводится осредненный состав изученных песков. Опыт соответствующих исследований показывает, что в ряде случаев целесообразно приводить в таблицах граничные значения грансостава (наиболее крупный и наиболее мелкий песок из группы изученных разновидностей одного номенклатурного вида) и указывать в специальных графах содержание частиц размерами менее 0,25 и 0,1 мм, а также выделять содержание крупнообломочной, песчаной, пылеватой и глинистой фракций.

Такое представление фактического материала облегчает его анализ с точки зрения оценки однородности песков, выделения характерных разновидностей и последующей интерпретации результатов других видов исследований песка.

При изучении песков в исследовательских целях полезно характеризовать распределение гранулометрических элементов песка статистическими параметрами (модой, медианой, коэффициентом сортировки, коэффициентом асимметрии и др.) [25]. Это позволяет более полно и точно охарактеризовать гранулометрические особенности песков (особенно при сопоставлении многих разновидностей) и широко использовать возможности ЭВМ.

5.11. Графическое изображение результатов гранулометрического анализа в строительной практике обычно сводится к построению куммулятивных кривых – графиков грансостава (рис. 21,*а*). Такие графики необходимы для определения контролируемых значений диаметров частиц, по которым рассчитываются параметры гранулометрической неоднородности, а также для выделения характерных граничных кривых грансостава, устанавливаемых, например, техническими условиями на возведение намывных сооружений (ВСН 43-71). Вместе с тем для исследовательских целей следует рекомендовать также построение гисто-

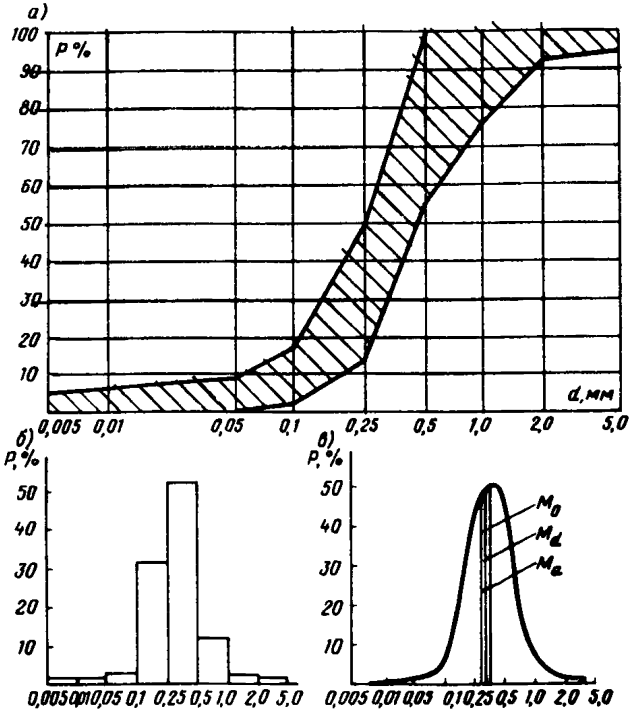


Рис.21. Способы изображения результатов гранулометрического состава песков

а – кумулятивные кривые (приведены граничные значения для грансостава песков средней крупности различного генезиса, возраста и регионов Союза ССР); *б* – гистограмма; *в* – кривая распределения для намывных песков средней крупности Рижской ГЭС; M_0 – мода; M – медиана; M_a – средние диаметр

грамм (рис.21,*б*), кривых распределения (рис.21,*в*).

5.12. Важнейшим элементом обработки данных гранулометрического анализа является определение количественных значений гранулометрических параметров, необходимых для характеристики и классификации песков по степени дисперсности, сортированности и гранулометрической неоднородности (см. пп. 2.20–2.22 и табл.1–3). Такая обработка данных на практике часто не производится или производится не в полном объеме – с использованием только показателя $U = \frac{d_{60}}{d_{10}}$, что, естественно, снижает информативность выполненного анализа и не позволяет вскрыть специфические особенности гранулометрического состава изучаемых разновидностей песков, влияющих на их строительные свойства.

ИЗУЧЕНИЕ МОРФОЛОГИИ ЗЕРЕН И МОРФОЛОГИИ ПЕСКОВ

5.13. Морфологический облик песков, представляющий собой особенности формы и поверхности слагающих их гранулометрических элементов, является важнейшим структурным, генетически унаследованным признаком (см. пп. 2.18, 2.23, 2.47).

5.14. Под морфологическими исследованиями песков обычно понимают изучение морфологии песчаных зерен. Морфологическое изучение крупнообломочных и пылевато-глинистых фракций проводится в редких случаях.

5.15. Морфологические исследования включают морфометрию – изучение формы зерен и морфоскопию – изучение характера их поверхности.

С целью повышения информативности морфологических исследований необходимо:

выполнять и морфологическое и морфоскопическое изучение зерен песков;

оценивать морфологические особенности изучаемой разновидности песка в целом с учетом фактического содержания в нем всех песчаных фракций, каждая из которых обычно характеризуется индивидуальным морфологическим обликом;

применять комплекс методов морфологического изучения песков, указанный в пп. 5.18–5.20. При этом в производственных целях допускается ограничиваться использованием экспресс-метода общей оценки морфологии песков согласно указаниям п. 5.20 данных Рекомендаций.

5.16. В общем случае задачами рассматриваемых исследований являются: характеристика песков по морфологии как по одному из существенных структурных признаков; установление связи морфологического облика песка с его генезисом и составом; прогноз влияния морфологических особенностей песков на их строительные свойства; правильная интерпретация данных испытаний песков различными полевыми и лабораторными методами.

5.17. Подготовка образца песка к морфологическим исследованиям включает следующие операции:

дезинтеграцию и дезагрегацию образца. В необходимых случаях обеспечивается также удаление пленочных образований с зерен, которые меняют его морфологический облик и, в частности, результаты морфологических исследований (например, для растворения железистых пленок применяют обработку зерен песка щавелевой кислотой в присутствии металлического алюминия);

подсушивание образца песка и разделение его на фракции. При этом следует иметь в виду, что оптимальными размерами зерен для детальных морфологических исследований являются фракции от 0,5 до 0,1 мм.

5.18. Морфологическое изучение песков включает оценку

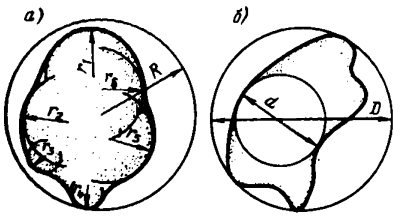


Рис.22. Схема определения показателей морфологии зерен

а – коэффициента округленности $\alpha = \frac{\sum_{i=1}^{n} r_i / R_i}{n}$;

б – коэффициента сферичности $\beta = \sqrt{\frac{d}{D}}$ (D, R – диаметр и радиус описанного круга; d – диаметр вписанного круга; $r_1 - r_5$ – радиусы кривизны углов зерен; n – число измерений)

округленности и сферичности зерен. При этом используются следующие методы.

Методы непосредственного измерения зерен для определения двух коэффициентов: коэффициента округленности α и коэффициента сферичности β. Первый представляет собой меру степени сглаженности выступов на контуре зерна, второй – меру приближения формы реального зерна к сфере того же объема (рис.22). Определение радиусов закруглений на контуре зерна и контролируемых диаметров производится непосредственно под микроскопом или по зарисовкам единичных зерен. Это представляет значительные трудности и практически позволяет выполнить изучение весьма ограниченного числа зерен. Определенным недостатком следует считать выполнение измерений в одной плоскости.

Визуальный метод для приближенной и ускоренной оценки формы зерен по специальному трафарету (рис.23). Этот трафарет позволяет условно выделить сферичные и несферичные зерна и оценить округленность зерен в значениях коэффициентов α и β.

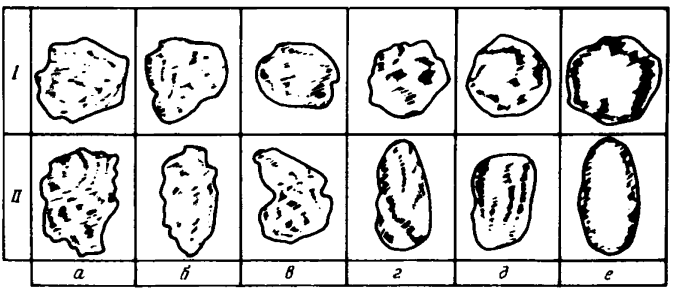


Рис.23. Трафарет Пауэрса для визуальной оценки округленности песчаных зерен, выраженный в значениях коэффициента Ваделла (α)

I – сферичные и *II* – несферичные зерна. Классы округленности; *а* – весьма угловатые, $\alpha = 0{,}12 \div 0{,}17$; *б* – угловатые, $\alpha = 0{,}17 \div 0{,}25$; *в* – почти угловатые, $\alpha = 0{,}25 \div 0{,}35$; *г* – почти окатанные, $\alpha = 0{,}35 \div 0{,}5$; *д* – окатанные, $\alpha = 0{,}5 \div 0{,}7$; *е* – весьма окатанные, $\alpha = 0{,}7 \div 1{,}0$

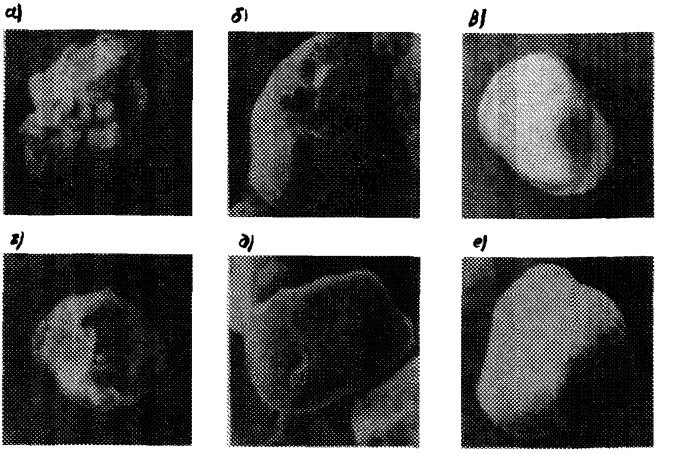


Рис.24. Электронно-микроскопические фотографии зерен песков различной округленности ($\alpha = 0{,}19 \div 0{,}45$) и сферичности ($\beta = 0{,}74 \div 0{,}85$) при увеличении в 300 раз (фракция 0,1–0,25 мм)

а – рефтинские ($e\,Q_4$) и *г* – чигиринские ($a\,Q_4$) – угловатые ($\alpha = 0{,}19 \div 0{,}25$); *б* – рижские ($fg\,Q_2$) и *д* – капчагайские ($eo\,Q_4$) – незначительно угловатые ($\alpha = 0{,}25 \div 0{,}35$); *в* – нерингские, ($eo - m\,Q_4$) и *е* – сургутские ($a\,Q_4$) – слабокатанные ($\alpha = 0{,}38 \div 0{,}45$); *а, б, в* – несферичные ($\beta < 0{,}8$); *г, д, е* – малосферичные ($\beta > 0{,}8$)

При изучении совокупности зерен в образце значение коэффициента округленности определяется по формуле

$$\alpha = \frac{n_1 a + n_2 б + n_3 в + n_4 г + n_5 д + n_6 е}{\sum_1^m n_i}$$

где n_i – число зерен соответствующего класса округленности; а, б, в, г, д, е – средние значения α_i, соответствующие классу округленности и принимаемые по таблице, приведенной на рис.23.

Характерные виды зерен песков разной округленности и сферичности приведены на рис.24.

Для комплексной количественной оценки округленности и сферичности зерен В.А.Мелентьевым рекомендовано определять показатель, названный им коэффициентом формы зерен $K_ф = \alpha\beta$. В строительной практике этот показатель почти не применяется в связи с условностью его физического смысла и отсутствием классификационного подразделения песков по величине $K_ф$. Не устраняет этот показатель и недостатка одноплоскостного измерения формы зерен.

Чувствительность указанных морфологических параметров к различиям в форме зерен характеризуется следующими средними значениями показателей изменчивости: K_{α}, K_{β}, $K_{\kappa_{\varphi}}$, равными отношению максимальных и минимальных величин α, β, K_{φ}: $K_{\alpha} \approx 2{,}8$; $K_{\beta} \approx 1{,}2$; $K_{\kappa_{\varphi}} = 3{,}1$.

К перспективным, но недостаточно разработанным и не нашедшим широкого применения следует отнести методы механического разделения песчаных зерен по форме, позволяющие не только снизить трудоемкость выполняемого анализа, но, и главное, изучать большие совокупности песчаных зерен и перейти от одноплоскостной к трехмерной оценке формы зерен.

На основной идее подобных методов базируется экспресс-метод комплексного морфологического изучения песков, изложенный в п. 5.20 данных Рекомендаций.

5.19. Морфоскопические исследования песков заключаются в изучении поверхности отдельных песчаных зерен под микроскопом. При работе с обычными микроскопами удается лишь весьма ориентировочно оценить разную степень шероховатости их поверхности и выделить бо́льшую или меньшую степень шероховатости. По существу необходимая детальность этой оценки стала возможной с появлением электронных микроскопов, обеспечивающих значительные (в сотни и тысячи раз) увеличения и особенно после освоения электронных сканирующих микроскопов.

Для инженерно-геологических целей необходима количественная оценка характера поверхности зерен, без которой невозможно установление влияния этого фактора на строительные свойства песков. На данном этапе изученности данного вопроса могут быть рекомендованы следующие параметры шероховатости, регламентированные ГОСТ 2789–73 для изучения поверхностей металлов в машиностроении: среднеарифметическое отклонение профиля R_a, среднеквадратичное отклонение профиля R_q и максимальная высота неровностей R_z. Для классификации поверхностей зерен песков по степени шероховатости допускается использовать следующий критерий поверхности:

$$R' = \frac{R_z}{R_a R_q}.$$

Характерные виды поверхности зерен песков приведены на рис.25. Классификация морфологических видов и разновидностей зерен песков дана в табл.11.

5.20. Рассмотренные выше методы морфологических и морфоскопических исследований для определения округленности, сферичности и характера поверхности отдельных зерен следует признать весьма трудоемкими и часто недоступными для массового использования в строительной практике, не дающими комплексную оценку морфологии зерен (форма + характер поверхности), а также не обеспечивающими морфологическую характе-

Таблица 11

Элементы морфологии	Оцениваемый параметр	Критерий	Виды зерен	Разновидности зерен	Пределы изменения критериев
Форма	Округленность	Коэффициент округленности α	Угловатые	Весьма угловатые	0–0,15
				Угловатые	0,15–0,25
				Незначительно угловатые	0,25–0,35
			Окатанные	Слабоокатанные	0,35–0,5
				Окатанные	0,5–0,7
				Весьма окатанные	0,7–1,0
	Сферичность	Коэффициент сферичности β	Несферичные	Анизометричные	0–0,4
				Весьма несферичные	0,4–0,6
				Несферичные	0,6–0,8
			Сферичные	Малосферичные	0,8–0,9
				Сферичные	0,9–0,95
				Идеально сферичные	0,95–1,0
Характер поверхности	Шероховатость	Критерий поверхности R' или визуально	Весьма шероховатые	Кавернозные	$R' < 5$
				Чешуйчатые	
			Шероховатые	Ступенчатые	$5 \leqslant R' < 6$
				Бугристые	
			Слабошероховатые	Крупноямчатые	$6 \leqslant R' \leqslant 8$
				Мелкоямчатые	
			Гладкие	Грубополированные	$R' > 8$
				Тонкополированные	
Общая морфология	Обработанность	Показатель морфологии λ	Необработанные	Весьма необработанные	0–0,25
				Необработанные	0,25–0,3
				Почти необработанные	0,3–0,4
			Обработанные	Слабообработанные	0,4–0,5
				Обработанные	0,5–0,7
				Весьма обработанные	0,7–1,0

ристику песков в целом как грунта определенного гранулометрического и минерального состава. Этих недостатков лишен экспресс-метод, разработанный А.Д.Потаповым [18], использовавшим идею механического разделения гранулометрических элементов разной морфологии.

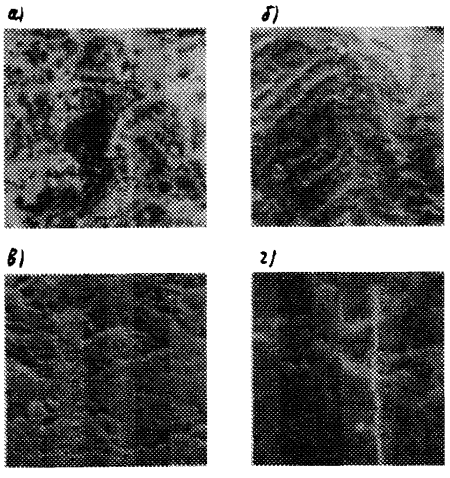


Рис.25. Электронно-микроскопические фотографии зерен песков фракции 0,1–0,25 мм с различным характером поверхности при увеличении в 3000 раз

а – камчатские (βQ_4) весьма шероховатые, кавернозные ($R_\alpha = 2{,}96$; $R_Q = 3{,}51$; $R_\chi = 21{,}11$; $R' = 2{,}04$); *б* – рижские ($fg\ Q_2$) – шероховатые, мелкоямчатые ($R_\alpha = 1{,}76$; $R_Q = 2{,}06$; $R_\chi = 20$; $R' = 5{,}52$); *в* – новолипецкие (αQ_4) – шероховатые, грубополированные ($R_\alpha = 1{,}49$; $R_Q = 1{,}87$; $R_\chi = 19{,}4$; $R' = 6{,}97$); *г* – калининские (αQ_4) – гладкие, тонкополированные ($R_\alpha = 1{,}30$; $R_Q = 1{,}51$; $R_\chi = 16{,}0$; $R' = 18{,}4$)

Сущность метода заключается в измерении времени истечени из отверстия воронки постоянной навески песчаных фракций Время истечения при прочих равных условиях зависит от обще морфологии зерен. Для проведения анализа используется стек лянная лабораторная воронка (рис.26).

Определение обобщенного показателя морфологии зерен пес ка λ при постоянной навеске 150 г производится по формуле

$$\lambda = \frac{29{,}5}{t\left(\frac{1-5d}{d}\right)^{0{,}25} 0{,}01 \sum_1^n \gamma_{S_i} n_i},$$

где t – среднее время истечения навески изучаемой фракции песка; с; d – медианный диаметр зерен изучаемой фракции песка, см; γ_S – плот ность зерен, г/см^3; n_i – содержание зерен данной плотности, %.

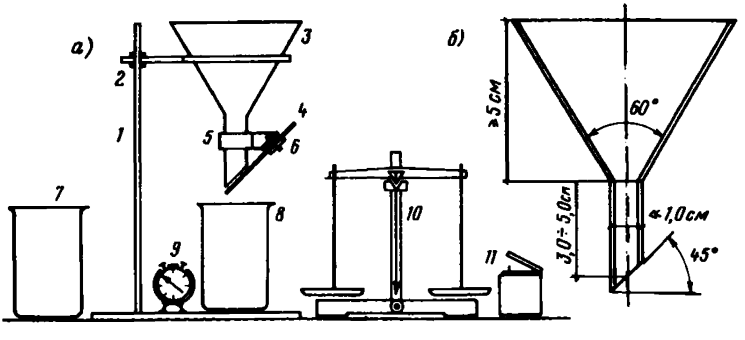


Рис.26. Схема прибора для определения показателя морфологии зерен песка

а – комплект прибора; *б* – конструкция воронки; *1* – штатив; *2* – держатель воронки; *3* – стеклянная воронка; *4* – задвижка; *5* – обойма-держатель задвижки; *6* – ось задвижки; *7* – стакан для отсыпки навески; *8* – приемный стакан; *9* – секундомер; *10* – технические весы; *11* – разновесы

При постоянной плотности зерен песка $\rho_s = 2{,}66$ г/см^3 формула принимает вид

$$\lambda = \frac{11}{t\left(\frac{1-5\alpha}{\alpha}\right)^{0,25}}.$$

Расчет среднего значения показателя морфологии для песка в целом (для всех изучаемых песчаных фракций при условии равенства их плотностей) выполняется по следующей формуле:

$$\lambda_{ср} = \frac{\sum_{1}^{n} \lambda_\alpha P_\alpha}{\sum_{1}^{n} P_\alpha},$$

где λ_α – показатель морфологии зерен определенной фракции; P_α – процентное содержание этой фракции по данным гранулометрического анализа.

На данном этапе разработки указанного метода определение λ возможно только для чистых песков с малым содержанием крупнообломочной и пылевато-глинистой фракций. Поэтому наименование песка по морфологии, приведенное в табл.11 и 12, дается только по данным изучения песчаных фракций.

5.21. По морфологическим признакам для практических целей следует выделять две группы песков по степени обработанности всех песчаных фракций, четыре подгруппы – по характеру окатанности и сферичности зерен преобладающей фракции и четыре вида – по степени шероховатости их поверхности. Классификация песков по морфологии, составленная на основе комплекса морфологических параметров, приведена в табл.12.

Таблица 12

Группа	Подгруппа	Вид
I. Необработанные $\lambda \leqslant 0{,}4$	Угловато-несферичные $\alpha \leqslant 0{,}35$; $\beta \leqslant 0{,}8$	Весьма шероховатые $R' < 5$
	Угловато-сферичные $\alpha \leqslant 0{,}35$; $\beta > 0{,}8$	Шероховатые $R' = 5 \div 6$
II. Обработанные $\lambda > 0{,}4$	Окатанно-несферичные $\alpha > 0{,}35$; $\beta \leqslant 0{,}8$	Слабошероховатые $R' = 6 \div 7$
	Окатанно-сферичные $\alpha > 0{,}35$; $\beta > 0{,}8$	Гладкие $R' > 7$

Морфологический вид песка допускается устанавливать по визуальным наблюдениям зерен под бинокулярным микроскопом или по фотографиям поверхности зерен на электронном сканирующем микроскопе.

5.22. Для объективной морфологической характеристики песков необходимо изучение каждой песчаной фракции, что связано

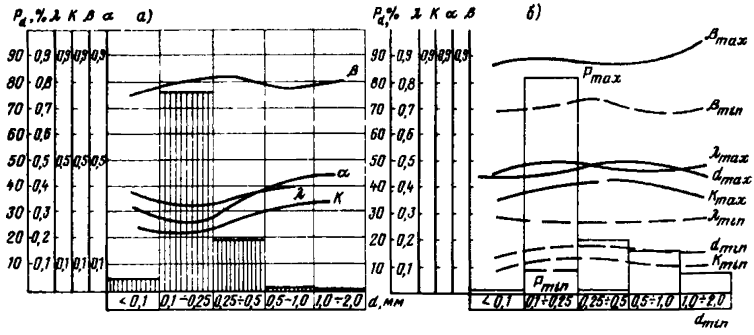


Рис.27. Изменения абсолютных значений морфологических параметров зерен песков по отдельным песчаным фракциям, совмещенные с гистограммой гранулометрического состава

а – пески мелкие, $a\,Q_4$, Чигиринская ГРЭС; *б* – диапазон изменения указанных параметров для 20 песков различного генезиса, крупности, отобранных в разных регионах СССР и изученных А.Д.Потаповым

с различной обработанностью и нередко с различиями в минеральном составе, следовательно, с разными плотностями отдельных фракций. Характер изменения морфологических параметров α, β, $K_ф$ по отдельным фракциям показан на рис.27.

5.23. Учитывая сложность и трудоемкость определения морфологических параметров α, β, R_a, R_q, R_z, целесообразно устанавливать их лишь в специальных исследовательских целях или в порядке контрольных измерений единичных зерен. При необходимости ориентировочное определение этих параметров может быть выполнено по зависимости, приведенной на рис.28.

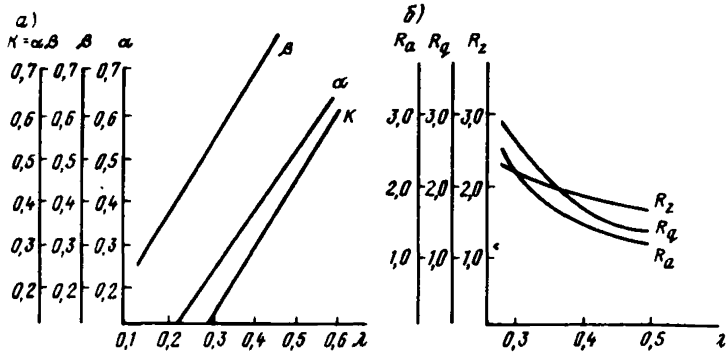


Рис.28. Зависимости параметров зерен песков различного генезиса и состава от обобщенного показателя морфологии λ (по А.Д.Потапову)

а – морфологических; *б* – морфоскопических

ИЗУЧЕНИЕ СТРУКТУРНЫХ СВЯЗЕЙ В ПЕСКАХ

5.24. Структурные связи являются важнейшим структурным элементом песков и существенно влияют на их динамическую устойчивость, прочностные и деформационные свойства.

Эффективность проявления структурных связей наиболее ярко выражается при сопротивлении песков (в образце или в массиве) разрушению под действием каких-либо внешних или внутренних сил, приводящих к частичному или полному разрушению структурных связей.

Поскольку в общем случае сопротивляемость песков разрушению обусловливается проявлением комплекса особенностей их состава, строения, состояния и свойств, то выделить отдельно роль структурных связей – задача достаточно сложная.

5.25. Основными направлениями изучения структурных связей в песках являются: исследование их физико-химической природы; установление закономерностей формирования структурных связей в разных условиях и под влиянием различных факторов; определение численного значения показателя, характеризующего энергетический уровень структурных связей; оценка характера работы структурных связей при различных видах внешних воздействий (статических, динамических, фильтрационных и др.) и при разном физическом состоянии песков; определение возможного снижения прочности структурных связей при разной степени их нарушения. Все эти исследования в конечном счете проводятся для установления влияния структурных связей на строительные свойства песков.

5.26. Во многих случаях в песках имеются все типы структурных связей, указанные в п. 2.24, поэтому в общем случае эффект их действия необходимо оценивать комплексно. В некоторых случаях задача может сводиться к изучению одного или двух типов связей. Например, при изучении песков нарушенного сложения обычно оцениваются морфологические связи зацепления между зернами или совместное действие морфологических и капиллярных связей; при изучении песков в естественном залегании или при режимных наблюдениях за намытыми (отсыпанными) песками важно выявить наличие и степень развития цементационных связей (сцепления упрочнения), а также характер изменения прочности песков при частичном или полном нарушении этих связей.

5.27. Разные цели и задачи изучения структурных связей определяют различия в методике и в применяемых методах исследований, в том числе уникальных методов, применяемых в экспериментальных исследовательских целях (описанных в работах Н.Я.Денисова и Б.Ф.Рельтова, И.М.Горьковой и Н.А.Платова и других авторов). Для производственных целей следует применять три группы методов: визуальные, лабораторные и полевые.

5.28. Визуальные методы включают: осмотр и фотографирова-

ние образцов, естественных обнажений или поверхности массива песка; оценку связности и сцементированности песка по сопротивлению раздавливанию пальцами агрегированного образца в маловлажном, часто в воздушно-сухом состоянии; проведение наблюдении за характером обрушения или выдавливания призмы песка. Все эти методы дают качественную характеристику наличия, вида и степени развития структурных связей. Тем не менее ими не следует пренебрегать, так как результаты таких визуальных наблюдений могут явиться основой для предварительной оценки структурной прочности песков и для включения в программу изысканий задач количественной оценки структурных связей лабораторными полевыми методами.

5.29. Лабораторные методы подразделяются на опробование песков микропенетрацией, раздавливание столбчатых образцов песка накладными грузами, ультразвуковое просвечивание образцов и испытания песков на сдвиг.

Метод микропенетрационных исследований подробно изложен в известных работах В.Ф.Разоренова; принципиальные положения раздавливания приведены в указаниях по особенностям инженерно-геологических изысканий и проектирования оснований на элювиальных грунтах; метод ультразвукового просвечивания находится в стадии разработки. К достоинствам этих методов следует отнести простоту и, главное, удобство применения для проведения различных режимных наблюдений за процессами упрочнения и разупрочнения песков при взаимодействии их, например, с разными промстоками и водно-химическими агентами. Недостатком этих методов является косвенная оценка силы структурных связей, которая может использоваться лишь при сопоставительных анализах; для точной оценки необходимо устанавливать корреляционные зависимости соответствующих показателей с величиной сцепления в песке, определяемой прямым методом испытания его на сдвиг (к прямым методам определения величины сцепления в песках, обусловленного действием структурных связей, можно отнести также испытание образца песка на разрыв, однако методика такого испытания еще не является достаточно разработанной).

Сущность и особенности метода испытания песков на сдвиг изложены в разд.8 данных Рекомендаций. Этот вид испытания позволяет непосредственно выделить и оценить величину сцепления в песках как один из параметров общего сопротивления их сдвигающему усилию. На данном этапе развития грунтоведения этот метод следует признать основным для прямого определения величины сцепления C. Однако следует учитывать его реальные возможности, связанные с зависимостью получаемых результатов от конструктивных особенностей используемых приборов и методики проведения опытов, а главное – от трудности, чаще невозможности, полностью сохранить природное строение, особенно все структурные связи в образце песка от момента его отбора до

испытания. Именно поэтому результаты лабораторных исследований (в любых модификациях: одноплоскостной срез, трехосные испытания, испытания на разрыв, методом перекашивания призм и др.) дают, как правило, заниженные данные о величине сцепления в песках, находящиеся в противоречии с результатами испытания их полевыми методами.

5.30. К полевым методам изучения структурных связей следует отнести практически все полевые методы изучения механических свойств песков, прежде всего методы изучения их прочности.

К условно-прямым методам можно отнести: сдвиг целиков по заданной плоскости; сдвиг целиков обрушением, выдавливанием и раздавливанием призм; сдвиг по заданной поверхности лопастными приборами в скважинах; сдвиг штампа по грунту.

К косвенным методам относятся испытания песков статическим и динамическим зондированием, а также пенетрационно-каротажным методом, сейсмоакустические методы геофизической разведки. Определенную косвенную информацию о структурных связях могут давать испытания песков штампами и взрывным зондированием. Эффективность использования всех полевых методов значительно повышается при их комплексном применении. Сущность и особенности перечисленных методов подробно изложены во многих нормативно-методических документах и научно-технических работах; ряд из них рассмотрен в разд.7 и 8 данных Рекомендаций.

5.31. Основные особенности исследований заключаются в следующем.

Изучение капиллярной связности следует проводить в свежеотсыпанных песках в диапазоне изменения влажности от гигроскопической до максимальной молекулярной влагоемкости (иногда до оптимальной влажности) при различных состояниях песка по относительной плотности и минимальном напряженном состоянии, не приводящем к мобилизации морфологических связей.

Изучение морфологических связей следует проводить в свежеотсыпанных песках, находящихся в воздушно-сухом состоянии при различной плотности сложения (в диапазоне I_d от 0,3 до 0,7–0,8) и при различном напряженном состоянии (в диапазоне от 0,1–0,2 до 0,3–0,5 МПа, при специальных исследованиях – до 1–10 МПа). При этом для установления разной мобилизации эффекта притирки зерен целесообразно применять разные способы укладки песка в сдвиговый прибор или в опытный лоток (фильтрационное уплотнение, трамбование, вибрация и др.).

Изучение цементационных связей требует проведения испытаний в два этапа: на первом испытывается образец природного сложения с ненарушенными структурными связями при естественной плотности-влажности и напряженном состоянии; на втором – тот же образец в нарушенном сложении (после дезагрегации и дезинтеграции), но при тех же значениях плотности-влаж-

ности, напряженного состояния. Сопоставляя результаты этих испытаний, нетрудно выделить величину сцепления упрочнения. Для оценки водостойкости структурных связей параллельные опыты на образцах песка ненарушенного сложения проводятся при разном времени выдерживания их в водонасыщенном состоянии.

5.32. Для оценки структурных связей следует использовать систему прямых и комплексных показателей.

К прямым относятся параметр прочности C и коэффициент изменчивости сцепления при водонасыщении K_w^c, необходимый для выделения категории водостойких структурных связей.

Косвенными показателями структурных связей являются: показатель упрочненности $П_у = \frac{P_{д.ненаруш}}{P_{д.наруш}}$ и показатель структурности $П_с = \frac{P_д}{P_д}$, используемые, согласно п. 2.24, для установления категории упрочненности песков;

величина структурной прочности $P_{стр}$ и величина упругой части деформации песков при испытании их статической нагрузкой на штамп (см. разд.7 данных Рекомендаций);

соотношение величин относительных осадок поверхности песков при взрывном зондировании и соотношение величин условного динамического сопротивления $P_д$ до и после испытания песков зондированием (п. 2.39);

данные тарирования забивных зондов в разновременно намытых песках (или в намытых песках при их режимных исследованиях), анализируемые по изменению величины $P_д$ при равных значениях плотности скелета [8].

5.33. При постановке изыскательских и исследовательских работ необходимо учитывать актуальность вопроса дальнейшего совершенствования и разработки новых методик и методов изучения и количественной характеристики структурных связей в песчаных грунтах, а также развития методов расчетов естественных оснований и земляных сооружений с учетом этой важнейшей структурной особенности песков.

ИЗУЧЕНИЕ ОБЩИХ ТЕКСТУРНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ПЕСКОВ

5.34. Изучение текстуры песков следует проводить, базируясь на общих положениях, изложенных в п. 2.25 данных Рекомендаций.

5.35. Для целей генетического и фациально-палеографического анализа, как правило, следует использовать представления о макротекстурных особенностях песков, выражающихся в различном характере слоистости. При этом выделяют разные виды текстур: горизонтально-слоистую, волнистую, косослоистую и др. (рис. 29,*а*). В исследовательских работах целесообразно обращать вни-

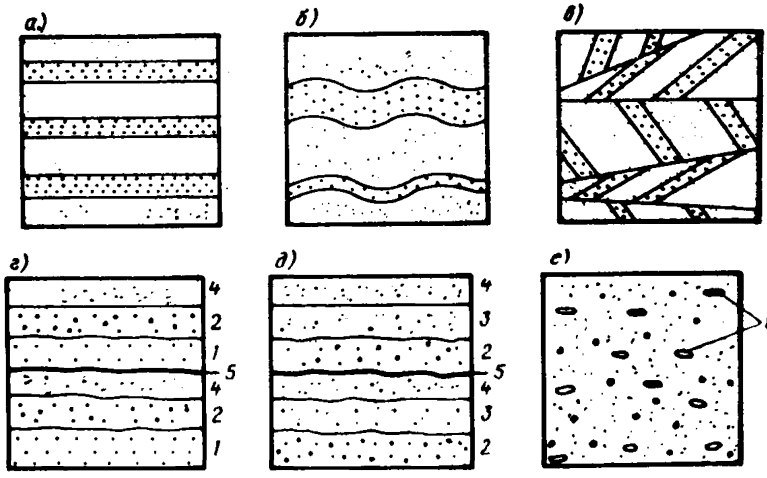


Рис.29. Виды текстуры песков по Е.Г.Чаповскому *(а, б, в)* и по И.Я.Русинову *(г, д, е* – для намытых песков)

а – горизонтально-слоистая: *б* – волнистая; *в* – косослоистая; *г* – слоисто-грядовая ($\eta_{отн} = \frac{\gamma_d}{\gamma_{d\,станд}} = 0{,}977$; $E_{отн} = \frac{E}{E_{станд}} = 0{,}925$); *д* – микрослоистая ($\eta_{отн} = 0{,}93$; $E_{отн} = 0{,}68$); *е* – смятая ($\eta_{отн} = 0{,}941$; $E_{отн} = 0{,}345$); *1* – слой крупных частиц, *2* – слой частиц разной крупности; *3* – то же, с бóльшим содержанием мелких частиц; *4* – слой мелких частиц; *5* – уплотненная размывом поверхность слоя мелких частиц, образующая плоскость раздела; *6* – микрополости

мание на микротекстурные особенности песков, под которыми обычно понимается ориентировка их зерен, позволяющая судить, например, о направлении течений, сформировавших данные песчаные отложения.

5.36. Некоторые виды текстур могут обусловливать анизотропию свойств песков чаще по двум, а иногда по трем направлениям.

Общая анизотропия песчаного массива определяется характером и размерами текстурных элементов и их распределением в изучаемом объеме.

5.37. При инженерно-геологических изысканиях и исследованиях необходимо особое внимание уделять грунтоведческим аспектам изучения текстуры, включающим оценку влияния текстуры песков на их физико-механические и водные свойства.

Во многих случаях текстурные особенности песков определяют их фильтрационную и прочностную анизотропию, влияют на результаты зондировочных и других испытаний песков полевыми методами. О степени влияния различного вида текстур намывных песков на их физико-механические свойства дают представление данные И.Я.Русинова, приведенные на рис.29.

5.38. Согласно п. 2.25, для практических целей следует разли-

чать три вида текстур: однородную, слоистую и микрослоистую. Критериями для их выделения могут служить коэффициент относительной мощности слойков ($K_H = \frac{h}{H}$, где H – мощность рассматриваемого слоя; h – толщина отдельного слойка) и коэффициент относительной протяженности слойка ($K_L = \frac{l}{L}$, где L – протяженность рассматриваемого условно-однородного слоя, l – длина единичных слойков).

5.39. Изучение текстурных особенностей песков проводится в два этапа.

Первый включает фотографирование, зарисовку, описание и замеры отдельных элементов текстуры (мощности и протяженности слойков, в необходимых случаях – углов наклона и характера взаиморасположения их), а также вычисление коэффициентов K_H и K_L. В исследовательских целях дополнительно фиксируется ориентировка зерен, что необходимо главным образом в тех случаях, когда зерна песка имеют удлиненную форму. Для этого могут применяться фотографирование, зарисовка или наклеивание зерен на пластырь с последующим изучением своеобразного слепка под микроскопом. На основании первичного этапа изучения текстуры песка дается ее качественная характеристика, устанавливается категория строения песка по виду текстуры (см. табл.3) и дается ориентировочный прогноз возможного влияния данной текстуры на свойства песка.

Второй этап включает проведение лабораторных и полевых испытаний песков для количественной оценки степени влияния текстуры на определенные свойства песков. С этой целью образец или песок в изучаемом массиве исследуется различными методами (микропенетрацией, сдвигами, статической нагрузкой, фильтрационным опробованием и т.д.), причем в разных направлениях, ориентированных относительно выделенных текстурных элементов.

5.40. Учет текстурной анизотропии песков необходим при анализе и интерпретации данных изучения их как лабораторными, так и полевыми методами, в частности при сопоставлении данных прессиометрических и штамповых испытаний, испытаний на сдвиг в различных модификациях этого метода, при фильтрационном опробовании, например, песков из тела намывных сооружений, а также при оценке данных определения плотности сложения песков, особенно при использовании режущих цилиндров малых объемов.

ИЗУЧЕНИЕ ПЛОТНОСТИ СЛОЖЕНИЯ ПЕСКОВ

5.41. В отличие от многих других грунтов плотность песков – понятие двуплановое, характеризующее как абсолютную плотность сложения песка, так и относительную плотность, которая оценивает величину естественной плотности по отношению к пре-

дельно-возможному диапазону ее изменения для данной разновидности песка.

Абсолютная плотность может быть охарактеризована рядом показателей: плотностью ρ, в том числе плотностью во взвешенном состоянии для водонасыщенных песков $\rho_{взв}$; плотностью сухого песка или плотностью скелета ρ_d; пористостью n; коэффициентом пористости e.

Относительная плотность оценивается коэффициентом (индексом) относительной плотности I_d; в некоторых целях целесообразно определять также коэффициент относительной уплотненности F_d, определяемый по п. 2.29.

5.42. Рассматривая плотность песков как показатель текстуры, обычно имеют в виду их пористость, характеризующую компактность расположения гранулометрических элементов в рассматриваемом объеме. Если представить песок в виде совокупности идеальных шаров одинакового диаметра, то пористость такого абстрагированного песка может изменяться в строго ограниченных пределах: от максимальной 47,64% – при кубической форме расположения шаров до минимальной 25,95% – при тетраэдрическом их расположении, т.е. абсолютный диапазон возможного варьирования пористости не превышает 21,69%. Для реальных песков определенной крупности и гранулометрической неоднородности с различной морфологией зерен численные значения показателей предельных плотностей заметно отличаются от указанных величин: по показателям пористости – 54–44, 33–40 и 20–10% соответственно, а по величине плотности скелета – 1,20–1,50, 1,90–1,60 и 0,55–0,25 г/см^3 соответственно (при ρ_s = 2,65 г/см^3).

Рассматривая плотность песков как показатель их физического состояния, следует иметь в виду не только абсолютные значения плотности, но и относительную плотность, без учета которой невозможна полная и сопоставительная характеристика различных литогенетических разновидностей песков (см. разд.2).

5.43. Из всех указанных выше показателей плотности прямым определением (взвешиванием) в общем случае можно установить только величину объемной массы; все остальные показатели определяются расчетным способом, при этом в зависимости от рассматриваемого показателя необходимо сопутствующее определение объемной массы, влажности, удельного веса, значений предельных плотностей скелета.

Показатель плотности...	ρ	$\rho_{взв}$	ρ_d	e и n	I_d	F_d
Необходимые определения...	ρ	ρ, ρ_W	ρ, W	$\rho_s, \rho_d(\rho, W)$	$e(\rho_s, \rho, W)$, e_{max}, e_{min}	$e(\rho_s, \rho, W)$, e_{min}

Как видно, обязательным условием является определение плотности песка ρ, которая в общем случае зависит от всех категорий состава (минерального, химического, биологического,

водного, газового) и компактности расположения гранулометрических элементов.

В строительной практике для классификационных и расчетных целей применяются практически все указанные показатели плотности песков. Определение некоторых из них регламентировано соответствующими нормативно-методическими документами.

Важнейшие особенности методики и методов определения абсолютной плотности сложения песков в естественном залегании или в теле земляных сооружений и определения предельных плотностей сложения, необходимых для характеристики их относительной плотности (уплотненности), указаны в пп. 5.44–5.53.

5.44. Основным методом прямого определения природной или техногенной плотности песков является так называемый метод режущего цилиндра (РЦ). Сущность этого метода изложена в разд.3.

При использовании этого метода необходимо учитывать роль отдельных факторов, определяющих граничные условия применения метода и влияющих на полученные результаты. В строительной практике часто применяют РЦ разного объема (от 50 до 1000 $см^3$) и конструкций. Детальные исследования, выполненные в НИС Гидропроекта в аллювиальных волжских песках, показали, что оптимальным является объем 760 $см^3$ (при определенной конструкции РЦ, рекомендованной ВСН 43-71); цилиндры малого объема в рыхлых песках завышают плотность, а в плотных занижают ее (рис.30); с цилиндрами большого объема трудно работать. Вместе с тем практика изучения песков со значительным содержанием крупнообломочной фракции показывает, что в некоторых случаях следует применять РЦ объемом до 1000 $см^3$.

При прочих равных условиях на получаемые результаты влияют: наличие в образце крупных обломков, включений глинистых прослоев и других примесей (причем чем меньше объем РЦ, тем больше погрешность); влажность песка (опыт показывает, что надежное определение плотности возможно при влажности менее 15%, для некоторых песков – до 18%, что регламентировано ВСН 43-71); состояние РЦ (затупление, помятость) и наличие направляющего устройства. Необходимо учитывать и субъективный фактор – уровень квалификации лаборанта (нередко параллельные определения плотности песков разными лаборантами дают существенные расхождения). По этим причинам часто уже после лабораторного анализа значительная часть определений "выбраковывается" (например, при геотехническом контроле за возведением намывных плотин и дамб Рижской ГЭС "выбраковка" нередко составляла 15–20% всех определений). Следует обратить также внимание на необходимость геолого-статистического подхода к установлению числа определений плотности песков для надежной характеристики состояния песков в массиве.

5.45. К условно-прямому методу определения плотности песков следует отнести также объемный метод. Сущность метода

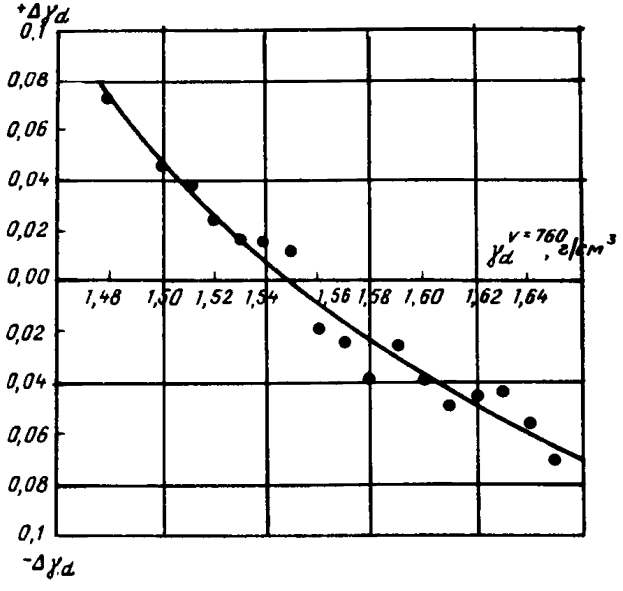


Рис.30. Отклонение абсолютных значений γ_d, определенных при отборе проб песка режущим цилиндром объемом 50 см^3, от γ_d, определенных для проб объемом 760 см^3 (по данным 195 параллельных определений плотности песков в намывной русловой плотине Волжской ГЭС им. XXII съезда КПСС)

состоит в следующем: на выровненной поверхности песчаного грунта делается углубление (выемка) объемом до 500 см^3; извлеченный песок помещается в тару; образовавшееся углубление заливается расплавленным парафином; определяется объем застывшего парафина (методом вытеснения воды в цилиндре); взвешивается измельченный песок (при естественной влажности); при необходимости определяются влажность, плотность минеральных частиц песка и расчетом устанавливается искомая величина показателя его абсолютной плотности. Этот метод применим в малопроницаемых песках (возможен при более высоких влажностях, чем метод РЦ) и дает достаточно точные результаты.

5.46. При использовании методов, указанных в пп. 5.44 и 5.45, следует обращать внимание на общие текстурные особенности песков, так как в зависимости от характера их слоистости могут быть получены разные результаты при изучении различных текстурных элементов контролируемого слоя.

5.47. Для определения плотности песков в массиве следует применять косвенные методы: динамическое и статическое зондирование; радиометрические, электрические, сейсмоакустичес-

кие, ультразвуковые (все в разных модификациях) и другие измерения. Применение ряда методов регламентировано нормативно-методическими документами (ГОСТ 19912–74, ГОСТ 20069–74 и др.). Следует лишь подчеркнуть, что для точного определения плотности песков необходимо проведение тарировочных работ, значение которых подчеркнуто в разд.2 и 10 данных Рекомендаций.

5.48. Методика определения предельных плотностей сложения песков в настоящее время не стандартизирована, однако многие проектно-изыскательские и научно-исследовательские организации (Гидропроект, Теплоэлектропроект, трест Гидромеханизация и др.) выполняют определения этих важнейших характеристик песков.

Наиболее детальные исследования по разработке лабораторных методов определения предельных плотностей песков выполнены в НИС Гидропроекта В.В.Радиной [19] . Эти исследования были проведены на ряде генетических типов песков в широком диапазоне изменения гранулометрического состава и при различной морфологии зерен. Соответствующие рекомендации приведены в пп. 5.49 и 5.50.

5.49. Предельно рыхлое сложение всех разновидностей песков определяется в воздушно-сухом состоянии путем последовательной отсыпки песка в мерный стеклянный цилиндр из стеклянной воронки с длинной трубкой при плавном поднимании воронки, обеспечивающем плавное, без отрыва струи, высыпание песка с образованием характерного конуса. При этом важно исключить всякие сотрясения лабораторного стола, исключить резкое выпадение из воронки крупных обломков. Мерный цилиндр перекрывается "с верхом" отсыпаемым песком, который затем осторожно "срезается" вровень с краями цилиндра. Может также использоваться отсыпка песка в цилиндр, установленный с наклоном примерно 45°, а после отсыпки цилиндр осторожно переводится в вертикальное положение и поверхность песка аккуратно разравнивается. Для плавности отсыпки рекомендуется поднимать воронку на штативе, оборудованном кремальерой. Обычно применяется навеска песка 100–200 г, для крупных и гравелистых песков – до 300–500 г, а для песков, содержащих большое количество крупнообломочной фракции (особенно щебнистогалечниковой), – до 1000 г. Зная объем отсыпанного песка и его массу, определяемую контрольным взвешиванием, рассчитывают величину плотности скелета в предельно рыхлом сложении.

Следует заметить, что проведение указанного анализа – поистине ювелирная работа, требующая и определенного навыка и большой аккуратности. Обычно при параллельных (повторных) определениях наблюдается некоторый разброс получаемых данных. Поэтому рекомендуется выполнять каждое определение по результатам трех опытов.

5.50. Предельно плотное сложение всех разновидностей песков,

кроме пылеватых и глинистых, как правило, определяется в воздушно-сухом состоянии, а пылеватых (и глинистых) – при незначительном их увлажнении [19]. Предельно плотное сложение достигается путем послойной отсыпки песка в конический сосуд объемом 250 $см^3$ (угол наклона стенок 45^0) и постукиванием резиновым молоточком по внешним стенкам сосуда после отсыпки каждого слоя песка (толщиной до 1 см). Максимально вошедшее в сосуд количество песка взвешивается, и расчетом определяется величина плотности скелета в предельно плотном сложении. В ряде организаций для определения максимальной плотности песков используются приборы стандартного уплотнения (типа уплотнителя Союздорнии). Сущность метода изложена в ГОСТ 22733–77, однако надо иметь в виду, что чрезмерно большое количество ударов молоточка может привести к дроблению зерен песков и обломочного материала (особо осторожно следует относиться к уплотнению песков с ракушечным детритом).

Следует заметить, что проведение данного анализа – также достаточно трудоемкая работа, требующая навыка и аккуратности выполнения контрольных параллельных определений и в общем случае, при массовых опытах, статистической обработки полученных данных.

5.51. Уплотняемость практически всех песков существенно изменяется в зависимости от их влажности. Характер этой зависимости представлен на рис.31. Как видно, график имеет криволинейное очертание с двумя экстремумами: первый – в воздушно-сухом состоянии ($W = W_{гигр}$), второй (максимум-максиморум) – при оптимальной влажности; при максимальной гигроскопичности достигается наименьшее значение плотности. При этом получаются достаточно существенные расхождения в фиксируемых значениях $\gamma_{d\,макс}$, достигающие 0,05 г/$см^3$, что, естественно, весьма заметно сказывается на величине коэффициента относительной плотности песков J_d.

5.52. С учетом влияния влажности на определение величины предельно плотного сложения песка целесообразно руководствоваться следующими рекомендациями.

Для наиболее полной характеристики особенностей состава и структуры песков их предельно плотное сложение необходимо определять при оптимальной влажности. Однако в этом случае надо либо предварительно устанавливать для изучаемых песков зависимость $\gamma_{d\,max} = f(W)$ и опытным путем находить величину $W_{опт}$, либо, установив также опытным путем величину $W_{м.м.в}$ ориентировочно оценить величину $W_{опт} = 1{,}15\,W_{м.м.в} + 2{,}5$. Как видно, это достаточно трудоемкий путь, мало приемлемый для массовых производственных анализов. Его можно рекомендовать лишь для трех целей: обеспечения работ по контролю за механическим уплотнением песков в насыпях; выполнения расчетов возможного доуплотнения песков в основании ответственных сооружений (например, фундаментов

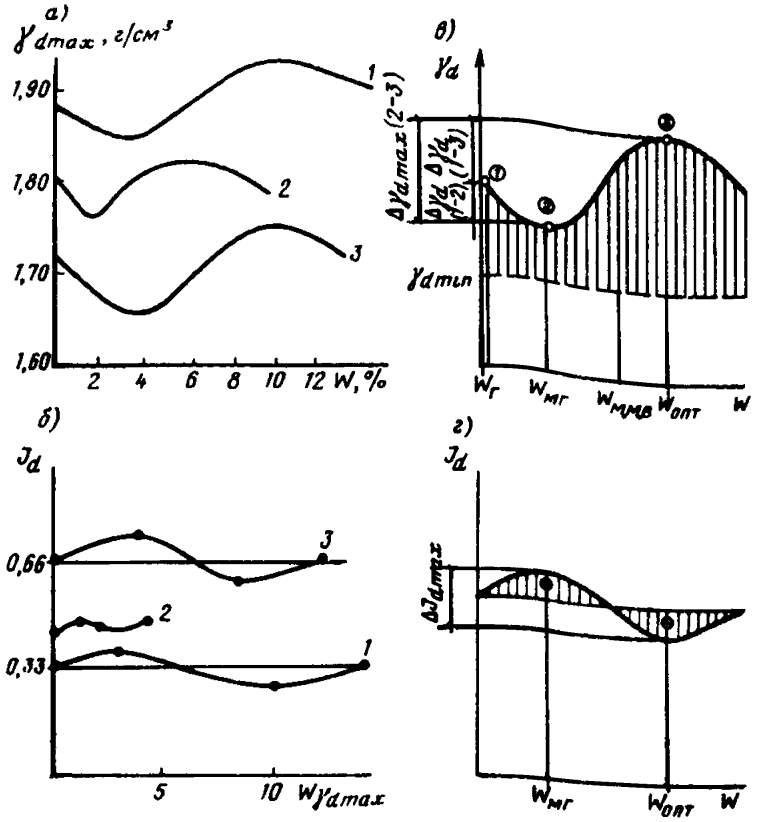


Рис.31. Зависимость от влажности

а – максимальной плотности скелета; *б* – индекса относительной плотности; *в*, *г* – схемы, иллюстрирующие характер указанных зависимостей; *1* – пески средней крупности, $a\,Q_4$, г.Химки; *2* – пески средней крупности, $fg\,Q_2$, Рижская ГЭС; *3* – мелкие, $e\,O\,Q_4$, Ашхабад.

Диапазон изменения γ_d и J_d составляет:

$\Delta\gamma_{d\,max}(2-3) = 0{,}05-0{,}1$ г/см³; $\Delta J_{d\,max} = 0{,}06-0{,}195$;
$\Delta\gamma_{d\,max}(1-3) = 0{,}02-0{,}05$ г/см³; $\Delta J_{d\,max} = 0{,}03-0{,}15$;
$\Delta\gamma_{d\,max}(1-2) = 0{,}04-0{,}07$ г/см³; $\Delta J_{d\,max} = 0{,}02-0{,}045$

мощных турбогенераторов); при проведении специальных исследовательских работ.

Для массовых определений предельно плотное сложение песка следует устанавливать в воздушно-сухом состоянии (при гигроскопической влажности). Однако при этом надо помнить, что таким путем получаются несколько заниженные величины предельно плотного сложения песка. Для корректировки этих данных можно использовать коэффициент оптимального доуплотнения

$$K^{W}_{\gamma_{d\,max}} = \frac{\gamma^{W_{опт}}_{d\,max}}{\gamma^{W_г}_{d\,max}}.$$

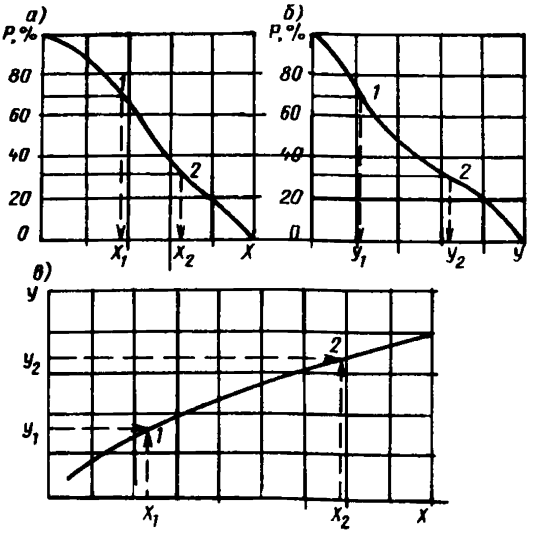


Рис.32. Схема построения тарировочной (корреляционной) зависимости методом равных обеспеченностей

а – кривая обеспеченности аргумента *X*; *б* – кривая обеспеченности аргумента *У*; *в* – тарировочная зависимость $У = f(X)$

Экспериментальные исследования свидетельствуют о том, что для большинства песков величина этого коэффициента в среднем равна 1,03 (при $W_r \leqslant 1\%$).

5.53. При изучении плотности песков необходимо обеспечивать статистический подход к обработке и анализу полученных данных. Без такого подхода невозможно учесть отмеченные структурно-текстурные особенности песков и объективно оценить состояние их плотности в массиве.

Основные рекомендации к статической обработке соответствующих опытных данных содержатся в действующих нормативно-методических документах (ГОСТ 20522–75).

Для практических целей, особенно при полевом периоде камеральной обработки полученных данных, может эффективно использоваться предложенный А.Н.Юлиным метод равных обеспеченностей, позволяющий оперативно устанавливать линейные и нелинейные зависимости между различными характеристиками (показателями) грунтов, в том числе определенными разными методами. Сущность рассматриваемого способа обработки опытных данных заключается в построении и совместном анализе графиков обеспеченности сравниваемых показателей: для каждого показателя строится свой график обеспеченности фактических

значений контролируемого параметра, а затем для одинаковых значений обеспеченности находятся искомые величины параметров и по полученным парам точек строят корреляционную зависимость (рис.32).

6. ИЗУЧЕНИЕ ВЛАЖНОСТИ И ВОДНЫХ СВОЙСТВ ПЕСКОВ

6.1. При изучении строительных свойств песков следует учитывать, что одним из важных компонентов песчаных грунтов является их водный состав, причем количественное содержание воды, ее химический состав, минерализация, агрессивность часто существенно изменяются в процессе строительства и в период эксплуатации сооружений.

6.2. Вода в песках может быть химически связанная, физически связанная (прочно- и слабосвязанная), капиллярная, гравитационная, парообразная, твердая. Правильное представление о физическом состоянии воды, взаимоотношении твердых, жидких, газообразных биологических компонентов позволяет не только вскрыть природу строительных свойств песков и объективно охарактеризовать эти свойства, но и обоснованно выбрать методику и методы изучения образцов и массивов песчаных грунтов.

6.3. Количественное содержание водного компонента в песках характеризует их влажность, степень заполнения порового пространства водой – степень водонасыщения, а взаимодействие песков с водой – их водные свойства: водопроницаемость, влагоемкость и др.

6.4. Влажность, степень водонасыщения и водные свойства песков являются в общем случае функцией комплекса особенностей их состава и строения.

МЕТОДИКА И МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ ПЕСКОВ

6.5. Суммарное содержание воды во всех ее фазовых состояниях характеризует общую влажность песка и определяется высушиванием образца до постоянного веса при температуре 105°С.

6.6. Различают абсолютную и объемную влажность. Абсолютной, или массовой, влажностью называется отношение массы воды в порах песка к массе твердых (минеральных) компонентов, выражаемое в процентах или в долях единицы. Именно эта влажность обычно и определяется в строительной практике.

Объемной влажностью называется отношение объема воды, заключенной в порах песка, к его полному объему. Представление об объемной влажности используется лишь для некоторых частных задач и предусматривает последующий переход к абсолютной влажности.

Абсолютная влажность песков изменяется в достаточно широких пределах – практически от нуля до влажности, соответствующей полному заполнению пор водой при предельно рыхлом сложении песка, достигая значений 30–45%.

6.1. С теоретических и практических позиций необходимо выделять следующие характерные значения влажности: гигроскопическую $W_г$, максимальную гигроскопичность $W_{м.г}$, максимальную молекулярную влагоемкость $W_{м.м.в}$, оптимальную влажность $W_{опт}$, капиллярную $W_{кап}$ и полную $W_{п.в}$ влагоемкость. Естественная влажность песков может соответствовать каждому из этих характерных значений или занимать промежуточное положение. Ориентировочные значения предельно возможного диапазона изменения характерных значений влажности песков различного состава и строения указаны в табл.13.

Таблица 13

Характеристика значения влажности	$W_г$	$W_{м.г}$	$W_{м.м.в}$	$W_{опт}$	$W_{п.в}$	$W_{кап}$
Диапазон изменения абсолютной влажности, %:						
минимальной	0	0,1	1,5	4	15	0–15
максимальной	1,5	5	15	20	45	1,5–45

Столь значительный диапазон изменения влажности песков оказывает непосредственное влияние на определяемые расчетным путем показатели физического состояния и, естественно, на многие их строительные свойства. В частности, абсолютная влажность песков определяет величину их плотности и степени водонасыщения, прочность, динамическую устойчивость, электро- и сейсмопроводность, в ряде случаев – сжимаемость, теплофизические и другие свойства. Поэтому достоверное определение влажности песков приобретает важное практическое значение.

6.8. Для определения влажности песков правомерно применять лабораторные и полевые методы.

6.9. К основным лабораторным методам относятся термостатный и пикнометрический методы, метод сушки образца инфракрасными лучами и ускоренный способ высушивания образца в пламени сухого спирта. Все эти методы применимы для определения влажности песков любой крупности, не содержащих более 10% органических включений. Известны также метод сушки образца инфракрасными лучами и способ определения влажности с помощью плотномера-влагомера Ковалева, однако эти методы не получили широкого распространения в строительной практике из-за сравнительно сложной технологии опыта или сложного оборудования.

6.10. Наибольшее распространение получил термостатный метод, рекомендованный ГОСТ 5180–75. Влажность песка опреде-

ляется путем взвешивания образца до и после высушивания его в термостате при 105°С (100–110°С) и последующего аналитического вычисления значения W по опытным данным. При определении влажности песка этим методом, особенно в диапазоне ее малых изменений от $W_г$ до $W_{м.м.в}$, следует строго соблюдать требование ГОСТ о контроле за полным высушиванием образца и проведении параллельных (контрольных) определений влажности.

6.11. Пикнометрический метод заключается в определении разности в весе пикнометра с чистой водой без образца песка и пикнометра с высушенным образцом, прокипяченным в песчаной бане в течение 30 мин и охлажденным с последующим доливом воды до мерной черты. Технология опыта, расчетные формулы и номограмма для установления влажности по этому методу приведены в [31].

6.12. Особенностью ускоренного весового метода определения влажности является высушивание образца песка массой 10–15 г в пламени сухого спирта. Весь образец равномерно распределяется на дне бюксы и высушивается на спиртовке при сжигании 5–6 г сухого спирта. Этот метод целесообразно применять при массовых экспресс-анализах влажности песков, например, в практике геотехнического контроля за качеством укладки песков в земляные сооружения. Следует лишь обратить внимание на необходимость контрольного определения влажности термостатным способом для уточнения рекомендаций по времени высушивания песков, особенно при широком диапазоне изменения их структурных характеристик и, следовательно, при различном содержании физически связанной влаги. Нужен также контроль за наличием в образцах песка органических примесей и глинистых включений.

6.13. Все указанные лабораторные методы обеспечивают достаточно высокую точность определения влажности (±0,5%). Необходимо лишь следить за исправностью лабораторного оборудования и тщательно проводить указанные анализы. Важно подчеркнуть, что в связи с малым объемом изучаемых образцов песка необходимо четко фиксировать места отбора образцов и текстурные особенности грунта, без чего невозможно оценить характерность и представительность полученных данных для изучаемого массива песка и провести интерпретацию результатов изучения песков другими методами.

Следует также иметь в виду неизбежность определенного, зачастую значительного разброса данных лабораторного определения влажности песков по изученным образцам. Это объясняется неоднородностью состава и строения песков, резко проявляющихся при точечном их опробовании. Поэтому при изучении влажности даже планомерно укладываемых намывных песков (при регулярном режиме намыва) необходимо предусматривать для решения ряда задач статистическую обработку получаемых данных.

6.14. Полевые методы определения влажности песков (как и

других грунтов) отличаются значительным разнообразием. Их появление и развитие было вызвано рядом причин: общим развитием полевых методов изучения грунтов в условиях их естественного залегания; разработкой идеи комплексирования полевых методов, в частности при комбинации в одном приборе устройств для параллельного или одновременного определения различных характеристик состояния и свойств грунтов (например, метод пенетрационно-каротажных исследований); широкое внедрение в практику инженерно-геологических изысканий разнообразных геофизических и радиационных методов; немаловажное значение имело и стремление повысить представительность данных определения влажности грунтов в изучаемых массивах.

Широкую известность получили нейтронный, электрический и диэлектрический методы. Эти и некоторые другие методы используют гравиметрическую, радиационную, электромагнитную, тензометрическую, капиллярную, гигрометрическую технику. Дистанционные методы определения влажности основаны на термометрической, микроволновой технике.

6.15. Все полевые методы определения влажности являются косвенными, так как при их применении измеряются лишь отдельные параметры грунта, зависящие от его влагосодержания. Следовательно, как и для любого косвенного метода, необходимо контрольное тарирование его в конкретных пунктах проведения инженерно-геологических изысканий.

6.16. Общими достоинствами указанных полевых методов является не только оперативность определения влажности, но и, главное, повышение представительности получаемых данных за счет резкого увеличения объема контролируемого грунта.

При этом обеспечивается сопоставимость объемов грунтов, изучаемых различными полевыми методами (рис.33).

6.17. Наиболее эффективным и широко применяемым в практике изысканий является нейтронный метод. Он применяется как для разовых, так и для режимных определений влажности песков [26]. Обычно используется глубинная схема нейтрон-нейтронного

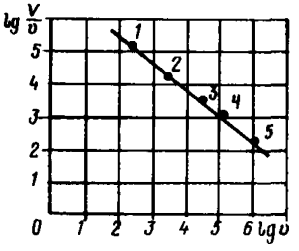


Рис.33. Зависимость объема изучаемого песка от применяемого метода исследований

V – условный объем контролируемого массива песка ($V = 250$ м^3 применительно к практике геотехнического контроля за возведением намывных плотин слоями 0,5 м при контроле по сетке 10х50 м); v – фактический объем опробуемого (испытуемого) песка методами: *1* – отбор пробы песка в бюкс; *2* – отбор пробы песка режущим цилиндром; *3* – испытание песка легким забивным зондом ЛЗЗ; *4* – изучение песка каротажными методами; *5* – испытание песка динамическим зондированием (УБП-15)

каротажа – ННК (при отдельно проводимых радиометрических работах или при пенетрационно-каротажных исследованиях – станции пенетрационного каротажа СПК, СПК-Т, ПСПК, ПСПК-69). Поверхностные схемы измерения применяются редко. Используются нейтронные влагомеры НИВ-2, ВПГР-1, НВУ-1, НВХ-1, РВП-НГ, поставляемые Всесоюзным объединением "Изотоп". В среднем погрешность измерения влажности этими приборами не превышает 1–1,5%, однако имеются данные об отклонении показаний ННК от определения объемной влажности термовесовым способом до 5–7% по абсолютным значениям [26]. Такие отклонения нельзя объяснить только разбросом результатов точечных анализов отбираемых образцов. По-видимому, определенное влияние оказывает различный характер структурно-текстурных изменений в песках при внедрении зонда в зависимости от относительной степени упрочненности и уплотненности песков и других их показателей. Поэтому и необходимо проведение контрольных тарировочных работ, если нужна бóльшая точность определений влажности. Данное положение в особо категоричной форме касается электрического (кондуктометрического) и диэлектрического (емкостного) методов определения влажности. Это вызвано многофакторным влиянием на соответствующие свойства грунтов. Так, электропроводность и электрическое сопротивление грунтов помимо влажности зависят от химико-минерального состава, структурно-текстурных особенностей и температуры; диэлектрическая проницаемость определяется химико-минеральным составом твердой, жидкой и газообразной составляющих, их соотношением в единице объема, структурными особенностями грунтов, частотой поляризующего поля, температурой и давлением [21]. Эти особенности затрудняют применение указанных методов без тарировочных работ на каждой строительной площадке.

МЕТОДИКА И МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ ВОДНЫХ СВОЙСТВ ПЕСКОВ

6.18. Водные свойства – это комплексное понятие, включающее водоустойчивость, влагоемкость, водоотдачу и водопроницаемость горных пород. Все эти свойства присущи пескам и подлежат изучению.

6.19. Водоустойчивость песков, характеризующая их способность сохранять свое состояние, прочность и устойчивость при взаимодействии с водой, может изучаться как лабораторными, так и полевыми методами. При этом следует сопоставлять данные испытаний при исследовании механических свойств песков в различных интервалах влажности, особенно до и после полного водонасыщения. Важно иметь в виду, что соответствующие зависимости носят нелинейный характер (см. рис.31) и что степень влияния водонасыщения на водоустойчивость песков различна в зависи-

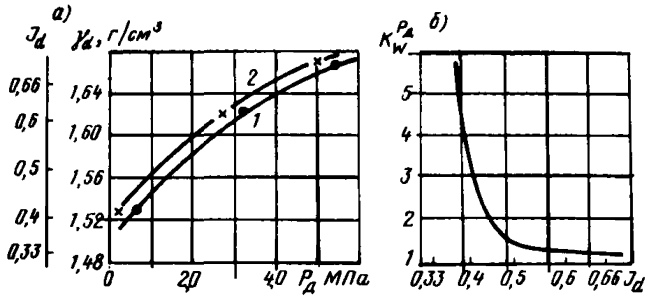


Рис.34. Влияние водонасыщения на величину условного динамического сопротивления зондированию песков

а – тарировочный график для УБП-15М в маловлажных *(1)* и водонасыщенных *(2)* гравелистых песках намытого основания Читинской ГРЭС; *б* – зависимость коэффициента изменчивости условного динамического сопротивления песков зондированию при водонасыщении $K_w^{P_д}$ от величины их относительной плотности J_d

мости от их относительной плотности (рис.34), а иногда и относительной упрочненности. В качестве показателя водоустойчивости целесообразно использовать коэффициент изменчивости изучаемой характеристики грунта при водонасыщении K_w^E, K_w^φ, K_w^c, $K_w^{P_д}$ и т.д. (см. п.2.38).

Понятие "водоустойчивость" включает и характеристику размокаемости и размываемости песков. Размокаемость (дезагрегирование в водной среде) характерна для тонкозернистых песков, обычно с глинистым цементом, находящихся в недоуплотненном состоянии и обладающих просадочными свойствами. Изучается в лабораторных условиях и оценивается по времени и характеру размокания образца, помещенного в сосуд с водой. Размываемость песков, т.е. их способность разрушаться под влиянием воздействий движущейся воды, изучается для специальных, обычно гидротехнических, целей. Опыты проводятся в лотках или в натурных условиях. При этом фиксируются значения критических размывающих скоростей движения воды, м/с, и интенсивность размыва, мм/мин.

6.20. Влагоемкость песков характеризует их способность поглощать и удерживать определенное количество воды. Методы определения характерных значений влажности песков, отражающие разные виды их влагоемкости, указаны в пп.6.21–6.25.

6.21. Гигроскопическая влагоемкость $W_г$ определяется отмеченным выше термовесовым способом при высушивании образца песка в сушильном шкафу при температуре 105°С.

6.22. Максимальная гигроскопичность $W_{м.г}$ определяется следующим образом. Образцы песка выдерживаются в атмосфере па-

ров 10%-ной H_2SO_4 или над перенасыщенными растворами $CaSO_4 \cdot 5H_2O$, $Ca(NO_3)_2$ и K_2SO_4 и затем высушиваются при температуре 105°С [31].

6.23. Максимальная молекулярная влагоемкость $W_{м.м.в}$ определяется одним из следующих методов: высоких колонн, центрифугированием или пленочным равновесием (метод влагоемких сред).

Все три метода разработаны А.Ф.Лебедевым и основаны на удалении свободной воды и определении остаточной влажности, принимаемой за сорбционную (связанную). В настоящее время нет единства взглядов на достоверность каждого из этих методов, отсутствует ГОСТ на определение $W_{м.м.в}$.

Метод высоких колонн основан на пропускании через песок, засыпанный (обычно в рыхлом состоянии) в стеклянный или металлический цилиндр высотой 90–100 см и диаметром 3–4 см, избыточного количества воды, подаваемой сверху. После стекания воды в верхней части колонны остается связанная влага, удерживаемая молекулярными силами, а в нижней – капиллярная, удерживаемая менисковыми силами. Метод центрифугирования заключается в удалении свободной воды из песка путем воздействия на него гравитационного поля с ускорением 18 000 g, создаваемого в центрифуге. Метод пленочного равновесия состоит в удалении свободной воды из образца водонасыщенного песка путем сдавливания его под прессом при давлении 6,55 МПа в течение 10 мин (этот метод применим только для песков, не содержащих частиц крупнее 0,5 мм).

6.24. Наибольшее распространение получил метод высоких колонн. Определяемая этим методом величина максимальной молекулярной влагоемкости четко отражает гранулометрические и морфологические особенности песков. Доказана также возможность экспрессного определения величины $W_{м.м.в}$ в малых колоннах (высотой 50 см и диаметром 2 см) при удовлетворительной сходимости получаемых данных (рис.35). Этим же методом определяется и капиллярная влагоемкость песков (см. рис.35). В процессе указанного опыта следует не допускать нахождения в колонне защемленного воздуха, а также выдерживать время стекания воды в зависимости от крупности песка: от нескольких часов – для гравелистых и крупных песков до 2–3 сут – для пылеватых и глинистых песков. В этом плане целесообразно планировать проведение нескольких параллельных опытов с разным временем отбора образца песка из колонн.

6.25. Полная влагоемкость определяется, по Е.Г.Чаповскому, путем заполнения песком стакана объемом около 200 $см^3$ и последующим насыщением его водой до появления на поверхности песка тонкой водной пленки. Затем обычным термовесовым спо-

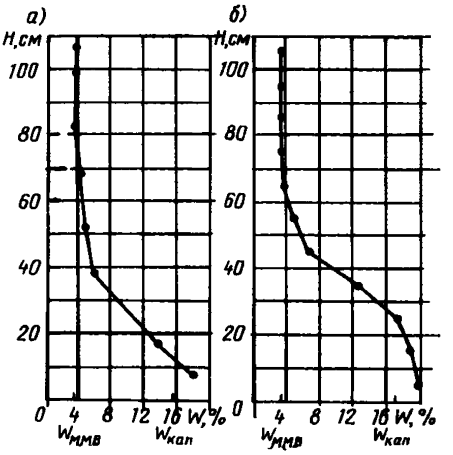


Рис.35. Результаты определения максимальной молекулярной влагоемкости $W_{ммв}$ и капиллярной влагоемкости $W_{кап}$ песков

а – стандартным методом высоких колонн; *б* – ускоренным методом малых колонн

собом определяется полученная таким образом влажность песка. Следует заметить, что такой способ не отражает в достаточной мере влияние плотности укладки песков, поэтому правильнее определять величину их полной влагоемкости путем аналитического расчета для известного значения коэффициента пористости

$$W_{п.в} = \frac{e\,\gamma_w}{\gamma_s},$$

где e – коэффициент пористости песка; γ_s – плотность твердых частиц песка; γ_w – плотность воды.

К характерным значениям влажности песков относится и оптимальная влажность $W_{опт}$, корреляционно связанная с величиной максимальной молекулярной влагоемкости (см. п.5.52). Величина $W_{опт}$ определяется методом стандартного уплотнения образца песка в приборах Союздорнии или ПНИИИС (изучаются пески с содержанием до 5% частиц размером более 5 мм и более 2 мм соответственно). Методика опытов приведена в ГОСТ 22733–77.

6.26. Водоотдача песков, как и любых дисперсных пород, определяется аналитическим расчетом по известным формулам:

$W_в = W_{п.в} - W_{м.м.в}$ (% к массе песка);

$W'_в = W_в \gamma_d$ (% к объему песка).

6.27. Водопроницаемость – одно из характерных свойств песков – определяется тремя группами методов: по эмпирическим формулам, лабораторными и полевыми методами.

Водопроницаемость рассматривается как частный случай проницаемости грунтов, т.е. свойства пропускать жидкость и газ под действием давления или напора (ГОСТ 23278–78).

6.28. Эмпирические формулы для определения коэффициента фильтрации песков $K_ф$, каждая из которых имеет конкретную

область применения и учитывает некоторую совокупность характеристик состава, строения и состояния песков, приведены в табл.14.

Для облегчения расчета значений $K_ф$ по этим формулам обычно пользуются номограммами.

Таблица 14

Автор	Формула	Рекомендуемая область применения	Учитываемые параметры
Хазен	$K_ф = C d_д^2 (0{,}7 + 0{,}03t)$	Мелкие чистые пески; $d_д = 0{,}1 \div 3$ мм	Действующий диаметр $d_д$; "чистота и однородность песков" C; температура воды t, °С
Слихтер	$K_ф = 496 M d_д^2$	Пески крупные и средней крупности	Действующий диаметр; пористость (M – функция пористости)
Терцаги	$K_ф = \frac{C}{\eta_t}\left[\frac{n-0{,}13}{\sqrt[3]{1-n}}\right]^2 d_д^2$, см/с. При $d_д$, мм, $t = 0$°С для песков с гладкими зернами $K_ф = 5080\left[\frac{n-0{,}13}{\sqrt[3]{1-n}}\right] d_д^2$, м/сут; для песков с угловатыми зернами – $K_ф = 2930\left[\frac{n-0{,}13}{\sqrt[3]{1-n}}\right] d_д^2$, м/сут	Пески крупные	Действующий диаметр; пористость n; морфология зерен (эмпирический коэффициент C); вязкость η воды при t, °С
Крюгер	$K_ф = 240 \frac{n}{(1-n)^2} d_д^2$	Пески средней крупности	Действующий диаметр (при учете всего грансостава песка), пористость
Козени	$K_ф = 4020 \frac{n^3}{(1-n^2)} d_д^2$	Нет указаний	Действующий диаметр, пористость
Цункер	$K_ф = C\left(\frac{n}{1-n}\right)^2 \frac{1}{U^2}$	Пески мелкие и средней крупности	Относительная удельная поверхность U, эмпирический коэффициент формы зерен C, пористость

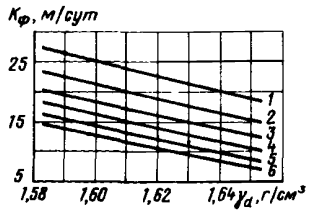


Рис.36. Зависимость величины коэффициента фильтрации $K_ф$ намывных песков Рижской ГЭС от плотности скелета γ_d и содержания фракции размером 0,1–0,25 мм, %

1 – 10; *2* – 25; *3* – 30; *4* – 35; *5* – 40; *6* – 45

В связи с рассмотренной в предыдущих разделах ролью морфологии зерен песков следует подчеркнуть, что в формулах Терцаги и Цункера этот фактор (морфология) имеет немаловажное значение. Так, по формуле Терцаги пески с гладкими зернами имеют коэффициент фильтрации в 1,74 раза больше, чем у песков с угловатыми зернами. Еще большее различие выявляет формула Цункера, согласно которой коэффициент фильтрации однородных песков с гладкими округлыми зернами в 1,7 раза больше, чем у однородных песков с шероховатыми малоокатанными зернами; в 2 раза больше, чем у неоднородных песков, и в 3,41 раза больше, чем у неоднородных нечистых песков с угловатыми зернами.

Все указанные формулы целесообразно использовать лишь для предварительных, ориентировочных расчетов и оценок.

6.29. Для практических целей можно рекомендовать полуэмпирический метод установления экспериментальных зависимостей (корреляции) между значениями $K_ф$, полученными прямыми методами (например, лабораторными), и показателями гранулометрии и плотности изучаемых песков. Особенно эффективен такой подход при геотехническом контроле качества возведения земляных сооружений из однородного песка, но с определенным диапазоном изменения содержания преобладающих фракций и величины плотности скелета.

В качестве примера на рис.36 показан график, полученный А.Н.Юлиным при изучении намывных песков, уложенных в плотины и дамбы Рижской ГЭС. Наличие такого графика позволяет существенно сократить время и затраты на массовые определения $K_ф$ в полевых условиях. Следует учитывать, что заметное влияние на величину $K_ф$ оказывают не только крупность, неоднородность песков и морфология зерен, но и их минеральный состав, адсорбционные свойства песков. Так, по данным Сакера и Джордана, величина $K_ф$ кремнистых эоловых песков при прочих равных условиях в 10–15 раз больше по сравнению с оолитовыми морскими песками, причем чем больше развиты прочно связанные пленки на поверхности зерен песков, тем меньше значения $K_ф$. При более полном учете гранулометрической неоднородности песков заметно снижается разброс опытных данных.

6.30. В лабораторных условиях $K_ф$ песков определяется обычно методом постоянного напора воды по двум равнозначным

схемам: измерению количества профильтрованной воды с одновременным определением некоторого градиента или измерению скорости падения уровня воды в приборе при определенном начальном напоре. На этих принципах основаны приборы Тима, Каменского, трубка Тима–Каменского, прибор СПЕЦГЕО и др. Преимуществом модифицированной трубки СПЕЦГЕО является возможность отбора и испытания образца песка ненарушенной структуры; именно поэтому она рекомендована ВСН 43-71 для использования в практике геотехнического контроля за возведением намывных земляных сооружений.

К недостаткам лабораторных методов определения $K_ф$ следует отнести малую представительность данных изучения образцов малого объема (в том числе нарушенного сложения), что не всегда позволяет достоверно охарактеризовать водопроницаемость массива песков с присущей ему фильтрационной неоднородностью и анизотропией. В этом плане применение лабораторных методов требует обязательного статистического анализа получаемых опытных данных.

6.31. Наиболее надежная оценка водопроницаемости песков в природных массивах и в земляных сооружениях обеспечивается применением полевых методов. Согласно действующему ГОСТ 23278–78, при изучении песков рекомендуются следующие методы: выше уровня грунтовых вод или кровли напорного пласта (в зоне неполного водонасыщения) – метод налива воды в шурф как основной метод и метод нагнетания воздуха в скважины при большой мощности зоны аэрации; в пределах водоносного горизонта (в зоне полного насыщения) – метод откачки воды из скважины (одиночная или кустовая откачка как основной метод); откачка воды из шурфов при высоком уровне грунтовых вод и индикаторный метод – путем определения действительной скорости движения подземных вод.

Все эти методы применяются в различных модицикациях (например, налив воды в шурф по методам А.К.Болдырева, Н.К.Гиринского, Н.С.Нестерова). Наибольшее распространение при изучении песков и наиболее точные результаты обеспечивают метод Нестерова и откачка из куста скважин.

6.32. При изучении коэффициента фильтрации песков и при интерпретации получаемых данных необходимо учитывать комплексно все особенности состава, строения и свойств песков в их взаимосвязи и взаимовлиянии, а также стремиться к наиболее полной характеристике водопроницаемости песков в массиве, применяя статистический анализ данных лабораторных определений $K_ф$ и контролируя его результатами полевых опытов. Выбор метода определения $K_ф$ должен обусловливаться задачей исследования и крупностью изучаемого песка. Для каждого метода следует учитывать граничные условия его применимости и обеспечивающую точность определения $K_ф$. Использование различных справочных данных о величине $K_ф$ допустимо лишь для ориентировочных расчетов.

7. ИЗУЧЕНИЕ ДЕФОРМАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ПЕСКОВ

ПОКАЗАТЕЛИ ДЕФОРМАЦИОННЫХ СВОЙСТВ

7.1. В инженерно-геологической практике под деформациями грунтов понимают изменения объема грунта, вызванные изменением его напряженного состояния, физико-химическими процессами и т.п. При изменении объема грунта учитывают чаще всего вертикальные деформации, которые подразделяются на осадки, просадки, набухание и усадку, оседания. Для песков наиболее характерным видом деформаций являются осадки, происходящие в результате уплотнения грунта под воздействием внешних нагрузок. Осадки возникают вследствие уменьшения объема пор из-за смещения частиц относительно друг друга, разрушения самих частиц, а также сжатия газов, содержащихся в порах и в поровой жидкости. Гораздо в меньшей степени в песках отмечаются такие виды деформаций, как просадки, которые происходят в результате уплотнения структуры грунта под воздействием как внешних нагрузок и собственного веса грунта, так и дополнительно с ними действующих факторов (например, замачивание просадочных грунтов, выщелачивание засоленных грунтов, динамические воздействия и т.п.). Деформации, связанные с набуханием и усадкой, наблюдаются только в небольшой степени в глинистых песках в результате кристаллизации в их порах химических веществ в форме кристаллогидратов.

7.2. Изучение деформационных свойств грунтов в инженерно-геологических целях сводится в конечном счете к прогнозу осадок основания зданий и сооружений как в период их строительства, так и при последующей эксплуатации.

Согласно СНиП II-15-74, осадка основания фундамента по методу послойного суммирования определяется по формуле

$$S = \beta \sum_{i=1}^{n} \frac{p_i h_i}{E},$$

где S – конечная осадка фундамента;

n – число слоев, на которое разделена по глубине сжимаемая толща основания;

h_i – толщина i-го слоя грунта;

E_i – модуль деформации i-го слоя грунта;

p_i – среднее дополнительное (к природному) давлению в i-м слое, равное полусумме дополнительных давлений на верхней и нижней границах этого слоя;.

β – безразмерный коэффициент, равный 0,8.

Таким образом, при расчете оснований по деформациям единственной величиной, которая определяется непосредственно испытаниями грунта является модуль деформации E. Эта величина и является основным показателем сжимаемости грунтов, на определение которой и направлено изучение их деформационных свойств.

Необходимо отметить известную приближенность определения величины этого показателя. Величина E решающим образом зависит от того, в каком интервале нагрузок ΔP она рассчитывается и каким методом получена. При этом увеличение интервала в одних случаях приводит к существенному повышению E (при компрессионных испытаниях), а в других – к уменьшению этой величины (при штамповых испытаниях). В нормативных документах это положение строго не регламентировано. Отсюда противоречивость сведений о влиянии различных факторов на величину модуля деформации, о соотношениях между результатами полевых и лабораторных определений, о сжимаемости конкретных разновидностей песков и т.п.

7.3. Основными факторами, влияющими на сжимаемость песков, являются как внутренние, присущие грунту особенности (минеральный состав, структура и текстура грунта, степень влажности), так и внешние (величина давления фундамента, его размеры и глубина заложения, скорость загружения основания, характер статических и динамических воздействий). При изучении деформационных свойств песков следует учитывать возможные изменения этих факторов в процессе строительства и эксплуатации сооружений и моделировать эти изменения при экспериментальном исследовании сжимаемости грунта.

ТРЕБОВАНИЯ К ТОЧНОСТИ ИЗУЧЕНИЯ ДЕФОРМАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ПЕСКОВ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬСТВА

7.4. Для определения деформационных свойств грунтов при инженерно-геологических изысканиях используются полевые и лабораторные методы исследования. Все они различаются трудоемкостью, производительностью и точностью. Естественно, что качество строительных проектов во многом зависит от точности и надежности результатов определения показателей деформационных свойств грунтов. Вместе с тем стремление изыскателей к максимальному повышению точности исследований (возможному лишь при значительном увеличении объема работ) не всегда оправданно. В ряде случаев требования к точности определения модуля деформации грунта сравнительно невысоки и вполне допускают использование косвенных ускоренных методов. Однако есть случаи, когда требуемая для расчетов точность определения E выходит за пределы возможностей существующих методов исследования.

В зависимости от конструктивных особенностей зданий и сооружений требования к точности определения модуля деформации существенно различаются.

7.5. Наиболее точные значения величины E требуются в тех случаях, когда результаты дальнейших расчетов оснований функционально зависят от этого показателя: например, при определении относительной разности осадок фундаментов соседних ко-

лонн зданий – $\frac{S_1 - S_2}{L}$, где S_1 и S_2 – осадки фундаментов соседних колонн, а L – расстояние между ними. Значения осадок S_1 и S_2 функционально зависят от модулей деформации в соседних точках. При этом требования к точности определения S (или E при изысканиях) чрезвычайно высоки.

Достаточно часто требования к точности определения модуля деформации могут быть весьма низкими. Например, средняя осадка оснований фундаментов зданий и сооружений при горизонтальном залегании однородных грунтов не должна превышать предельной величины $S_{пр.ср}$ В этом случае и к величине E соответственно предъявляется лишь одно требование – быть не ниже известного предела, выше которого допускаются практически любые величины.

И, наконец, в ряде случаев требуется определить лишь порядок величины E. Это относится, как правило, к предварительным стадиям исследований, когда решаются принципиальные вопросы проектирования и намечается программа последующих детальных изысканий.

7.6. Требования к изучению деформационных свойств песков при инженерно-геологических изысканиях различаются в зависимости от конструктивных особенностей и класса капитальности проектируемых сооружений, условий залегания песков, их состава и плотности сложения.

Для большой группы зданий и сооружений непосредственное определение модуля деформации песков не является обязательным. Так, для сооружений II–IУ классов расчет осадок оснований допускается производить по данным табл.1 прил.2 СНиП II-15-74. В этом случае модули деформации устанавливаются по крупности и коэффициенту пористости исследуемых песков. Данные этой таблицы распространяются на кварцевые пески с зернами различной окатанности независимо от степени их влажности, содержащие не более 20% полевого шпата и не более 5% различных примесей (растительные остатки, слюда, глауконит и пр.), т.е. охватывают подавляющее большинство природных песков.

Для ряда сооружений и зданий I класса, перечисленных в табл.19 СНиП II-15-74, также допускается не выполнять расчет по осадкам в случае, если пески, слагающие их основание, представлены либо только плотными, либо только средней плотности разновидностями независимо от их крупности. Если в основании отсутствуют пылеватые пески, то допускается одновременное наличие песков средней плотности и плотного сложения. В указанных случаях определение модуля деформации может не производиться при условии, что пески залегают горизонтально (уклон не более 0,1) и выдержаны по мощности.

Изучение деформационных свойств песков необходимо производить при исследовании территорий, сложенных песками рыхлыми, пылеватыми, с переменной плотностью, содержащими зна-

чительное количество включений, полимиктовыми и т.п., а также песками любого состава и плотности сложения, но имеющими переменную мощность и залегающими с уклоном, превышающим 0,1. Кроме того, модуль деформации определяется при изысканиях под сооружения I класса капитальности, не указанные в табл.19.

7.7. В соответствии с требованиями проектирования подход к изучению деформационных свойств песков различается в зависимости от того, ожидается ли равномерная осадка всего здания или разность осадок двух соседних опор может превысить некоторую предельную величину и вызвать опасные деформации строительных конструкций.

В первом, наиболее простом случае при равномерной осадке деформация основания характеризуется средней осадкой $S_{ср}$, полученной не менее чем по трем отдельным фундаментам, расположенным в пределах здания.

В зависимости от конструкции зданий и типа фундамента предельные значения средних осадок $S_{пр.ср}$, при повышении которых в элементах конструкции могут возникать дополнительные усилия, превышающие ее прочность, меняются в довольно широких пределах. Согласно табл.18 СНиП II-15-74, величина $S_{пр.ср}$ изменяется от 8 см для большого числа железобетонных рамных конструкций с заполнением и без заполнения до 30–40 см – для сплошных железобетонных фундаментов доменных печей, дымовых труб, силосных корпусов, водонапорных башен и т.п. Недопустимые деформации зданий и сооружений возникают в случаях, когда значения модулей деформации грунтов основания уменьшаются ниже определенного предела. Расчеты показывают, что минимальные значения E_{min} в зависимости от ширины проектируемого фундамента b и нормативного давления на грунт $R^н$ для значительной части сооружений (особенно при гражданском строительстве) изменяются от 8,0 до 14,0 МПа. При уменьшении нормативного давления и ширины фундамента значения $E_{мин}$ снижаются еще существенней. Например, для крупнопанельных и крупноблочных бескаркасных зданий при $b = 1{,}0$ м и $R^н \leq 0{,}2$ МПа $E_{мин} = 4{,}0$ МПа. Эта же величина модуля деформации (4,0 МПа) является предельной для дымовой трубы при $b = 4{,}0$ м, $R^н \leq 0{,}2$ МПа. Приведенные примеры свидетельствуют о том, что в случаях, аналогичных указанным, любые значения модулей деформации, превышающие 4,0 МПа, являются безопасными для данных сооружений. Поэтому при гарантированном значении $E \geq 4{,}0$ МПа делать какие-либо уточнения модуля деформации при изысканиях бесполезно, так как это никак не отразится на проектных решениях.

Как видно из приведенных примеров, в ряде случаев даже невысокая точность определения E может удовлетворить требования СНиП. Так, при среднем значении модуля деформации

$E = 30{,}0$ МПа, определенном с погрешностью $E = \pm 25{,}0$ МПа (относительная погрешность $\varepsilon_E = \Delta E/E = 0{,}83$), полученная точность измерений удовлетворяет требованиям табл.18, так как $E = \bar{E} \pm \Delta E$ $30{,}0 \pm 25{,}0 > 4{,}0$ МПа.

Таким образом, точная величина средней осадки, как правило, не используется при расчете основания, сложенного равномерно сжимаемыми грунтами. Необходимо лишь выяснить, выполняется ли, согласно СНиП II-15-74, условие

$$s = \beta \sum_{i=1}^{n} \frac{p_i h_i}{E_i - \Delta E_i}.$$

При выполнении этого условия погрешность определения E может быть велика, вплоть до $\varepsilon_E = 0{,}8 \div 0{,}9$ (как в вышеуказанном примере).

7.8. *По сравнению с первым случаем, когда осадка в пределах* здания считается равномерной и расчет оснований ведется по ее среднему значению, значительно более высокие требования к точности определения E предъявляются в случаях, когда ожидаются неравномерные осадки соседних фундаментов колонн зданий. В табл.18 СНиП II-15-74 указаны предельные относительные разности осадок, соответствующие предельным допустимым деформациям зданий в зависимости от их конструкций. Анализ показывает, что допустимая предельная разность осадок изменяется в широких пределах в зависимости от конструкции зданий и расстояния между осями колонн. Например, для конструкций, у которых не возникает дополнительных усилий при неравномерной осадке фундамента с расстоянием между осями колонн 30 м, предельная разность осадок составляет 15 см. Очевидно, что выявление таких существенных различий в сжимаемости пород не вызовет серьезных затрудней у изыскателей. В то же время для железобетонных рамных конструкций при расстоянии между осями фундаментов 6 м предельная разность осадок составляет всего 0,6 см. Естественно, что для надежного выявления такого незначительного различия в сжимаемости грунтов требуется чрезвычайно высокая точность определения модуля деформаций в процессе изысканий ($\varepsilon_E = 0{,}07 \div 0{,}16$). Значительно более жесткие требования предъявляются к однородности основания при проектировании высоких дымовых труб. В этом случае относительная погрешность при определении сжимаемости в крайних точках фундамента не должна превышать 0,02–0,09.

Таковы, согласно СНиП II-15-74, требования к точности определения модуля деформации грунтов в пределах всего здания (при ожидаемой равномерной осадке) и в отдельных точках внутри и по контуру здания (в случае неравномерного по сжимаемости основания). Эти требования в ряде случаев никак не согласуются с возможностями изыскателей при современном уровне развития инженерно-геологических исследований, что следует учесть при очередном пересмотре строительных норм и правил.

7.9. Наиболее распространенными способами испытания песков на сжатие являются:

компрессионные испытания в жесткой цилиндрической обойме в одометрах;

трехосные осесимметричные испытания в стабилометрах.

КОМПРЕССИОННЫЕ ИСПЫТАНИЯ

7.10. Согласно ГОСТ 23908–79, испытания проводятся в приборах кольцевого типа – одометрах. В зависимости от состава исследуемых песков могут использоваться следующие типы приборов, отличающиеся размерами рабочего кольца и способом передачи давления на грунт:

малые компрессионные приборы с площадью поперечного сечения рабочего кольца 40,6 см^2 и соотношением диаметра D к высоте H кольца не менее 4. Применение колец меньшего размера приводит к увеличению модуля деформации в 1,5–3 раза, а уменьшение соотношения $D:H$ способствует росту трения песка о стенки прибора. Если при $D:H=4$ трение от прикладываемой нагрузки составляет 10–16%, то при $D:H=1$, трение увеличивается до 35–50%. Давление осуществляется рычажными прессами с соотношением плеч от 1:10 до 1:40;

крупногабаритные компрессионные приборы с диаметром рабочего кольца до 50 см (площадь поперечного сечения до 2500 см^2); давление осуществляется гидравлическими домкратами мощностью 50 т.

Для определения сжимаемости основных разновидностей песков (за исключением гравелистых, содержащих крупные включения) рекомендуется применять установку конструкции НИС Гидропроекта (площадь рабочего кольца 60 см^2, высота 2 см).

Пески гравелистые, содержащие крупные включения, рекомендуется испытывать в крупногабаритных компрессионных приборах.

7.11. Нагрузка на образец прикладывается ступенями 0,05, 0,1, 0,2, 0,3 и 0,4 МПа и т.д. Максимальная нагрузка определяется программой на изыскания и должна превышать на 0,1–0,2 МПа нормативное давление на грунт. Каждая ступень нагрузки выдерживается до условной стабилизации деформации.

7.12. При расчете деформации образца следует учитывать деформацию прибора, которая определяется по данным его тарировки.

Результаты компрессионных испытаний изображают графически в виде зависимости приведенной пористости e от величины давления P.

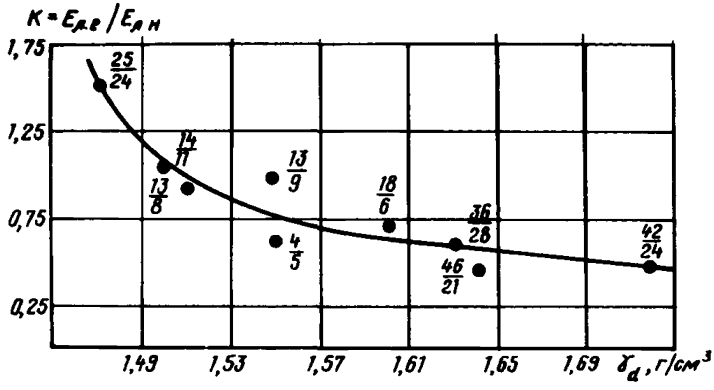


Рис.37. Зависимость $K = E_{д.е}/E_{д.н}$ от плотности скелета песка γ_d. До черты – количество определений на образцах естественного сложения; за чертой – то же, нарушенного сложения

Степень сжимаемости песчаных грунтов рекомендуется оценивать по коэффициенту уплотнения (сжимаемости) a или модулю общей деформации E_0.

7.13. Результаты компрессионных испытаний, выполненных по стандартной методике, даже при строгом соблюдении всех правил могут существенно различаться в зависимости от способа подготовки образца.

В настоящее время в большинстве лабораторий грунтоведения сложилась определенная практика исследования песков: в компрессионных приборах испытываются не образцы с естественным сложением и структурой, а их аналоги, имеющие плотность и влажность, соответствующие природному состоянию. Это связано с тем, что практически невозможно отобрать монолиты песка с естественной структурой; отсутствуют также надежные приемы, гарантирующие его сохранность при транспортировании (особенно по проселочным дорогам), извлечении из грунтоотборной гильзы и переносе в кольцо одометра.

Выполненная в ПНИИИС проверка идентичности показателей сжимаемости для песков естественного сложения $E_{л.е}$ и их аналогов, имеющих ту же плотность и влажность, но уложенных с нарушенной структурой в кольцо прибора $E_{л.н}$, позволила выявить зависимость отношения K $E_{л.е}/E_{л.н}$ от плотности сложения исследуемых песков (рис.37).

Из рис.37 видно, что для песков рыхлого сложения ($\gamma_d <$ <1,50 г/см^3) значения модуля деформации, полученные по образцам с естественной структурой, выше по сравнению с их аналогами, испытанными с нарушенной структурой при той же плотности и влажности. При некоторых значениях плотности (по нашим

данным, 1,50–1,53 г/см^3) результаты испытаний не зависят от того, исследуем мы образец с естественным или нарушенным сложением. И, наконец, по мере увеличения плотности песка значения $E_{л.н}$ начинают превышать $E_{л.е}$.

Если по условиям изысканий затруднительно отобрать монолиты песчаных грунтов (например, при отсутствии надежных грунтоотборных устройств, глубоком залегании песков, водонасыщенном их состоянии и т.п.), то для компрессионных испытаний могут быть использованы образцы грунта с нарушенной структурой, которые следует испытывать при плотности и влажности, соответствующих природным. Получаемые в этом случае показатели сжимаемости следует с достаточной для практических целей точностью откорректировать (увеличить или уменьшить) в зависимости от плотности исследуемого песка в соответствии с приведенным выше графиком $K = f(\delta_{ск})$.

7.14. В качестве критерия условной стабилизации осадки принят период времени, в течение которого осадка не превышает 0,01 мм. Для песков, согласно ГОСТ 23908–79, этот критерий равен 4 ч. Вместе с тем имеются выполненные в большом объеме экспериментальные данные, свидетельствующие о более высокой скорости протекания осадок в песках [28]. Бóльшая часть осадки происходит в течение 1 мин после приложения нагрузки, а по истечении 30 мин осадка в основном завершается. Скорость консолидации песков при компрессионном сжатии зависит от ряда факторов.

Абсолютные значения степени консолидации мелких песков под нагрузкой U, %, в течение 1-ой и 30 мин показаны на рис.38. Можно видеть, что до нагрузки 0,5 МПа, которой обычно ограничиваются в производственной практике, за 1 мин реализуется более 90% осадки в плотных и около 80% в рыхлых песках (рис.38,*а*). При бóльших значениях P время стабилизации несколько увеличивается и степень консолидации плотных и рыхлых песков за 1 мин составляет соответственно 85 и 70%. Водонасыщение песков замедляет на 4–7% время их стабилизации. Этому же способствует нарушение структуры грунта (снижение U на 1–2%), что связано с более длительным упорядочением нарушенной структуры. Отсортированные фракции стабилизируются под нагрузкой быстрее, чем полидисперсные природные пески, представляющие собой более сложную в структурном отношении систему. Таким образом, по деформационному поведению искусственно приготовленные монодисперсные образцы отличаются от природных грунтов. Однако эти различия отмечаются лишь в первые 1–2 мин после приложения нагрузки. По истечении 30 мин (рис.38,*б*) в большинстве случаев деформации практически прекращаются, достигая, как правило, 95–100% полной осадки. Из 176 опытов лишь в шести случаях деформации за 30 мин составили 83–88%.

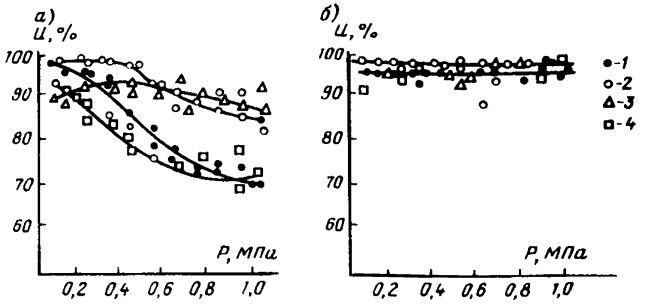


Рис.38. Степень консолидации осадки (U , %) мелких песков при времени действия нагрузки

а – 1 мин; *б* – 30 мин; *1* – песок воздушно-сухой рыхлый; *2* – воздушно-сухой плотный; *3* – водонасыщенный плотный; *4* – водонасыщенный рыхлый

Установленные особенности деформирования песков при компрессионных испытаниях позволяют рекомендовать ускоренную методику для применения в практике инженерно-геологических изысканий. При очередном пересмотре ГОСТ на лабораторное определение сжимаемости следует предусмотреть изменение критерия условной стабилизации осадки, снизив его до 1 ч для всех разновидностей песка.

7.15. Результаты компрессионных испытаний содержат определенные ошибки, источником которых являются нарушение сложения грунта при отборе, его природная неоднородность и погрешность при производстве испытаний.

Нарушения при отборе связаны с присущей пескам характерной особенностью – изменением объема при вдавливании грунтоноса или грунтоотборного кольца. Величина и даже направление объемных изменений зависят от исходной плотности песка. Вдавливание кольца вызывает разрыхление плотного песка и уплотнение рыхлого, сопровождаемое частичным разрушением структурных связей. Поэтому наиболее качественный отбор монолитов песка может производиться только из шурфов. При этом грунтоотборную гильзу следует надевать без заметных усилий на зачищаемый снизу столбик грунта. Этот метод позволяет свести к минимуму погрешности, связанные с отбором.

Природная неоднородность грунта может существенно снижать достоверность единичного определения. Особенно заметно это проявляется при исследовании песков, содержащих тонкие прослойки, линзочки и различные включения. Устранить погрешности, связанные с неоднородностью грунта, невозможно. Единственным способом снижения ошибки осредненного значения E является увеличение числа испытаний и объема испытуемого образца.

Кроме перечисленных выше на точность выполнения компрессионных испытаний оказывают воздействие всевозможные не учитываемые нами случайные факторы. По-разному вырезается образец, зачищается поверхность грунта (возможны небольшие задиры и неровности), загружается кольцо в прибор, опускаются гири на рычаг и т.п. В результате значения модулей деформации, полученные по образцам-близнецам, различаются между собой иногда весьма существенно.

Сведения о точности результатов компрессионных испытаний необходимы для правильного планирования эксперимента и для выбора оптимального метода определения сжимаемости песков в процессе инженерно-геологических изысканий. Статистическая обработка результатов компрессионных испытаний, выполненных в ПНИИС с большой повторностью ($n = 10 \div 15$ раз) на песках различного состава и генезиса, позволила оценить изменчивость песков природного сложения по величине E_K. Как правило, коэффициент изменчивости V в большинстве случаев составляет 10–30% и для предварительной оценки может быть принят равным 17% (показатель точности $\rho = 5\%$). Исключение составляют пески с содержанием дресвы и гравия более 10%. Так, при 15% крупнообломочных включений значение V составляет 35%. При большем содержании включений применение данного метода становится нецелесообразным.

7.16. Полученные по данным компрессионных испытаний модули деформации E_K, как правило, не используются в расчетах оснований промышленных и гражданских зданий и сооружений, так как они существенно отличаются от модулей, рассчитанных по данным полевых штамповых испытаний $E_{шт}$, которые принято рассматривать в качестве эталонных.

Для установления переходного коэффициента $K = E_{шт}:E_K$, необходимого для достоверной оценки сжимаемости песков по данным компрессионных испытаний, в ПНИИС были выполнены сопоставительные исследования на мелких песках различного генезиса [32]. Учитывая, что величина K существенно зависит от плотности сложения исследуемого песка, были изучены его разновидности, находящиеся в диапазоне от рыхлого до плотного сложения ($\rho^I_{ск} = 1{,}47–1{,}71$ г/см^3). Для перехода от результатов компрессионных испытаний к штамповым получены поправочные коэффициенты (табл.15), которыми рекомендуется пользоваться при отсутствии сопоставительных данных по конкретной площадке изысканий.

Таблица 15

e...0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90
K...6,0	5,2	4,1	3,3	2,7	2,2	1,9	1,6	1,3	1,1

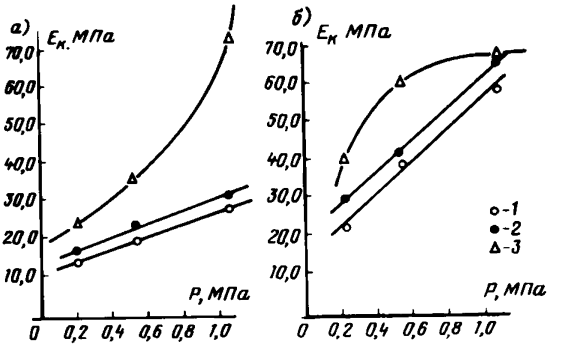


Рис.39. Зависимость модуля деформации песка от способа расчета

а – рыхлого; *б* – плотного сложения; *1* – $0 \div P_i$; *2* – $0{,}5 \div P_i$; *3* – $P_i \div P_{i-1}$

7.17. Рекомендуемые коэффициенты перехода получены при расчете $E_К$ в интервале давлений 0,05–0,3 МПа. Наряду с подобной методикой расчета существуют и другие предложения. Отсутствие четкой регламентации в этом вопросе привело к тому, что модуль деформации по данным компрессионных испытаний может быть рассчитан четырьмя способами: 1) $0 - P_i$; 2) $0{,}025 \times (0{,}05) - P_i$; 3) $P_{быт} - P_i$; 4) $P_i - P_{i-1}$. При этом сама величина P_i также может быть выбрана произвольно, так как в настоящее время признано нецелесообразным возлагать на изыскателей определение расчетного давления на грунты, в связи с чем точная величина P_i, как правило, неизвестна изыскателям. Таким образом, в зависимости от способа расчета модуль деформации по данным одного и того же испытания может меняться в несколько раз. На рис.39 приведены результаты обработки компрессионных испытаний рыхлого *(а)* и плотного *(б)* песков. Можно видеть, например, что $E_К$ рыхлого песка, рассчитанный в интервалах нагрузок 0–0,2 и 0,9–1,0 МПа, равен соответственно 14,0 и 74,0 МПа, т.е. различается более чем в 5 раз. В связи с этим представляется необходимой стандартизация способа расчета $E_К$. Рекомендуется рассчитывать $E_К$ по способу $0{,}05 - P_i$ при $P_i = 0{,}3$ МПа. При необходимости изменить величину P_i следует пользоваться соотношением

$$E_{0,05-P_i} = K E_{0,05-0,3},$$

где $K = a P_i + b$; a и b эмпирические коэффициенты, принимаемые по табл.16.

Таблица 16

Плотность песка,	Коэффициенты	
	а	*в*
Рыхлый	0,10	0,71
Средней плотности	0,11	0,67
Плотный	0,13	0,63

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СЖИМАЕМОСТИ МЕТОДОМ ТРЕХОСНЫХ ИСПЫТАНИЙ

7.18. Описанный в предыдущем разделе метод компрессионных испытаний моделирует лишь частный случай сжимаемости грунта – его деформационное поведение при отсутствии боковых деформаций в условиях роста вертикального давления. Для большинства сооружений промышленного и гражданского строительства с ограниченными по площади фундаментами (ленточными и столбчатыми) такое напряженно-деформированное состояние грунта не характерно. Применение этого метода может приводить к парадоксальным результатам – к относительному снижению сжимаемости при увеличении давления. Так, в интервале давлений 0–1,0 МПа все пески независимо от их состава, начальной плотности и степени водонасыщения становятся слабосжимаемыми.

Метод определения сжимаемости при трехосных осесимметричных испытаниях в стабилометре свободен от указанных недостатков и является наиболее универсальным методом исследования деформационных свойств грунтов. Он позволяет определять не только модуль деформации, но и коэффициенты бокового расширения μ и бокового распора ξ.

7.19. В настоящее время наибольшее распространение получили стабилометры двух типов – так называемые объемные и радиальные (рис.40). В первом случае на образец, помещенный в резиновую оболочку, передается всестороннее давление, во втором – только боковое – радиальное. Оно обычно сочетается с вертикальным давлением, передаваемым на торец образца с помощью поршня.

Существует несколько схем управления загружением образца при трехосных испытаниях.

В соответствии с правилами, изложенными в [31], заключенный в стабилометр образец подвергают боковому обжатию жидкостью, заполняющей камеру прибора, и вертикальному давлению, которое передается на образец через поршень прибора. В процессе испытания вертикальную нагрузку увеличивают до заданного давления, одновременно по специальным измерительным

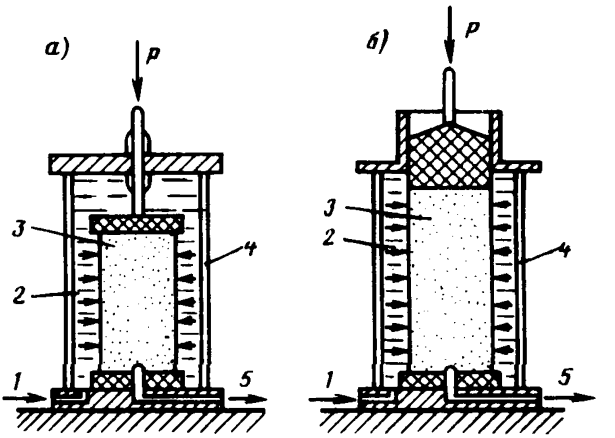


Рис.40. Схема стабилометров
а – объемного сжатия; *б* – радиального сжатия; *1* – канал для подачи в камеру жидкости под давлением; *2* – камера гидростатического обжатия; *3* – образец; *4* – плексигласовая цилиндрическая стенка; *5* – дренажный выпуск

приборам наблюдают за линейными вертикальными деформациями образца, а также за давлением жидкости, создающим боковое обжатие образца и исключающим его боковое расширение. Данная схема испытаний аналогична компрессионной методике и обладает всеми присущими ей недостатками.

Значительными преимуществами обладают испытания, проводимые по схемам, которые применяются в ДИИТ, Гидропроекте и др. Испытания проводятся в два этапа. На первом этапе производится гидростатическое обжатие образца ($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$, где σ_1 – вертикальное, а σ_2 и σ_3 – боковое давление) до заданного уровня среднего нагружения σ_0. На втором этапе производится девиаторное нагружение образца до его разрушения. Испытания второго этапа выполняются в двух вариантах. В первом случае, называемом испытанием на сжатие, разрушение образца производится увеличением напряжения σ_1 при условии $\sigma_2 = \sigma_3 = const$. во втором – испытании на удлинение – увеличивается боковое давление при $\sigma_1 = const$. Первый случай является более употребительным.

7.20. Независимо от принятой схемы нагружения испытания могут проводиться как с консолидацией, так и без нее. При наличии или отсутствии консолидации при предварительном уплотнении образца испытания называются соответственно консолидированными и неконсолидированными. Если консолидация образца происходит в ходе испытаний, то последнее называется дрени-

рованием, при отсутствии консолидации – недренированным. В зависимости от характера подготовки и проведения различают следующие виды испытаний: неконсолидированно-недренированное (НН), консолидированно-недренированное (КН), неконсолидированно-дренированное (НД) и консолидированно-дренированное (КД). Основными являются схемы НН и КД, позволяющие получать параметры, соответствующие наименее и наиболее благоприятным условиям работы основания.

7.21. Способ расчета модуля деформации по данным стабилометрических испытаний зависит от принятой схемы испытаний. При испытаниях в условиях отсутствия бокового расширения модуль деформации, так же как и при компрессионных испытаниях, определяют в соответствии с диаграммой сжатия $\varepsilon_z = f(\sigma_1)$ по формуле

$$E = \frac{\Delta \sigma_1}{\Delta \varepsilon_z},$$

где $\Delta \varepsilon_z$ – приращение относительной вертикальной деформации;
$\Delta \sigma_1$ – приращение вертикального давления.

При испытаниях на сжатие при условии $\sigma_2 = \sigma_3 = \text{const}$ модуль деформации рекомендуется рассчитывать по формуле Шлейхера с учетом соотношения высоты и диаметра испытуемого образца. При обычно применяемом соотношении $H:Д = 2$.

$$E = (1 - \mu^2)\, 0{,}82 d\, \frac{\Delta \sigma_1}{\Delta \varepsilon_1},$$

где $\Delta \varepsilon_1$ – вертикальная деформация, соответствующая $\Delta \sigma_1$, на участке девиаторного нагружения образца.

По данным выполненных в ПНИИИС исследований, коэффициент перехода от модуля деформации по стабилометру к результатам штамповых испытаний ($K = E_{шт}/E_{стаб}$) следует определять по формуле

$$K = 1{,}66 - 11{,}2\, \sigma_3,$$

где σ_3 – всестороннее давление при стабилометрических испытаниях, МПа.

ПОЛЕВЫЕ МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ ДЕФОРМАЦИОННЫХ СВОЙСТВ

7.22. Деформационные свойства песков существенно зависят от степени сохранности структурных связей исследуемого грунта. Выше было показано, что сжимаемость песка с естественной структурой значительно отличается от сжимаемости образца с нарушенной структурой при одной и той же плотности и влажности.

Вместе с тем известно, что пески обладают преимущественно хрупкими необратимыми структурными связями, легко нарушаемыми в процессе отбора, транспортировки и подготовки к лабораторным анализам. Все это затрудняет, а порой делает невозможным исследование песков естественного сложения в лабораторных условиях. Достоинства полевых методов исследования общеизвестны: это и сокращение сроков изысканий за счет получения строительных характеристик сразу же в ходе проведения полевых работ, и получение информации о свойствах значительной по объему толщи грунтов, и достоверность результатов исследований, полученных в условиях естественного залегания, и многое другое. Не случайно объем применения полевых методов определения сжимаемости грунтов возрос за последние годы в 1,5–1,8 раза, в то время как по таким традиционным видам инженерно-геологических работ, как бурение скважин и проходка шурфов, увеличение объемов составляет всего 1,2–1,3 раза.

7.23. К числу методов определения деформационных свойств грунтов в полевых условиях относятся штамповые и прессиометрические испытания в шурфах и скважинах. Они могут выполняться на песках любой крупности, плотности и степени водонасыщения независимо от содержания в них крупнообломочных включений. Основной задачей испытаний грунтов на сжатие является определение модуля общей деформации, а также (преимущественно по данным штамповых испытаний) установление предела пропорциональности (линейной зависимости осадки от нагрузки) и предела несущей способности (устойчивости) грунтов. Испытания проводятся в шурфах или скважинах и заключаются в приложении нагрузок, возрастающих по ступеням от начала до конца испытаний, и измерении осадок по ступеням нагрузок с учетом времени их действия.

7.24. Расположение пунктов испытания грунтов на сжатие рекомендуется назначать по данным зондирования, на основе общей характеристики инженерно-геологических условий площадки. Результаты отдельных испытаний в совокупности дают характеристику сжимаемости грунтов инженерно-геологического элемента. Исходя из этого точки испытаний должны располагаться в пределах слоя с близкими значениями показателей зондирования. Не рекомендуется производить испытания на сжатие, если в пределах сжимаемой штампом зоны (1,5–2 диаметра) или по длине прессиометра отмечается резкое изменение показателя зондирования.

ИСПЫТАНИЯ СТАТИЧЕСКИМИ НАГРУЗКАМИ НА ШТАМПЫ

7.25. Испытания грунтов статическими нагрузками относятся к числу наиболее традиционных видов полевых опытных работ. Они широко используются в практике инженерно-геологических изысканий. Основные требования к проведению испытаний изло-

жены в справочной и методической литературе, а также регламентируются ГОСТ 12374–77 "Грунты. Метод полевого испытания статическими нагрузками". Вместе с тем ряд вопросов, связанных с методикой проведения испытаний и обработки результатов, нуждается в дополнительной разработке и уточнении. Этим вопросам и уделяется основное внимание в данном разделе, в то время как сведения о теоретических основах метода штамповых испытаний излагаются в самом сжатом виде.

7.26. Определение деформаций грунтов при действии на них внешней нагрузки является важнейшим вопросом механики грунтов, на решении которого базируется современный, наиболее прогрессивный метод проектирования фундаментов по предельным деформациям (осадкам) оснований. Испытания по определению деформационных свойств грунтов сводятся к нахождению коэффициента пропорциональности между напряжениями и деформациями, т.е. к нахождению модуля деформации.

При небольших изменениях напряжений (до 0,5–0,7 МПа) к песчаным грунтам с полным основанием можно применять теорию линейно-деформируемых тел. В этом случае, как было показано Н.М.Герсевановым, для определения напряжений применимы решения теории упругости. Согласно теории упругого полупространства, упругая осадка грунта под штампом определяется выражением

$$S_y = \frac{\omega p \sqrt{F}}{C},$$

где ω – коэффициент формы;
F – площадь штампа;
p – удельная нагрузка на грунт;
C – коэффициент упругого полупространства

$$C = \frac{E}{1-\mu^2},$$

где E – модуль упругости;
μ – коэффициент Пуассона.

Отсюда получена формула Шлейхера, применяемая для расчета модуля общей деформации:

$$E_0 = \frac{p b \omega (1-\mu^2)}{S},$$

где b – ширина подошвы штампа или его диаметр;
S – осадка штампа.

7.27. Применение приведенных выше решений возможно не во всем диапазоне передаваемых на грунт давлений. В процессе испытания грунта жестким штампом при повышении нагрузки в грунте наблюдаются переходящие одна в другую напряженные фазы, названные Н.М.Герсевановым фазами уплотнения, сдвигов и выпирания (рис.41). На рисунке показаны характерные для песков

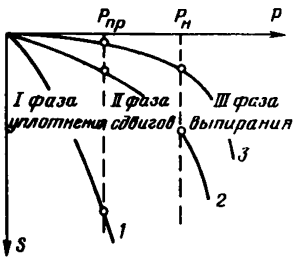


Рис.41. Зависимость $S=f(P)$ для песков *1* – рыхлых; *2* – среднеплотных; *3* – плотных

графики зависимости осадки от нагрузки. Для рыхлых песков предельные состояния практически не фиксируются. У среднеплотных песков прямолинейный в начальной части график постепенно увеличивает свою кривизну с ростом нагрузки. Для плотного песка типичны два разнонаклонных участка прямых, соединенных коротким криволинейным участком. Следует отметить условность предложенной схемы. Вид графика $S=f(P)$ зависит от относительного заглубления штампа, его размера и т.п.

7.28. Испытания грунтов штампами производятся ступенями давления, величина которых зависит от гранулометрического состава и плотности исследуемых песков и регламентируется табл.2 ГОСТ 12374–77. Там же указано время условной стабилизации осадки, т.е. время практического затухания деформаций грунта в основании штампа. За условную стабилизацию осадки принимают приращение осадки штампа, не превышающее 0,1 мм за 0,5–2,0 ч. Минимальное время стабилизации (0,5 ч) принимается для песков крупных, средней крупности и мелких (неводонасыщенных), максимальное (2 ч) – для пылеватых водонасыщенных песков. Вместе с тем имеются предпосылки для значительного уменьшения времени проведения испытаний песков штампами.

Применение ускоренной методики основывается на присущей пескам способности к быстрому уплотнению в первой фазе деформирования. Выполненные исследования [28] показали (рис.42), что для нагрузки, соответствующей пределу пропорциональности ($P_{пр} < 0{,}15$ МПа), доля мгновенных деформаций (реализуемых в момент нагружения) в плотных песках составляет 77–84%. Некоторое уменьшение величины мгновенных осадок с ростом напряжений происходит в этом интервале нагрузки за счет пока еще незначительного проявления сдвиговых деформаций. При нагрузках, превышающих $P_{пр}$, начинают развиваться пластические зоны и доля мгновенных осадок падает до 52–64% и далее с ростом напряжений до 21–37%. Указанные закономерности в меньшей степени проявляются в рыхлых песках, деформирование которых не сопровождается наступлением ярко выраженного предельного состояния.

7.29. Отмеченная особенность деформирования песков позво-

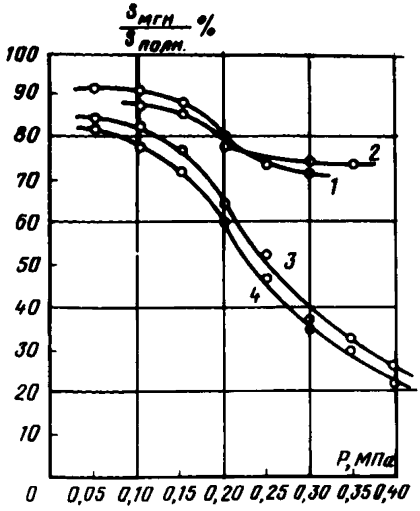


Рис.42. Изменение соотношения мгновенных и полных деформаций при увеличении нагрузки на штамп

1, 2 – рыхлый песок; *3, 4* – плотный песок; *1, 3* – площадь штампа 5000 см^2; *2, 4* – площадь штампа 2500 см^2

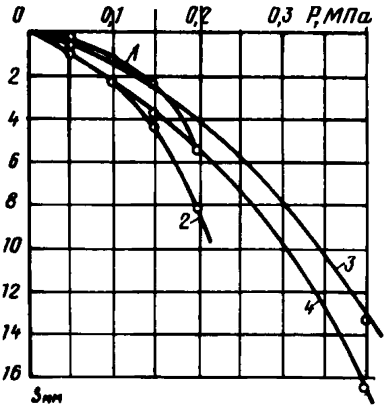


Рис.43. Зависимость осадки штампа от методики испытаний песков

1, 2 – быстрая методика; *3, 4* – длительная методика; *1, 3* – площадь штампа 2500 см^2; *2, 4* – площадь штампа 5000 см^2

ляет в ряде случаев при испытании маловлажных песков использовать быструю методику испытаний, которая была разработана и применялась в ПНИИИС. Она заключается в кратковременном обжатии песка нагрузкой, равной 0,05 МПа, в течение 20–30 мин с последующим условно-мгновенным нагружением штампа до конечной нагрузки, не превышающей предел пропорциональности. В ходе нагружения при прохождении нагрузки через промежуточные ступени (0,1; 0,15 МПа и т.д.) фиксируются мгновенные осадки, соответствующие этим напряжениям. Сопоставление результатов, полученных по быстрой методике, с результатами длительных испытаний (время выдержки на каждой ступени нагрузки 24 ч) свидетельствуют о том, что в пределах прямолинейного участка графика $S = f(P)$ значения модулей деформации близки между собой независимо от методики испытаний (рис.43). Однако предельное состояние грунта достигается раньше при использовании быстрой методики.

7.30. При производстве массовых испытаний часть опытов (до 50%) рекомендуется выполнять по ускоренной методике. В этих случаях за условную стабилизацию осадки следует принимать приращение осадки штампа, не превышающее 0,1 мм, за время, мин:

для песков любой крупности и влажности (кроме пылеватых водонасыщенных) 10
для пылеватых водонасыщенных 20

К достоинствам ускоренных методов испытаний помимо экономических следует отнести возможность проведения опыта при незначительной амплитуде изменения температуры и влажности воздуха, что очень важно при проведении прецизионных исследований. Опыты можно проводить в течение дневного времени, что значительно облегчает организацию работ и позволяет повысить их качество (как правило, качество проводимых ночью наблюдений более низкое).

7.31. Точность определения E по данным штамповых испытаний является максимальной точностью, которую могут достигнуть изыскатели, так как, по общему признанию специалистов, метод штамповых испытаний является эталонным методом изучения сжимаемости грунтов. Определение модуля деформации остальными методами базируется на использовании эмпирических корреляционных зависимостей между $E_{шт}$ и аналогичными показателями, полученными другими методами. Однако точность E, полученных по корреляции, всегда ниже точности E, измеренных прямым способом – методом штамповых испытаний. Это связано с собственными ошибками других методов, а также с наличием между ними и методом штампов не функциональной, а корреляционной (содержащей элемент случайности) взаимосвязи. Таким образом, точность определения модуля деформации песков по данным полевых штамповых испытаний является предельно достижимой точностью измерения этого параметра.

7.32. Источником погрешностей определения E могут явиться ошибки трех видов:

ошибки измерений, связанные с определением практически всех параметров, входящих в известную формулу Шлейхера;

ошибки технологические, зависящие от качества подготовки

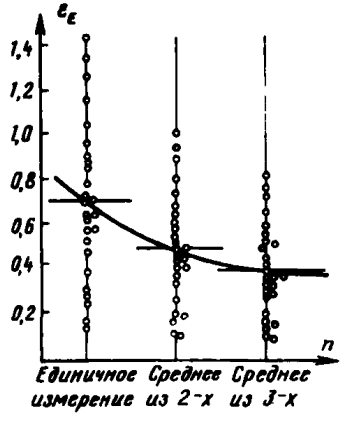


Рис.44. Зависимость относительной погрешности определения модуля деформации от количества повторных испытаний

поверхности грунта, возможных перекосов колонны труб, передающих давление на штамп, и т.п.;

природная неоднородность грунта.

Для установления влияния всех видов ошибок на точность определения E на протяжении ряда лет в ПНИИИС проводились исследования различных по составу и генезису песков. Испытания проводили более чем на 20 площадках, на каждой из которых выполняли не менее трех совершенно идентичных испытаний песков штампами площадью 2500–5000 см^2. Расстояния между точками испытаний принимали минимально возможными по технологическим условиям (~ 3,5 м). Оценку относительной погрешности результатов измерения E производили при доверительной вероятности $\alpha = 0{,}85$ по известной формуле

$$\varepsilon_E = \frac{\Delta E}{E} = \frac{\frac{t_\alpha \sigma_E}{\sqrt{n}}}{F} \quad \frac{t_\alpha}{V\sqrt{n}},$$

где ΔE – абсолютная погрешность определения E при $\alpha = 0{,}85$;

$\bar{E}$ – среднее значение E по площадке;

t_α – квантиль распределения Стьюдента;

V – коэффициент изменчивости;

n – число испытаний на площадке.

Результаты испытаний приведены на рис.44, где показана относительная погрешность ε_E отдельного измерения, а также среднего из двух и трех измерений. Приведенные данные свидетельствуют о существенном разбросе значений модуля деформации даже при измерении его в идентичных условиях, практически в одном пункте, на одном и том же грунте. Так, относительная погрешность отдельного измерения не была ниже 0,14, достигая при исследовании морских и некоторых разновидностей аллювиальных песков 1,08 и даже 1,47. При увеличении количества опытов в одном пункте точность среднего арифметического E возрастает. Однако даже при испытаниях с трехкратной повторяемостью относительная погрешность среднего результата все еще остается высокой, изменяясь от 0,09 до 0,85 при среднем значении 0,41.

Значения коэффициента изменчивости величины E, по данным выполненных исследований, находятся в широком диапазоне (от 5 до 50%). В большинстве случаев V колеблется от 15 до 35%, составляя в среднем 26%. Эту величину и следует принимать для предварительной оценки изменчивости песков по модулю деформации.

7.33. В ведущих изыскательских организациях Советского Союза для испытания грунтов штампами в шурфах и в скважинах используются установки более чем 10 типов. Практически все это оборудование изготовляется кустарно, малыми сериями и имеет много модификаций в зависимости от технических возможностей той или иной организации. Отсутствие серийно изготовляемых установок вынуждает изыскателей изготовлять их самостоятель-

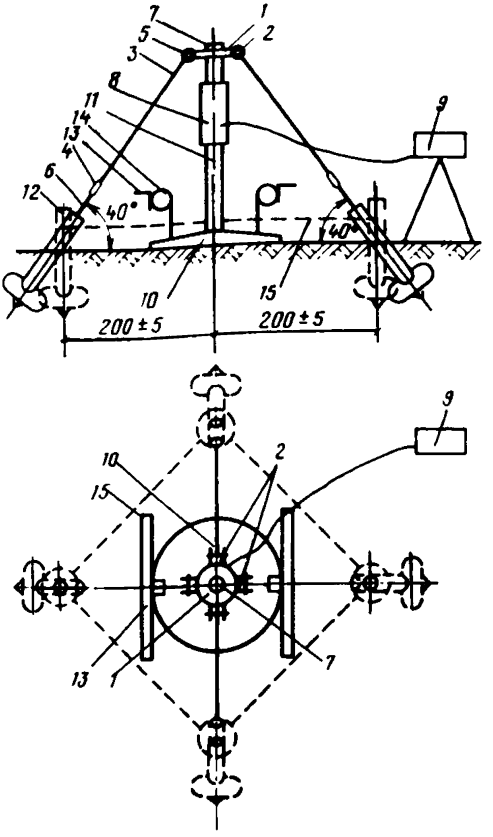
Таблица 17

№ п.п.	Состав оборудования	Тип установки				
		для испытаний в шурфах			для испытаний в скважинах	
		с винтовыми анкерными связями	с упором в стенки шурфа	с грузовой платформой	канатно-рычажная	гидравлическая (пневматическая)
1	Штамп площадью, $см^2$	5000 – 1 шт.		2500 – 1 шт.	600 – 1 шт.	
2	Домкрат грузоподъемностью, т	30–50 – 1 шт.		–	–	10 – 1 шт.
3	Насосная станция (баллон со сжатым воздухом) с манометром на рабочее давление, МПа	10,0–40,0 – 1 шт.		–	–	10,0–20,0 – 1 шт. (баллон 3,0–15,0 МПа)
4	Прогибомеры	3 шт.				
5	Рукава (шланги) на давление 10,0–40,0 МПа	Длиной 15–20 м		–	–	Длиной 15–20 м
6	Металлическая реперная система	Сваи – 4 шт., ригели – 2 шт.				
7	Трубы-стойки диаметром 219 мм из отдельных звеньев длиной, м	0,5 и 1,5 – по 1 шт.; 3,0 и 4,0 – по 2 шт.				0,5; 1,5; 3,0; 4,0 – по 1 шт.
8	Сваи винтовые анкерные с диаметром ствола 76–89 мм и диаметром лопасти 300–350 мм, длиной 2–3 м	6–10 шт.	–	–	4–6 шт.	2 шт.

Продолжение табл.17

№	Состав оборудования	Тип установки				
		для испытаний в шурфах			для испытаний в скважинах	
		с винтовыми анкерными связями	с упором в стенки шурфа	с грузовой платформой	канатно-рычажная	гидравлическая (пневматическая)
9	Главная балка (ферма) на сосредоточенную нагрузку, т	30–50 – 1 шт.	–	–	10 – 1 шт.	
10	Соединительные балки на нагрузку, т	15–25 – 2 шт.	–	–		5–2 шт.
11	Щиты (распределительная крепь) размером, м	1х2 – 2 шт.		–		–
12	Грузовая платформа грузоподъемностью, т	–	–	30–50 – 1 шт.	–	–
13	Тарированный груз	–	–	Железобетонные элементы, чугунные чушки, рельсы и т.д. – по потребности	Гири массой 1–2 кг – по потребности	–
14	Опорная траверса с металлическими подкосами на нагрузку, т	–	30–50 – 1 шт.	–	–	–

Рис.45. Принципиальная схема УС



но, в связи с чем представляется целесообразным привести сведения о составе и технических параметрах основных типов установок (табл.17).

В последние годы в ПНИИИС разработаны, изготовлены и внедрены в производство новые высокопроизводительные технические средства для определения сжимаемости грунтов в полевых условиях. В связи с тем, что сведения об этом еще не получили широкого освещения в методической литературе, ниже приводится описание с краткой технической характеристикой новых установок и оборудования.

7.34. Упорная система УС предназначена для передачи нагрузок свыше 30 т по схеме работы натурного фундамента. Система УС включает (рис.45) оголовок в виде жесткого диска *1* с проушинами *2*, оттяжки в виде тросов *3* с петлями на концах *4*; соединительные элементы – штыри *5*, талрепы *6*, гайки *7*. Прочее оборудование – гидродомкрат *8*, насосная станция *9*, штамп (свая) *10*,

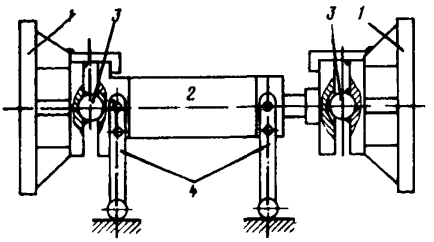


Рис.46. Принципиальная схема штампа распорного безанкерного
1 – плита; *2* – домкрат; *3* – шарнир; *4* – подставка

стойка *11*, анкеры *12*, реперная система *13* и прогибомеры *14* – типовое. Ход плунжера домкрата должен быть не менее 200 мм, анкеры располагают соосно с оттяжками, оттяжки располагают симметрично в плане. Число анкеров и оттяжек зависит от вида и состояния грунта, конструкции анкера и требуемой нагрузки. При вертикальных анкерах их скрепляют трубчатыми распорками *15* над поверхностью грунта или ставят подпорные плиты перед анкерами.

7.35. Штамп распорный безанкерный для испытания грунтов в шурфах не требует специальной анкеровки, имеет малую массу, быстро монтируется одним-двумя исполнителями и обеспечивает получение результатов с двойной повторяемостью. Последнее может служить надежным контролем за качеством работ в ходе изысканий и дает возможность исключения грубых ошибок и аномальных, нетипичных результатов. Применение штампа безанкерного позволяет отказаться от транспортирования анкерных свай, тяжелой и металлоемкой фермы, которая применяется в существующих установках, сократить время испытаний, так как из состава работ исключаются наиболее трудоемкие процедуры – завинчивание анкерных свай и установка фермы. Штамп безанкерный может быть использован в местах, недоступных для штампов существующих конструкций: в расчистках, траншеях, на косогорах, в готовых выработках.

Техническая характеристика УС

	Нагрузка, т	
	30	**50**
Общая масса УС, кг	34	62
Масса наибольшего элемента, кг	12	18
Время монтажа (демонтажа), мин	11(10)	21(13)
Число рабочих 2-го разряда	1	1

Штамповая установка состоит из двух съемных плит, вдавливаемых с помощью домкрата в противоположные стенки шурфа, устройства, фиксирующего давление на грунт и деформации грун-

тов в процессе испытаний (рис.46). При замене круглых плит прямоугольными она может быть использована для выполнения сдвига методом выпирания. Данной конструкцией предусмотрен шарнирный переход от силового домкрата к штампам, что позволяет избежать перекосов из-за неравномерных осадок штампов или качества точного монтажа оборудования.

Техническая характеристика

Штамповые плиты площадью, $см^2$	600, 1000, 2500
Предельное давление на грунт, МПа	0,5–0,8
Габариты, мм:	
ширина	500
высота	500
длина	800
Масса, кг	70–80

При использовании винтовых домкратов вместо гидравлических общая масса установки может быть снижена более чем вдвое.

В процессе внедрения установки наряду с использованием штампа безанкерного выполнялись контрольные испытания штампами существующих конструкций площадью 2500 и 5000 $см^2$. На отдельных объектах испытания проводились с 2- и 4-кратной повторяемостью. Данные сопоставительных испытаний показаны на рис.47. Каждая точка на графике является результатом осреднения всех опытов, выполненных в одном пункте.

7.36. Штамп распорный для испытания грунтов в скважинах и в массиве конструкции Л.С.Амаряна разработан в трех вариантах, различающихся системой нагружения: механический (тип ЛПМ), пневматический (ЛПП) и гидравлический (тип ЛПГ).

Наиболее широко используется установка типа ЛПМ. Она состоит из корпуса *1* двутаврового сечения, составленного из двух швеллеров, сложенных внешними плоскостями стоек (рис.48). В теле корпуса *1* располагается цилиндрический редуктор выдвижения распорных штампов *2* и *3* с приводом от тяговой рейки *4*, свинчиваемой посредством резьбы с внутренней штангой *5*, проходящей в наружной штанге *6*. Внутренняя штанга *5* связана с рейкой *7* нагрузочного устройства *8*, состоящего из цилиндрического редуктора *9*, штурвала *10* с тросиком *11* для подвески грузов *12*.

При приложении груза *12* на тросик *11* усилие передается через штурвал *10* на шестерни редуктора *9*, рейку *7* со штангой *5* и рейкой *4*, на шестерни *13* рабочего зонда прессиометра и на зубчатые рейки *14* его штампов *2* и *3*. Таким образом, вся внешняя нагрузка передается поровну на штампы *2* и *3*. После этого производят измерение перемещений штампов и соответствующих им деформаций грунта. Выполненные сопоставительные испытания свидетельствуют о хорошей сходимости полученных результатов с данными обычных штампов площадью 2500 и 5000 $см^2$.

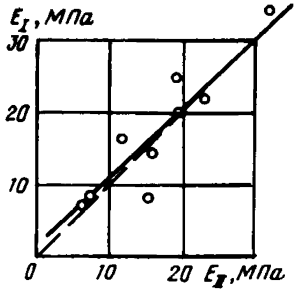


Рис.47. Сопоставление модулей деформации, определенных по стандартной методике (E_I) и с помощью штампа безанкерного (E_{II})

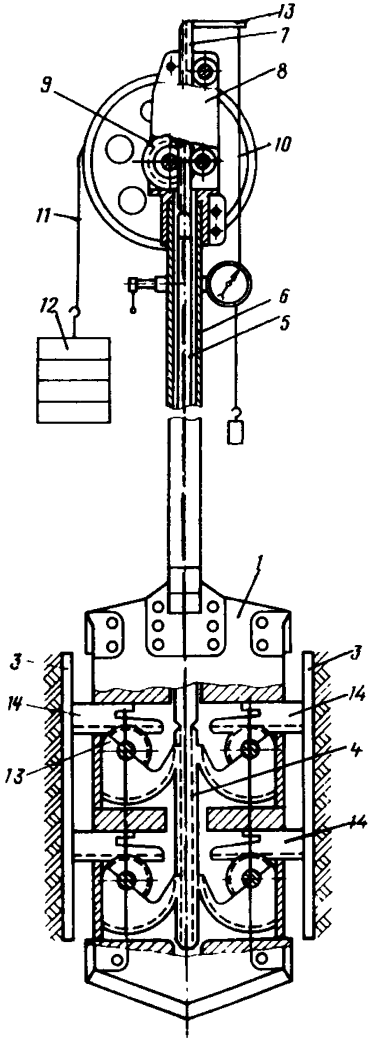


Рис.48. Конструктивная схема механического прессиометра типа ЛПМ

7.37. Исследования сжимаемости грунтов в скважинах боковым давлением с помощью прессиометров производятся с целью нахождения коэффициента пропорциональности между напряжениями и деформациями, т.е. для определения модуля деформации. При расчете модуля деформации в пределах нагрузок, аналогичных показанным выше (в разделе о штамповых испытаниях), принимается теория линейно-деформируемых тел и используются решения теории упругости. Так же как и при штамповых испытаниях, давление прессиометром на стенки скважин вызывает в грунтах появление деформаций, основные фазы которых и их развитие во времени аналогичны описанным выше.

Определение модуля деформации грунтов по результатам прессиометрических испытаний с использованием решений теории упругости зависит от того, какая модель принимается для описания свойств грунтовой среды.

До недавнего времени наиболее широко использовались решения Лямэ, согласно которым грунт рассматривается как изотропная среда в предположении, что среда одинаково сопротивляется сжатию и растяжению, т.е. физически изотропна. В соответствии с законом Гука

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} - \mu \frac{\sigma_2}{E} - \mu \frac{\sigma_3}{E},$$

откуда получается известная формула Лямэ

$$E = (1+\mu) r \frac{\rho}{\Delta r},$$

где r – радиус скважины,
ρ – давление на грунт.

7.38. Реальные песчаные грунты не соответствуют исходным предпосылкам теории упругости, так как обладают анизотропией типа "сжатие–растяжение" и "сжатие–разгрузка", поэтому модуль деформации грунта, полученный по результатам прессиометрических испытаний с помощью формулы, не имеет вкладываемого в это понятие физического смысла.

Более точное решение для определения модуля деформации по результатам прессиометрических испытаний получено на основе теории, учитывающей различную способность грунтов к восприятию сжимающих и растягивающих напряжений. Экспериментальные исследования показывают, что модуль деформации при нагрузке и разгрузке различается до 10 раз и более. Наличие анизотропии типа "сжатие–растяжение" подтверждается испытанием грунта на сжимаемость и растяжение: модуль при сжатии в 2–10 раз отличается от модуля при растяжении. Влияние анизотропии сказывается и на распределении напряжений.

Способ учета физической анизотропии приведен в прил.3 к ГОСТ 20276–74.

Следует отметить, что наряду с физической анизотропией на результаты прессиометрических испытаний влияет и так называемая геометрическая анизотропия, т.е. различная сжимаемость по горизонтали и по вертикали. Этот вид анизотропии характерен для некоторых видов песчаных пород, обладающих слоистостью, например песков аллювиального и морского генезиса. Однако имеются исследования, показывающие, что различия в модуле деформации в горизонтальном и вертикальном направлении, достигающие даже 2–3 раз, не приводят к существенным расхождениям в соотношении между $E_{\text{шт}}$ и $E_{\text{прес}}$.

7.39. Существует несколько конструкций прессиометров, которые можно сгруппировать по следующим признакам:

по типу оболочки рабочей камеры – с эластичной и жесткой оболочками;

по системе создания давления и контроля деформаций – с гидравлической и электровоздушной системами;

по количеству секций в рабочей камере – трехсекционные и односекционные.

Независимо от типа прессиометры включают следующие основные узлы:

камеру, помещаемую в скважину;

устройство для создания и измерения давления в камере;

устройство для измерения радиальных перемещений оболочки прессиометра;

приспособления для фиксации камеры на глубине испытания.

Прессиометр должен иметь постоянную жесткость оболочки камеры в пределах ее длины. Под длиной камеры прессиометра понимается расстояние между концевыми стаканами, закрепляющими оболочку на корпусе прибора. Допускается применение камер из трех секций. При этом общая длина этих камер должна быть не менее 4 внешних диаметров. Рекомендуется производить бронирование эластичной оболочки камеры защитной жесткой рубашкой. В этом случае тарировку прессиометра необходимо производить вместе с рубашкой. Конструкцией прессиометра должны быть предусмотрены приспособления, предохраняющие от выдавливания грунта в скважину над верхним торцом прессиометра.

Измерение давления, создаваемого в камере прессиометра, должно производиться образцовыми манометрами. Измерение радиального перемещения оболочки камеры прессиометра осуществляется гидравлическим методом по изменению объема жидкости, расходуемой на расширение оболочки, или электрическим методом путем непосредственного определения изменения радиуса камеры в нескольких точках дистанционными датчиками.

Измерение радиальных перемещений оболочки электрическим методом должно производиться не менее чем в шести точках, расположенных равномерно в средней части рабочей камеры в пределах 1/3 ее длины.

Наиболее полно указанным требованиям отвечают прессиометры Л.Менара, конструкции Фундаментпроекта, ВСЕГИНГЕО и НИИОСП техническая характеристика которых приводится в табл.18.

7.40. Полученные в результате прессиометрических испытаний значения модулей деформации $E_{пр}$ существенно отличаются от данных штамповых испытаний $E_{шт}$. Для расчета деформаций по величине $E_{пр}$ используется корректирующий коэффициент K. В соответствии с ГОСТ 20276–74 коэффициент K определяется, как правило, по результатам сопоставительных параллельных испыта-

Таблица 18

Точность и конструкция прессиометра	Максимальное давление на породу, МПа	Точность измерения давления от верхнего предела измерений, %	Точность измерения деформации, мм	Максимальная глубина проведения испытаний, м	Диаметр скважины, мм	Опробуемый интервал глубины скважины, мм	Масса прибора, кг	Область применения прибора
			Трехкамерные					
Прессиометры Л.Менара	2,0–50,0	1–4	0,0001	50	32–115	450–600	До 100	Рыхлые и скальные породы в зависимости от конструкции
Прессиометр ГПИ Фундаментпроекта ПС-1	0,8	±4	±1	15	110	600	До 100	Песчано-глинистые породы
Прессиометр Уральского политехнического института П-89	0,5	±4	Нет данных	5	90–100	400	20	То же
			Однокамерные					
Прессиометр ИГП-21 конструкции СКБ ВСЕГИНГЕО	2,4	±4	±3	25	108–112	500	8,5	Песчано-глинистые и обломочные (до 30% крупных включений) породы
Макет малого прессиометра ВСЕГИНГЕО	0,5	±1,5	Нет данных	5	35–50	550	10	Песчано-глинистые породы
Прессиометр НИИОСП ПС-46	25,0	±3–5	0,0003	5	46	750	3,5	Скальные породы

ний данной разновидности грунта штампом и прессиометром. Для проектирования оснований и фундаментов зданий и сооружений II–IУ классов величину коэффициента K при медленном режиме испытания грунтов прессиометром допускается принимать по таблице прил.2 или вычислять по формуле прил.3.

Нахождение величины K представляет значительные трудности в связи с природной неоднородностью исследуемого грунта, а также ввиду случайных ошибок эксперимента. По данным испытаний, выполненных более чем на 20 площадках на песках различного генезиса и состава [29] с 3- и 7-кратной повторяемостью, коэффициент изменчивости V величины $E_{пр}$ составляет в среднем 28%, изменяясь в диапазоне 4–52%. Важно подчеркнуть, что максимальные значения отмечаются в верхней части разреза на глубине 1,5–2 м, соответствующей глубине заложения стандартных фундаментов. Это вызвано влиянием почвенных процессов (наличием горизонтов вмывания и вымывания), различиями в увлажнении из-за микронеровностей рельефа и т.п.

Анализ проведенных исследований свидетельствует о зависимости K от коэффициента пористости исследуемых песков. Для рыхлых разновидностей он минимален и приближается к единице, для плотных его величина возрастает до 5 и более. На рис.49 каждая точка представляет собой обобщение испытаний, выполненных с 3- и 7-кратной повторяемостью. Для этих же опытов приведены значения K в соответствии с рекомендациями ГОСТ 20276–74 (графики 2 и 3). Можно видеть, что рекомендуемые в прил.2 (график 2) значения K отвечают лишь определенной плотности сложения песков и не могут быть использованы для других по плотности разновидностей, так как это может приводить к

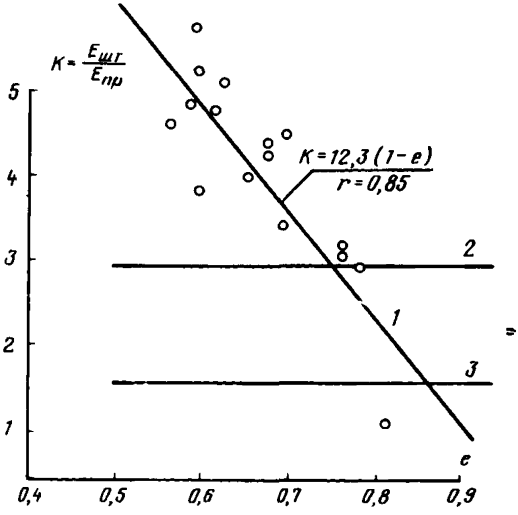


Рис.49. Значения коэффициента перехода $K = E_{шт}/E_{пр}$ в зависимости от коэффициента пористости песков

1 – по экспериментальным данным; *2* – по прил. 2 к ГОСТ 20276–74; *3* – по прил. 3 к ГОСТ 20276–74

ошибкам в ±1,5 раза. Еще большие ошибки возможны при использовании K, рассчитанного в соответствии с рекомендациями прил.3 (график 3).

Таким образом, для перехода от результатов прессиометрических испытаний к штамповым рекомендуется использовать коэффициенты:

$$K = 12{,}3 \quad (1-e); \quad r = 0{,}85,$$

где e – коэффициент пористости песка.

КОСВЕННЫЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ДЕФОРМАЦИОННЫХ СВОЙСТВ

7.41. Прямое определение показателей сжимаемости песков полевыми и лабораторными методами все еще остается достаточно трудоемким видом исследований. Оно связано с проходкой выработок и производством сложных экспериментов. Поэтому выполнение прямых определений требуется не во всех случаях. При проведении изысканий под сооружения II–IУ классов нормативными документами допускается использование косвенных методов оценки величины E. Применение косвенных методов основано на установлении корреляционных зависимостей между показателем сжимаемости и другими характеристиками, определение которых не представляет большой сложности.

Подобный подход реализован СНиП II-15-74, в котором приводятся таблицы, устанавливающие взаимосвязь между крупностью, коэффициентом пористости и модулем деформации (табл.1 прил.2) и коэффициентом пористости и показателями зондирования (табл.5). На основе этих данных нетрудно рассчитать зависимость между E, с одной стороны, и показателями $P_{с.к}$ (сопротивление погружению конуса при статическом зондировании) и $P_д$ (установное динамическое сопротивление погружению конуса при динамическом зондировании), – с другой.

Опыт последних двух десятилетий, прошедших со времени получения материалов, положенных в основу указанных выше документов, дает основание для критического пересмотра ряда положений. Данные о модулях деформации в СНиП II-15-74 воспроизведены без всяких изменений из СНиП 1962 г. В те годы метод штамповых испытаний применялся в ограниченных объемах единичными организациями. Отсутствовали нормативные документы, регламентирующие правила выполнения испытаний. Первый ГОСТ на статические испытания грунтов вышел в 1966 г. (в 1977 г. он был пересмотрен). Оборудование было громоздким и несовершенным. Все это, естественно, отражалось на качестве получаемых в те годы материалов, чему способствовали и низкие требования к статистической обработке результатов экспериментальных исследований.

7.42. Начиная с 1970 г. в ПНИИИС проводилось систематичес-

кое изучение деформационных свойств песков различного состава и генезиса комплексом полевых и лабораторных методов. Для повышения достоверности получаемых материалов в каждом пункте выполнялось не менее трех штамповых испытаний 4–7 точек динамического зондирования и до 20–70 определений плотности. Обработка производилась методами многомерного корреляционно-регрессионного анализа. Как показал предварительный анализ графиков парной корреляции, модуль деформации песков наиболее тесно связан с динамическим сопротивлением $P_Д$, плотностью скелета грунта $\sigma_{ск}$ и содержанием глинистых частиц $\Sigma_{гл}$. Остальные показатели (средний диаметр частиц, коэффициент неоднородности, влажность и т.п.) оказались малоинформативными. Уравнения, полученные для прогноза модулей деформации песков по штампам, приведены в табл.19 ($E_{ср}$ = 48,3 МПа) σ_E = =29,1 МПа).

Таблица 19

№ п.п.	Уравнение регрессии	Стандартная ошибка прогноза	Коэффициент корреляции
1	$E=0{,}84P_Д - 13{,}9\ \Sigma_{гл} + 74{,}4\ \ \delta_{ск} - 90{,}1$	6,6	0,80
2	$E=13{,}1 + 1{,}14P_Д - 10{,}0\ \Sigma_{гл}$	6,7	0,79
3	$E=22{,}7 + 1{,}34P_Д - 19{,}8\ \delta_{ск}$	6,96	0,77
4	$E=1{,}35P_Д - 11{,}8$	6,97	0,77

При оценке $E_{шт}$ не имеет смысла использовать все три аргумента, так как уравнение с одной переменной ($P_Д$, МПа) дает такую же точность прогноза, как и многомерное уравнение регрессии (см. табл.19).

Зависимость модуля деформации только от одного коэффициента пористости выражается уравнениями:

$$E_{шт} = 230{,}0 - 28{,}0e; \quad r = 0{,}82.$$

Обобщенные результаты выполненных исследований показаны на рис.50. Каждая точка на графике является обобщением результатов испытаний, выполненных с повторяемостью: тройной по $E_{шт}$, 5–7 – по $P_Д$ и 20–25 – по e. Здесь же для сопоставления показаны графики, построенные по данным СНиП II-15-74 (пунктирная линия) в диапазоне от маловлажных до водонасыщенных песков. Различия между сопоставляемыми графиками весьма существенны. Практически совпадают лишь результаты, относящиеся к пескам с коэффициентом пористости 0,72–0,77. С увеличением плотности различия возрастают (в 2 раза и более). Использование результатов экспериментальных исследований позволит повысить значения E при оценке сжимаемости по данным косвенных определений.

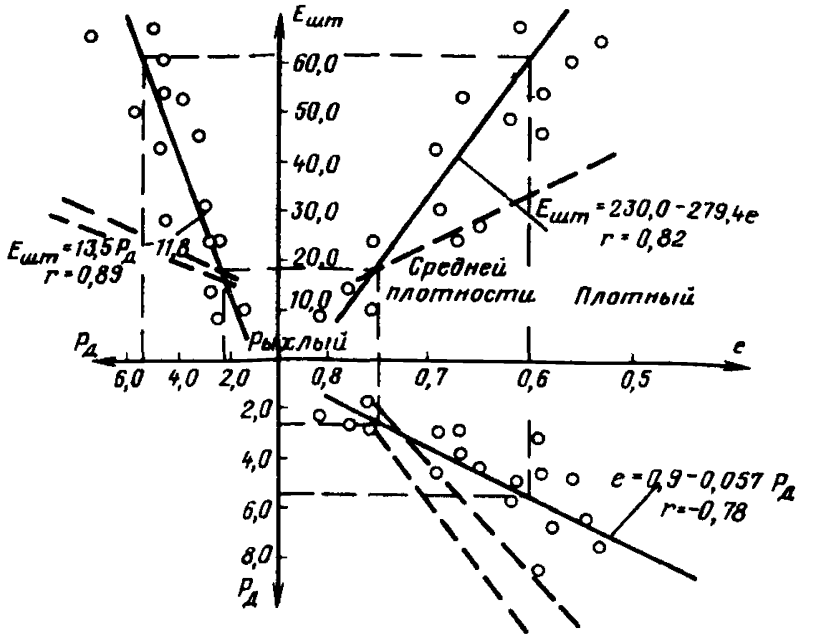


Рис.50. Взаимосвязь между $E_{шт}/P_д$ и e по экспериментальным данным

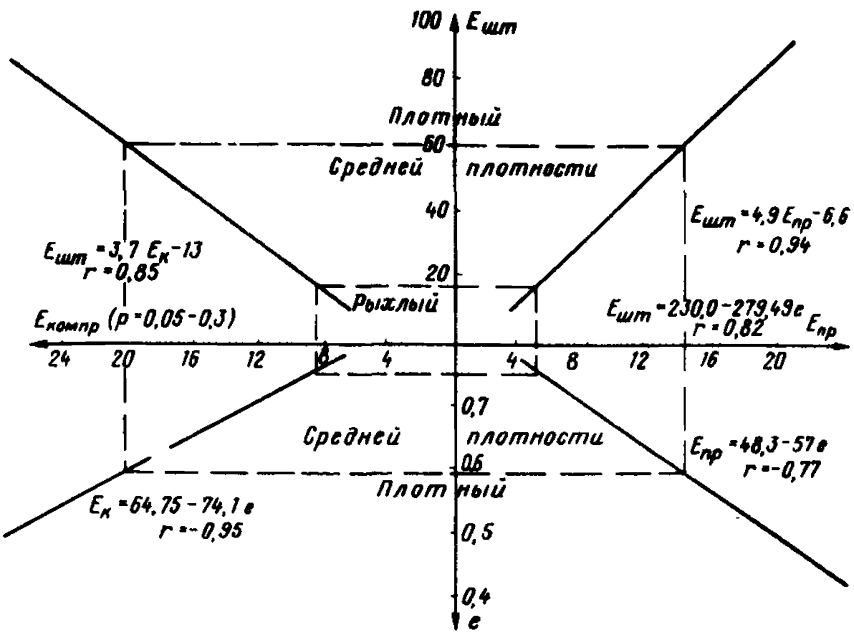


Рис.51. Графики взаимосвязи между $E_{компр}$, $E_{шт}$, $E_{пр}$ и e

При определении модуля деформации с использованием графиков рис.50 следует иметь в виду, что нормативные значения E, на основе которых построены графики $E = f(e, P_Д)$, могут быть использованы в качестве расчетных согласно п.3.5 ГОСТ 20522–75.

7.43. Для взаимного пересчета модулей деформации, полученных различными полевыми и лабораторными методами, а также для определения этих показателей по величине коэффициента пористости рекомендуется пользоваться графиками (рис.51), суммирующими результаты изучения деформационных свойств песков.

8. ИЗУЧЕНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ ПЕСКОВ

ПОКАЗАТЕЛИ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ

8.1. При расчете деформаций оснований зданий и сооружений среднее давление на грунт под подошвой фундамента не должно превышать расчетного давления R, МПа, определяемого по формуле (17) СНиП II-15-74:

$$R = \frac{m_1 m_2}{K_н}\left(A b \gamma_{II} + B h \gamma'_{II} + D C_{II} - \gamma'_{II} h_0\right),$$

где $m_1, m_2, K_н$ – коэффициенты условий работы и надежности;
b, h – соответственно ширина и глубина заложения фундамента;
$\gamma_{II}, \gamma'_{II}$ – объемная масса грунта, залегающего выше и ниже подошвы фундамента;
C_{II} – расчетное значение удельного сцепления грунта, залегающего под подошвой фундамента;
A, B, D – безразмерные коэффициенты, зависящие от расчетного значения угла внутреннего трения φ_{II}.

Используемые при определении расчетного давления показатели прочности грунтов C и φ представляют собой параметры эмпирической прямой, выражающей соотношение между предельным сопротивлением срезу τ и вертикальным давлением P при данных условиях испытаний.

8.2. Необходимо отметить условность не только принятой прямолинейности графика $\tau \to P$, но и самих понятий "сцепление" и "внутреннее трение". Внутреннее трение в песках, согласно Б.В.Дерягину, следовало бы называть внешним трением. Термин и понятие "внутренее трение" применимы к жидкостям, у которых при перемещении происходит непрерывное изменение скорости от слоя к слою без резких скачков. В отличие от этого при взаимном скольжении двух твердых тел (например, песчинок)

происходит резкий скачок скорости между соприкасающимися телами. Трение в этом случае зависит только от состояния поверхности обоих трущихся тел, но не от того, что происходит в песчинках на некоторой глубине под их поверхностью. Такое трение поэтому естественно назвать внешним, однако в силу укоренившейся привычки его называют внутренним, даже применительно к пескам и крупнообломочным породам.

При перемещении в плоскости среза происходят многообразные процессы: скольжение, качение, верчение, зацепление, раздвигание и отдавливание песчинок в стороны и т.п. Все эти процессы названы чисто умозрительно, так как никаких специальных исследований характера перемещения песчинок в объеме с микроскопическими наблюдениями за их траекторией, деформациями, напряжениями на контактах с соседними песчинками не производилось. Отсутствуют явные представления о доле вышеуказанных процессов в общем сопротивлении сдвигу. Например, один и тот же термин "зацепление" (заимствованный из области механики, где им обозначают способ передачи движения с помощью зубчатых шестеренок) используется для обозначения различных процессов и явлений. Часто его применяют взамен термина "сцепление", наличие которого в песках ставится под сомнение. Иногда зацепление называют особым видом трения на основе опытов, показывающих, что сопротивление сдвигу песка, частицы которого находятся в зацеплении, пропорционально нормальному давлению. Существуют формулы, где зацепление фигурирует одновременно и как трение, и как сцепление [6, с.250]. Естественно, что экспериментальное выделение всех функций одного только зацепления (а ведь есть еще и многие другие факторы сопротивления сдвигу) не представляется возможным. Практически этого и не требуется. В проектировании используются лишь параметры прямой – так называемые сцепление и угол внутреннего трения на графике $\tau = f(P)$.

8.3. При определении прочности нецелесообразно выделять в общем сопротивлении сдвигу элементарные процессы, такие как сопротивление скольжению, зацеплению, раздвиганию и т.п., во-первых, из-за экспериментальных трудностей, а во-вторых, эти данные не могут быть использованы при существующей системе расчета. Следует согласиться с М.Н.Гольдштейном [6], который отмечает, что сопротивление сдвигу песка состоит из нескольких компонентов, зависящих от природы физических свойств зернистого материала и его гранулометрического состава, от формы частиц и его плотности, от начального напряженного состояния и величины сдвигового перемещения, от скорости сдвига и объемно-дисторсионных изменений в ходе сдвига. Но хотя все эти компоненты неодинаковы в разных точках массива грунта, все они в среднем, как свидетельствуют данные опытов, пропорциональны нормальному давлению в условной плоскости

сдвига и могут поэтому рассматриваться в совокупности как "внутреннее трение" песка, измеряемое, по Кулону, некоторым "углом внутреннего трения". В связи с этим параметры прямой $\tau = f(P)$ рекомендуется называть единообразно для грунтов любого состава сцеплением C и углом внутреннего трения φ. Применение других терминов (трение зацепления, сцепление зацепления и др.) представляется ненужным, так как они вносят излишнюю терминологическую путаницу, не раскрывая по существу физической природы явления на основе строгой количественной оценки.

ТРЕБОВАНИЯ К ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬСТВА

8.4. При проектировании сооружений промышленного и гражданского строительства для определения расчетного давления на основание требуется измерять показатели прочностных свойств с точностью, позволяющей установить принадлежность этих показателей к определенному интервалу. В строительной практике сборные фундаменты колонн имеют шаговый модуль, кратный 20–30 см, т.е. не любое изменение нормативного давления на грунт приводит к изменению размера фундамента. Лишь переход значений C и φ из одного интервала в другой влияет на изменение этого размера.

Для рассмотрения взаимосвязи между прочностными характеристиками грунта и шириной фундамента примем, что условный фундамент передает центральную нагрузку $P = 120$ т на грунт с $\gamma = 1{,}70$ т/м^3; глубина заложения фундамента $h = 1{,}60$ м; предварительная ширина 2,0 м. Влияние величины сцепления и угла внутреннего трения грунтов основания на ширину фундамента для приведенных условий показано на рис.52.

Рассмотрение приведенных на рисунке графиков позволяет установить, какие количественные изменения показателей C и φ могут привести к изменению ширины фундамента. Например, для принятых конкретных условий (рис.52,*а*) любые изменения сцепления грунта в пределах 0,022–0,048 МПа (при $\varphi = 38^\circ$) никак не отражаются на проектном решении: ширина фундамента остается неизменной и равной 1,5 м. На рис.52,*б* видно, что любые изменения угла внутреннего трения в интервале 28–39° (при $C = 0{,}05$ МПа) также не влияют на ширину фундамента. Имеются и противоположные примеры. На рис.52,*а* видим, что при $\varphi = 18^\circ$ изменения сцепления на 0,005 МПа (например, с 0,015 до 0,010 МПа) оказывается достаточным для изменения размера фундамента. На рис.52,*б* при $C = 0{,}005$ МПа к увеличению b приводит изменение φ всего на 2°.

8.5. В зависимости от сочетания C и φ требуется совершенно различная точность определения этих параметров. Для грунтов

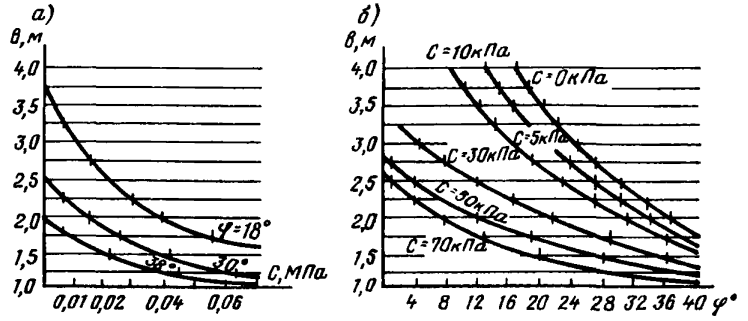


Рис.52. Зависимость ширины фундамента b
а – от сцепления C; *б* – от угла внутреннего трения φ грунтов основания

несущая способность которых определяется главным образом сцеплением, погрешность определения φ практически не сказывается на величине R. И наоборот, в грунтах, прочность которых определяется в основном внутренним трением, точность определения сцепления не играет существенной роли. Это положение хорошо иллюстрируется схемой, представленной на рис.53. Легко видеть, что для глин погрешность определения C сразу же скажется на величине R и соответственно на размерах фундамента; ошибки определения φ не играют большой роли, так как вклад этого показателя в общую прочность глинистых пород незначителен. С песком дело обстоит противоположным образом.

Представление о предельных допустимых погрешностях определения C и φ в зависимости от грунтовых условий и ширины фундамента дают данные табл.20. Приведенные в таблице значения относительных погрешностей ε_c и ε_φ подтверждают отмеченную закономерность. Действительно, предельная допустимая

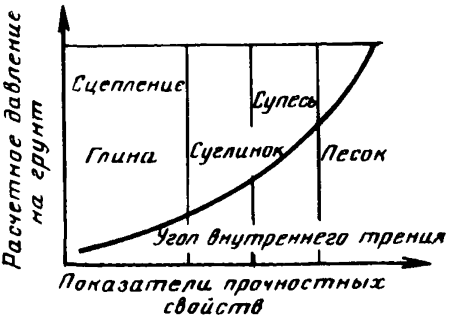


Рис.53. Зависимость расчетного давления на грунты основания от их прочностных характеристик

Таблица 20

Ширина фундамента, м	Относительная погрешность $\pm\varepsilon_c$ при значениях φ, град			Относительная погрешность $\pm\varepsilon_\varphi$ при значениях C, МПа		
	18	30	38	0	0,03	0,07
1,2						
1,5	–	–	0,40	–	–	0,180
1,8	–	0,24	0,53	–	0,097	0,228
2,1	0,18	0,31	–	–	0,104	0,258
2,4	0,14	0,43	–	0,056	0,132	0,466
2,7	0,15	–	–	0,047	0,158	–
3,0	0,16	–	–	0,045	0,266	–
3,3	0,20	–	–	0,044	0,333	–
3,6	0,20	–		0,042	–	–

величина ε_c для глинистых грунтов ($\varphi = 18^0$) составляет 0,14–0,20; в то же время для песков с $\varphi = 38^0$ допустимая относительная погрешность ε_c увеличивается до 0,40–0,53. Величина ε_φ также возрастает с 0,042–0,056 для несвязных грунтов до 0,180–0,466 для грунтов, обладающих $C = 0{,}07$ МПа;

8.6. Практически достижимая точность определения показателей C и φ по данным испытания песков различного состава и генезиса методом одноплоскостного среза колеблется в широких пределах.

Угол внутреннего трения обладает, как правило, невысокой изменчивостью. Коэффициент вариации этого показателя V_φ обычно не превышает 3%. Относительная погрешность определения ε_φ (при доверительной вероятности $\alpha = 0{,}95$), по данным испытаний на 15 площадках, составляет в среднем 0,046. В большинстве случаев величина $\varepsilon_\varphi < 0{,}05$, т.е., согласно табл.20, точность определения φ методом одноплоскостного среза следует считать удовлетворительной.

Иначе обстоит дело с определением сцепления. По результатам статистической обработки коэффициент вариации V_c в среднем составляет 60%, а величина ε_c колеблется от 0,06 до 2,6 при среднем значении, равном 1,02. Требуемая точность определения C удовлетворяется лишь в 25% случаев. Низкая точность определения сцепления связана с тем, что этот показатель определяется не путем прямого измерения, а косвенно – по разности и соотношению τ и P, которые по абсолютным значениям существенно превышают величину C. Таким образом, точность определения C принципиально не может быть повышена в рамках существующего метода.

ЛАБОРАТОРНЫЕ МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ

8.7. В настоящее время основные методы лабораторных испытаний на прочность весьма разнообразны и включают в себя:

прямой сдвиг или срез по плоскости;

кольцевой сдвиг (срез);

простой сдвиг, который называют иногда испытанием на скашивание (впервые в СССР осуществил и исследовал Н.Н.Маслов);

одноосное сжатие;

плоский сдвиг (сдвиг в условиях плоского деформированного состояния), может осуществляться как активный и как пассивный;

трехосное осесимметричное сжатие с максимальным вертикальным давлением (с поперечным расширением), называемое также активным сжатием;

трехосное осесимметричное сжатие с максимальным горизонтальным давлением (с поперечным сжатием), называемое также пассивным сжатием;

кручение сплошных цилиндрических образцов;

кручение пустотелых цилиндрических образцов (сложное напряженное состояние);

трехосное сжатие при управляемых деформациях, различных в трех главных направлениях (так называемое истинное, или неравномерное ортотропное трехосное сжатие).

В производственной инженерно-геологической практике применяется ограниченное число методов: прямой срез по плоскости и трехосные испытания с поперечным сжатием и поперечным расширением.

ИСПЫТАНИЯ НА ОДНОПЛОСКОСТНОЙ СРЕЗ

8.8. Испытания на одноплоскостной срез принадлежат к числу наиболее старых и распространенных методов изучения прочности грунтов. Его описание приводится в обширной методической и нормативной литературе.

Испытания заключаются в определении сопротивления грунта срезу при различных вертикальных давлениях P. Различаются испытания консолидированные (с предварительным уплотнением и стабилизацией деформаций среза в ходе испытаний) и неконсолидированные (без предварительного уплотнения и стабилизации). Срез одной части относительно другой производят постепенно возрастающей касательной нагрузкой при одновременной передаче на образец грунта нагрузки, нормальной к плоскости среза. Определение τ следует производить не менее чем при трех различных значениях P на образцах грунта, вырезанных из одного однородного по составу и строению монолита или в необходимых случаях подготовленных в лаборатории. Образцы грунта должны быть цилиндрической формы диаметром не менее 70 мм и высотой

$1/2\ D \geq H \geq 1/3\ D$. Испытания проводятся в сдвиговых приборах двух типов: с верхней подвижной частью срезной коробки (системы ГГП-30) и с нижней подвижной кареткой (системы ВСВ-1).

Детальное описание условий проведения испытаний на одноплоскостной срез изложено в ГОСТ 12248–78.

8.9. Повышение сопротивления песка срезу за счет его дилатантного упрочнения возникает при невозможности (или ограничении) разуплотнения песка в процессе сдвига. Степень упрочнения зависит от конструкции прибора. Отсюда зависимость результатов испытаний от конструктивной схемы срезного прибора. Приборы с жесткой конструкцией (ВСВ-1 с неподвижной верхней кареткой) затрудняют разуплотнение песка, способствуют возникновению дополнительных (неучитываемых) напряжений и, следовательно, приводят к соответственному повышению сопротивления сдвигу. Подвижная верхняя каретка (как в приборах ГГП-30) может перемещаться вверх при сдвиге, что позволяет сохранять вертикальное давление постоянным на протяжении каждой ступени среза, в результате чего сдвиг происходит при строго контролируемом давлении.

Результаты сопоставительных испытаний на приборах ГГП-30 и ВСВ-1 показаны на рис.54 и приведены в табл.21.

Таблица 21

Плотность сложения песка	Угол внутреннего трения, град		Расхождение в значениях	
	ВСВ-1	ГГП-30	град	%
Рыхлое	27,5	27,5	0	0
Средней плотности	38,7	30,3	8,4	27,7
Плотное	53,7	40,8	12,9	31,6

Угол внутреннего трения рыхлых песков, которые не разуплотняются при сдвиге, не зависит от конструкции прибора. В среднеплотных и особо плотных песках влияние прибора очень существенно: различие между результатами достигает 27,7–31,6%. При этом использование прибора ВСВ-1 часто приводит к получению отрицательных значений C, что связано с непропорционально большим увеличением τ при увеличении вертикального давления P.

Таким образом, при исследовании прочностных свойств песков средней плотности и плотных, а также крупных и гравелистых разновидностей применение сдвиговых приборов с неподвижной верхней кареткой недопустимо вопреки указаниям ГОСТ 12248–78. Соответствующее уточнение рекомендуется внести в нормативные документы при очередном их пересмотре.

8.10. Величина зазора между обоймами срезывателя назначается волевым путем. В технической и нормативной литературе можно встретить различные, иногда взаимоисключающие реко-

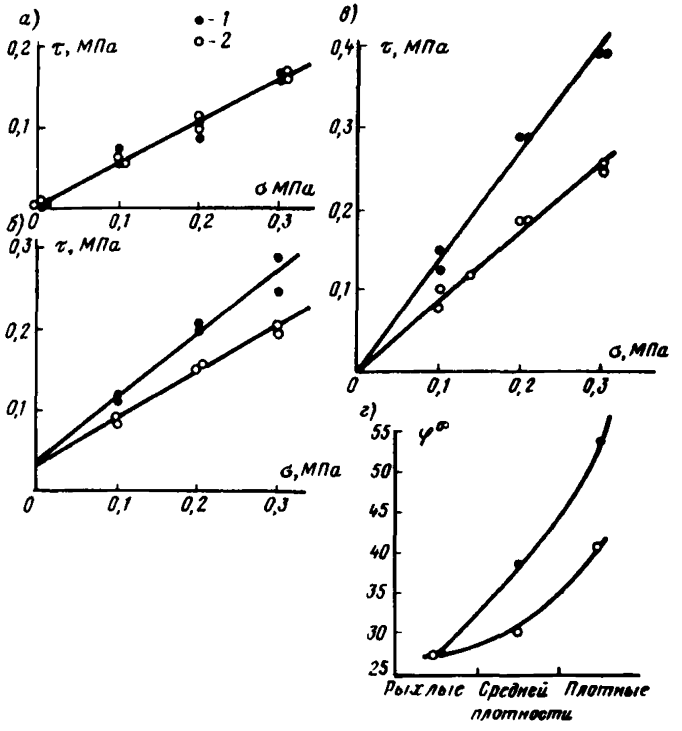


Рис.54. Зависимость результатов испытаний песков на сдвиг от применяемой системы приборов

а – рыхлое сложение; *б* – средняя плотность; *в* – плотное сложение; *г* – значение угла внутреннего трения в зависимости от типа прибора и плотности песка; *1* – система ВСВ-1 ; *2* – система ГТП-30

мендации по этому вопросу. Исследованиями, выполненными в ПНИИИС, установлено, что φ существенно зависит от величины зазора между верхней и нижней обоймами срезывателя. Увеличение зазора свыше указанного в ГОСТ 12248–78 приводит к значительному снижению φ, величина которого падает в 1,5 раза, т.е. угол внутреннего трения по данным одноплоскостного среза не является инвариантной характеристикой песка даже при одной и той же схеме испытаний.

Для получения результатов, сопоставимых с данными полевых испытаний, рекомендуется производить одноплоскостной срез с зазором 10–11 мм, так как при этом величина φ хорошо согласуется с результатами среза целиков песка в шурфах.

8.11. В настоящее время не существует достаточно обоснованных критериев, указывающих на разрушение песков при одно-

плоскостном срезе. Большинство исследователей считают, что за критерий разрушения необходимо принимать такое напряжение сдвига, при котором происходит непрерывное деформирование грунта. Иногда пользуются условной относительной деформацией сдвига (15%). Во многих производственных лабораториях величина ее ограничивается конструктивными параметрами приборов. Обычно одноплоскостные испытания на срез песков ведут до полного разрушения грунта, когда верхняя (или нижняя) обойма срывается с места и доходит до упора. Естественно, что такое явление невозможно в натурных условиях. Ему предшествует формирование поверхностей или системы поверхностей скольжения с ослабленным сопротивлением сдвигу, только после чего становится возможным запредельное ускоренное смещение. Это условие достигается в результате деформаций, при которых происходит местная переориентация частиц, благоприятствующая дальнейшему сдвигу в пределах сформировавшегося тонкого слоя скольжения. Поэтому критерий образования поверхности сдвига и предельного состояния – это критерий деформации.

8.12. В ГОСТ 12248–78 в качестве критерия разрушения принята деформация сдвига, равная 5 мм, независимо от состава и состояния грунта, величины вертикального давления и т.п. Такой подход никак научно не обоснован, да и вообще не применим к пескам, которые полностью срезаются при деформациях, как правило не достигающих 5 мм. При исследовании песков необходимо стремиться к фиксированию предельного состояния при минимальных деформациях, так как дальнейшее деформирование зачастую приводит к существенному изменению плотности грунта в зазоре – эффекту чисто лабораторному. По-видимому, невозможно установить единый количественный критерий сдвига по деформации независимо от состава и плотности песка и вертикального давления, так же как нельзя установить такой критерий, например, при штамповых испытаниях. Как известно, наступление предельного состояния под штампом фиксируется не по величине деформации, а по перегибу графика.

Обработка результатов одноплоскостного среза в координатах "напряжение сдвига $\tau \rightarrow$ деформация сдвига ε_z" позволила установить на графике $\tau \rightarrow \varepsilon_z$ три фазы, которые отмечаются во всех случаях независимо от состава и исходной плотности песка (рис.55). В процессе первой фазы при относительных деформациях сдвига от 0 до 0,15–0,30% происходит преимущественно уплотнение песка в кольце. Вторая фаза соответствует накоплению деформаций сдвига и формированию поверхности скольжения. Она завершается наступлением предельного состояния при деформациях 1–2%. И, наконец, в третьей фазе происходит сдвиг грунта. При этом деформирование идет в рамках единого процесса при постоянном темпе, без заметных перегибов, вплоть до срыва кольца. Иногда на этом участке наблюдается некоторое замедление сдвига из-за уплотнения песка при больших деформациях

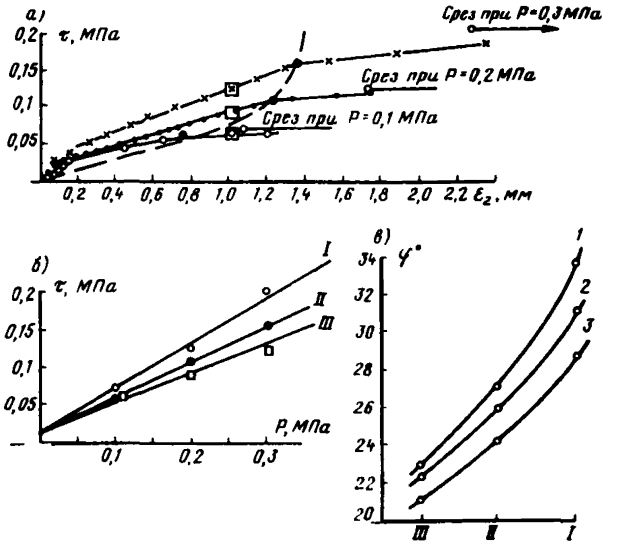


Рис.55. Обработка результатов одноплоскостного среза мелкого песка

1 – плотного; *2* – средней плотности; *3* – рыхлого; *а* – зависимость сдвигающего усилия от деформации; *б* – зависимость сдвигающего усилия τ от способа фиксации сдвига; *в* – значение угла внутреннего трения в зависимости от способа фиксации сдвига; *I* – $\tilde{\tau}$ – по срыву; *II* – τ – по перегибу кривой; *III* – τ – по деформации $\varepsilon_2 = 1$ мм

или трения обойм друг о друга, так как при завершающей стадии среза они часто смыкаются. Таким образом, напряжение сдвига, при котором происходит срыв кольца, часто заметно превышает нагрузку, соответствующую началу среза. Это связано с перекосом верхнего кольца при значительных деформациях, смыканием зазора, которое сопровождается уплотнением песка, и т.п. Таким образом, лишь на основе графика $\tau \rightarrow \varepsilon_2$ можно достаточно надежно установить сопротивление грунта срезу. На рис.55,*б* построены графики $\tau \rightarrow P$ при различных подходах к фиксированию сопротивления сдвигу. График I соответствует $\tilde{\tau}$, при которых происходит срыв кольца. Угол внутреннего трения при этом максимален. График II построен с использованием сопротивлений сдвигу, найденных по графику $\tau \rightarrow \varepsilon_2$; он отвечает фактическому началу среза песков в приборе. Здесь же построен график III при $\tilde{\tau}$, соответствующем произвольно заданной деформации сдвига (в нашем примере $\varepsilon_2 = 1$ мм).

На рис.55,*а,б* приведены результаты испытаний мелкого песка средней плотности. Аналогичное деформационное поведение ха-

рактерно также для плотных и рыхлых песков. Зависимость угла внутреннего трения от способа оценки предельного сопротивления сдвигу показана на рис.55,*в*.

При обработке результатов лабораторных испытаний на срез в качестве предельного сопротивления грунта срезу рекомендуется принимать сопротивление, соответствующее перегибу на графике $\tau \to \varepsilon_z$.

ТРЕХОСНЫЕ ОСЕСИММЕТРИЧНЫЕ ИСПЫТАНИЯ

8.13. Трехосные осесимметричные испытания являются наиболее универсальным методом исследования напряженно-деформативных и прочностных характеристик грунтов. В процессе их проведения осуществляется непрерывный контроль за изменением главных напряжений и соответствующих им линейных и объемных деформаций. Выше была изложена методика определения сжимаемости методом трехосных испытаний. Расчет модуля деформации производится в допредельном напряженном состоянии. Для определения показателей прочности напряжения увеличиваются до состояния предельного равновесия между внешней нагрузкой и внутренними силами сопротивления грунта. В этом случае любое увеличение внешних сил приводит к потере грунтом устойчивости, вызываемой разрушением связей между частицами, образованием разрывов и развитием необратимых сдвигов вдоль поверхностей скольжения.

Наступление предельного равновесия грунта может быть вызвано различным сочетанием напряжений, в зависимости от которого различают разные условия предельного состояния – так называемые теории прочности. Для грунтов обычно применяют два основных условия (теории): условие Мора–Кулона, согласно которому предельное состояние наступает при определенном соотношении касательного τ_n и нормального σ_n напряжений, действующих на одной площадке; условие Мизеса–Шлейхера, в соответствии с которым предельное состояние наступает при определенном соотношении интенсивности касательных напряжений $[\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{3}}(\sigma_1 - \sigma_3)]$ и среднего нормального напряжения $[\sigma_{ср} = \frac{1}{3}(\sigma_1 + 2\sigma_3)]$. Символами σ_1, σ_2 и σ_3 обозначаются главные напряжения, существующие в момент разрушения.

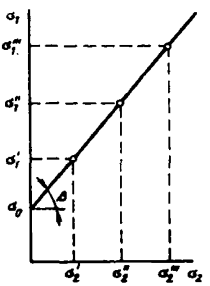
8.14. Согласно условию прочности Мора–Кулона, соотношение между τ_n и σ_n имеет вид

$$|\tau_n| = C + \sigma_n \operatorname{tg}\varphi = (\sigma_n + H)\operatorname{tg}\varphi,$$

где $H = C/\operatorname{tg}\varphi$ – сопротивление всестороннему растяжению.

Диаграмму Мора для разрушающих напряжений изображают в виде так называемых кругов Мора. Для их построения на оси

Рис.56. Построение условия прочности по данным трехосных испытаний ($tg\beta = A$)



абсцисс откладывают максимальное и минимальное главные напряжения σ_1 и σ_3 и на их разности, как на диаметре, строят окружность. Правила построения кругов Мора детально изложены в специальной литературе [15, 31] . Определенные трудности при таком способе обработки результатов испытаний возникают при построении предельной касательной к кругам Мора, особенно при большом количестве кругов (например, при опытах, выполненных повторно и при различных сочетаниях главных напряжений). Обычно такая касательная проводится на глазок, что, естественно, снижает точность получаемых результатов.

8.15. Более строгое определение параметров C и φ по результатам стабилометрических испытаний достигается на основе условия прочности Мизеса–Шлейхера

$$\sigma_i = \sigma_{cp} tg\varphi_{oct} + C_{oct},$$

где φ_{oct}, C_{oct} – угол внутреннего трения и сцепления на октаэдрической площадке.

Из этого условия вытекает рекомендация [31] о построении прямолинейной огибающей в главных наряжениях, которая имеет вид при $\sigma_2 = \sigma_3$.

$$\sigma_1 = \sigma_0 + A\sigma_3 .$$

Значения σ_0 и A определяются методом наименьших квадратов как параметры прямой $\sigma_1 = F(\sigma_3)$ (рис.56). Эти величины связаны с показателями прочности C и φ следующими соотношениями:

$$\sigma_0 = \frac{2\cos\varphi}{1-\sin\varphi} C; \qquad A = \frac{1+\sin\varphi}{1-\sin\varphi};$$

$$tg\varphi = \frac{A-1}{2\sqrt{A}}; \qquad C = \frac{\sigma_0}{2\sqrt{A}}.$$

8.16. Правильность определения показателей прочности по данным стабилометрических испытаний решающим образом зависит от точности установления величины главных напряжений в момент разрушения. Вместе с тем в технической литературе отсутствуют конкретные указания по установлению такого момента. Обычно рекомендуется проводить испытания до начала пластического течения образца, или до состояния предельного равновесия, или до образования волосяных трещин на боковой поверхности, или до перелома на графике $\Delta\varepsilon_1 \rightarrow \Delta\varepsilon_2$ (где $\Delta\varepsilon_1$ и $\Delta\varepsilon_2$ – приращение вертикальных и горизонтальных деформаций), и т.д. Эти рекомендации достаточно условны, использование их при испытаниях песков затруднительно. Предлагаемые критерии разрушения по величине осевых деформаций составляют, по данным различных исследований, 5–15%. Эти значения получены при испытаниях глинистых грунтов и не могут быть использованы для песков, разрушение которых происходит при меньших вертикальных деформациях. Кроме того, величина предельной деформации зависит от траектории нагружения.

8.17. При выполнении стабилометрических испытаний непосредственно фиксируются изменяющиеся во времени вертикальные деформации ε_1 и объемные деформации ε_V. Кроме того, по расчету могут быть получены: горизонтальные деформации $\varepsilon_2 = \varepsilon_3$; интенсивность деформаций сдвига $\epsilon_i = \frac{2}{\sqrt{3}}(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)$; скорость изменения любого из этих показателей U; суммарное изменение объема исследуемого монолита V. О характере процессов, протекающих в грунте, может свидетельствовать также приращение любого из показателей за ступень нагрузки (например, $\Delta\varepsilon_{V_{i+1}} / \Delta\varepsilon_{V_i}$).

В принципе каждый из перечисленных показателей в той или иной мере отражает различные стадии деформирования грунта при испытаниях.

На рис.57 приведен характерный график испытания мелких песков. Опыт проводился при $\sigma_2 = \sigma_3 = 0{,}025$ МПа с помощью полевого стабилометра-грунтоноса конструкции ПНИИИС. Использование этого прибора позволяет максимально сохранить ненарушенной структуру исследуемого образца. Как видно из рисунка, все анализируемые прказатели с различной степенью чувствительности фиксируют переход грунта в предельное состояние.

Наиболее информативным показателем является скорость объемных деформаций v_{ε_V} за ступень нагрузки. При переходе грунта к стадии разрушения эта величина меняется в несколько раз (до 2,9–8,6).

Вертикальные и горизонтальные деформации изменяются обычно более плавно и не дают такой четкой картины разрушения. Как

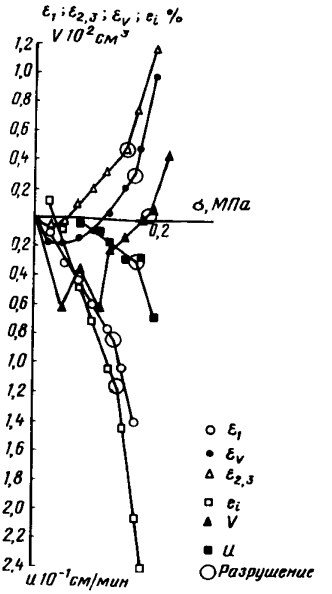


Рис.57. Изменение показателей деформируемости при трехосных испытаниях песков

правило, разрушение происходит при относительной деформации 2,5–3,0%. Следует отметить, что эта величина наблюдается при $\sigma_3 = 0{,}1$ МПа. При уменьшении бокового давления до 0,05 и 0,025 МПа разрушение наступает при относительных деформациях 1,8–2,1 и 1,2–1,5% соответственно.

Хорошим показателем разрушения, имеющим ясный физический смысл, является суммарное изменение объема исследуемого монолита. Он указывает на общее уплотнение или разрыхление образца в процессе испытаний. Как известно, переход к стадии разрушения и формирования пластических зон сопровождается некоторым разрыхлением грунта (при штамповых испытаниях, например, это вызывает выпор грунта на поверхность). Таким образом, начало увеличения общего объема образца по сравнению с первоначальным свидетельствует о начале его разрушения.

Наблюдается определенный разброс значений предельной нагрузки σ_3, фиксируемой по различным показателям. В приведенном примере он составляет 25%. Для того чтобы свести к минимуму погрешность при определении предельной разрушающей нагрузки σ_3, величину следует рассчитывать как среднеарифметическую из значений σ_3, определенных по всем фиксируемым в ходе трехосных испытаний показателям. Использование для расчета σ_3 конечной ступени нагрузки (как это иногда практикуется) приводит к завышению показателей φ и C на 8–10%.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СЦЕПЛЕНИЯ МЕТОДОМ РАЗРЫВА

8.18. В настоящее время сцепление песков C оценивается косвенно по отрезку ординат, отсекаемому при экстраполировании результатов испытаний, выполненных с вертикальной нагрузкой P. Такой прием вызывает возражение по двум причинам. Во-первых, при существующей методике сдвиговых испытаний угол наклона графика τ-ρ зависит от схемы нагружения и, следовательно, ве-

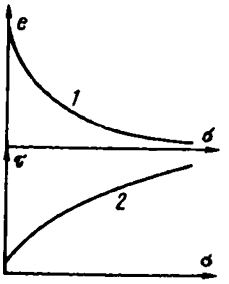


Рис.58. Влияние уплотнения грунта на криволинейность графика $\tau = f(\sigma)$
1 – изменение коэффициента пористости *e*; *2* – изменение сдвигающего усилия τ

личина *C* ставится в прямую зависимость от прилагаемых вертикальных нагрузок, что принципиально противоречит физическому смыслу этого показателя. Ведь, в соответствии с законом Кулона, на котором базируется расчет показателей прочности, сцепление рассматривается как компонент прочности, не зависящий от вертикального давления. Во-вторых, линейное экстраполирование графика $\tau - \rho$ до пересечения с осью ординат было бы допустимо лишь при условии установления его прямолинейности в пределах исследованных нагрузок и особенно на начальном участке графика. Однако многочисленными исследованиями Н.Н.Маслова, В.В.Охотина, К.Терцаги и Р.Пека, Д.Тейлора, В.Г.Березанцева и др. показана криволинейность графика $\tau - \rho$, особенно в его начальной части.

Причина этого явления становится ясной при совместном рассмотрении (рис.58) графиков 1 и 2. По мере увеличения вертикального давления *P* уплотнение грунта в сдвиговом кольце происходит по типу компрессионной кривой *1*: вначале уплотнение идет очень интенсивно, а с ростом *P* кривая выполаживается. В соответствии с этим на сопротивление сдвигу τ в начальной стадии влияет как вертикальное давление, так и уплотнение грунта. С ростом *P* роль уплотнения снижается и τ начинает возрастать преимущественно за счет изменения напряженного состояния. Для учета криволинейного графика $\tau - \rho$ при $\rho < 0{,}1$ МПа рекомендуется использовать зависимость, предложенную В.Г.Березанцевым:

$$\varphi_{p_n} = \varphi_1 + (3,15^\circ) \ln\left(\frac{\rho_0}{\rho_n}\right),$$

где P_0 = 0,1 МПа; P_n – любая вертикальная нагрузка меньше 0,1 МПа; φ_{p_n} – угол внутреннего трения при P_n; φ – то же, при P_0.

8.19. С целью наиболее достоверной оценки сцепления песков рекомендуется разработанная и опробованная в ПНИИИС методика испытаний, в процессе которых в грунте не возникают сжимающие и уплотняющие напряжения, создающие искаженное представление о действительной величине сцепления. Она основана на прямом определении сцепления методом разрыва. Для изме-

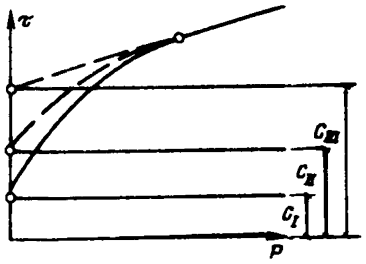


Рис.59. Зависимость величины удельного сцепления C от методики испытаний

C_I – сопротивление разрыву; C_{II} – сопротивление сдвигу без вертикального давления; C_{III} – параметр линейности, полученный методом стандартного одноплоскостного среза

рения удельного сцепления песка используется разрывной прибор, представляющий собой разъемную гильзу, состоящую из двух соосно расположенных цилиндров. Гильза служит для отбора образца и для испытания на разрыв. Роль захватов, удерживающих песок в цилиндрах при разрыве, играют силы трения образца о стенки этих цилиндров. В процессе испытаний один цилиндр закрепляют неподвижно в оснастке, а к другому прикладывают разрывающие усилия. Прибор позволяет проводить испытания непосредственно в полевых условиях, что сводит к минимуму нарушение при транспортировании присущих пескам хрупких структурных связей. Кроме того, величина C определяется по одному образцу (а не по трем, как при испытаниях одноплоскостным срезом с вертикальными давлениями).

Обобщенные результаты 2000 испытаний показаны на рис.59. Из рисунка видно, что наибольшие искажения, связанные с указанными выше явлениями в зазоре сдвигового прибора, возникают при испытаниях с вертикальными нагрузками. В меньшей степени эти явления влияют на результаты сдвига без вертикального давления. Испытания на разрыв позволяют получить величину C, свободную от недостатков, присущих методу одноплоскостного среза.

Таким образом, наряду со стандартным методом определения расчетного показателя сцепления, используемым при проектировании, следует определять и сцепление по разрыву. Эта характеристика наиболее точно отражает прочность структурных связей грунта и должна применяться при выяснении природы прочности исследуемых песков.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УГЛА ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ ПЕСЧАНЫХ ГРУНТОВ ПО УГЛУ ЕСТЕСТВЕННОГО ОТКОСА

8.20. Угол естественного откоса песка α соответствует состоянию предельного равновесия сыпучего грунта и образуется поверхность свободно стоящего отсыпанного грунта с горизонтом. Согласно основным положениям механики грунтов, этот угол равен углу внутреннего трения при условии $C=0$. Принятое допущение ($C = 0$) вполне правомерно, так как сухой или водонасы-

щенный песок с нарушенной структурой, который обычно используется для определения угла естественного откоса, не обладает кристаллизационными, водно-коллоидными и капиллярными связями, а молекулярным сцеплением можно пренебречь ввиду малой удельной поверхности песка. Исключение составляют пылеватые разности, гигроскопическая влажность которых сравнительно высока, в связи с чем они обладают известной связностью даже в воздушно-сухом состоянии.

Величина угла естественного откоса зависит от метода определения этого показателя. В соответствии с выполненными исследованиями [20] углы естественного откоса песка, отсыпанного в виде конуса α_1, полуконуса α_2, четверти конуса α_3 и призмы α_4 (между тремя вертикальными стенками), различаются между собой. При $\alpha_1 < \alpha_2 < \alpha_3 < \alpha_4$ расхождения между разными методами составляют $1-2^0$.

8.21. Значения α при отсыпке конуса или обрушении подпертого грунта относятся к неопределенной плотности сложения песка. Этот недостаток указанных методов может быть устранен при определении угла естественного откоса на приборе Д.И.Знаменского (типа УО) в соответствии с рекомендациями, изложенными в [31]. В этом случае предельное состояние формируется в песке, уложенном во вкладыш прибора с любой заданной плотностью. Угол естественного откоса изменяется по откосу, оставшемуся после удаления избыточных масс грунта. Для правильного определения величины α это условие является решающим.

8.22. Взаимосвязь между φ и α в зависимости от состояния песков по плотности и влажности показана на рис.60. Испытания проводились в ПНИИИС на приборах ГГП-30 и типа УО. Из рисунка видно, что точки на графике расположены в целом вблизи линии полной сходимости. Однако четко отмечаются некоторые отклонения от теоретического распределения, которые носят закономерный характер. Так, все точки, отвечающие пескам рыхлого сложения (независимо от влажности и крупности), располагаются ниже теоретической прямой. Для всех без исключения песков рыхлого сложения величина α оказалась на $1-2^0$ больше ве-

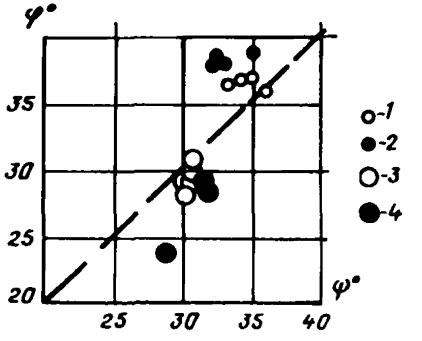


Рис.60. Сопротивление углов естественного откоса α и внутреннего трения песков φ

1 – сухой плотный; *2* – водонасыщенный плотный; *3* – сухой рыхлый; *4* – водонасыщенный рыхлый

личины φ. Для плотных песков наблюдается обратная закономерность: α меньше φ на 2–3° для сухихи и на 4–6° для водонасыщенных песков. Это объясняется, по-видимому, явлением дилатансии, проявляющимся при одноплоскостном срезе лишь в плотных разновидностях песков. В рыхлых песках, в которых дилатантное упрочнение не отмечается, различия между α и φ несущественны и могут возникать за счет незначительных сил сцепления, влияющих на результаты определения α.

Простота метода определения угла естественного откоса позволяет ставить вопрос о его использовании в качестве массового метода определения угла внутреннего трения песков при инженерно-геологических изысканиях.

ПОЛЕВЫЕ МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ ПРОЧНОСТИ

8.23. Преимущества полевых методов, о которых говорилось в разделе об изучении деформационных свойств песков, проявляются еще ярче при исследовании прочностных характеристик. Ведь именно структурные связи грунтов, являющиеся одним из компонентов прочности, нарушаются в первую очередь при отборе и транспортировании образцов песка. Вместе с тем в настоящее время полевые методы изучения прочности песков применяются в крайне ограниченном количестве. Это относится как к видам испытаний, так и к выполняемым объемам работ.

В некоторых организациях проводятся единичные испытания песков на срез целиков в горных выработках. Это по существу единственный, относительно широко применяемый метод исследования песков. Не получили распространения и не рекомендуются к использованию на песках методы выпирания, обрушения, раздавливания вращательного и кольцевого срезов. Лишь в самое последнее время начали выполняться испытания методом поступательного среза, однако опыт его применения при исследовании песков очень ограничен. Наконец, нужно отметить разработанный и используемый ПНИИИС прибор для полевых стабилометрических испытаний, первый опыт применения которого указывает на большую перспективность метода.

Таким образом, к числу методов, которые рассматриваются в настоящем разделе, относятся испытания на срез целиков в горных выработках и поступательный срез в скважинах.

ИСПЫТАНИЯ НА СРЕЗ ЦЕЛИКОВ В ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ

8.24. Сдвиг целиков грунта производится при действии на него двух сил – обжимающей вертикальной P и сдвигающей горизонтальной τ.

Испытания проводятся на песках различного состава с крупнообломочными включениями размером не более 8 см. Применяют-

ся схемы консолидированного и неконсолидированного срезов с предварительным уплотнением целика грунта и без предварительного уплотнения. Нормальную и касательную нагрузки создают с помощью домкратов или тарированными грузами. Строго регламентируется размер сдвигового кольца: внутренний диаметр $D = 400$ мм, высота $H = 220$ мм. В нижней части целика между торцом кольца и поверхностью выработки оставляется столбик грунта высотой 10–20 мм, по которому проходит плоскость среза; во избежание нарушения природного сложения грунта столбик устраивается после окончания монтажа установки. В процессе испытаний консолидированный срез грунта производится при различных вертикальных давлениях P в зависимости от состава и плотности исследуемого песка:

для плотных песков гравелистых, крупных и средней крупности $P = 0{,}1$; 0,3 и 0,5 МПа;

для песков гравелистых и крупных средней плотности и рыхлых, песков средней крупности и средней плотности, а также мелких плотных и средней плотности $P = 0{,}1$; 0,2 и 0,3 МПа;

для песков средней крупности и мелких рыхлых, а также для пылеватых независимо от плотности $P = 0{,}1$; 0,15 и 0,2 МПа.

При испытаниях по методу неконсолидированного среза вертикальные давления принимают равными 0,05; 0,1 и 0,15 МПа. Общее время испытаний по схеме неконсолидированного среза не должно превышать 5 мин. За сопротивление грунта срезу τ принимается максимальное значение τ, определенное по графику $\tau = f(l)$, при величинах деформации l, не превышающих 50 мм.

Подробное изложение методики проведения испытаний и камеральной обработки полученных результатов приводится в ГОСТ 23741–79.

8.25. Метод среза целиков обладает рядом принципиальных отличий от метода одноплоскостного среза:

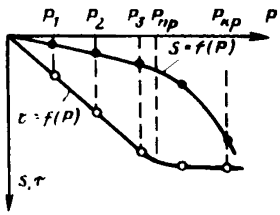
плоскость среза ограничена лишь с одной стороны сдвиговым кольцом; ниже этой плоскости находится полупространство;

осадка грунта от вертикальной нагрузки P локализуется в пределах сжимающей зоны мощностью $H \approx 2d \approx 80$ см, а не в слое толщиной 3,5 см, лежащем на несжимаемом основании (как при одноплоскостном срезе);

сдвиг производится при нескольких вертикальных нагрузках, максимальная из которых не должна превышать предела пропорциональности $P_{пр}$ для штампа, имеющего диаметр, равный диаметру сдвигового кольца.

8.26. Срез целика грунта происходит в условиях, моделирующих работу основания под фундаментом неглубокого заложения. В этом заключается его сходство с испытанием грунтов статическими нагрузками и штампом. Отсюда важная особенность метода, отличающая его от метода одноплоскостного среза. Если при лабораторных испытаниях вертикальное давление P практически

Рис.61. Выбор вертикальных давлений при испытаниях на срез целиков



ничем не ограничено, причем до нагрузки $P = 0{,}5 \div 1{,}0$ МПа зависимость между P и τ близка к прямолинейной, то при срезе целиков величина P не может быть выше несущей способности грунта $P_{кр}$. При достижении $P_{кр}$ происходит незатухающая осадка кольца и дальнейшее увеличение вертикального давления становится невозможным.

В интервале нагрузок $P_{пр} - P_{кр}$ рост вертикального давления практически не сопровождается увеличением τ. В этом интервале грунт под кольцом находится в запредельном состоянии, во второй фазе деформирования (по Н.М.Герсеванову). В грунте образуются локальные поверхности сдвига, формируются зоны выпора (разрыхления), что приводит к существенному снижению сопротивления грунта срезу. Рис.61, обобщающий результаты экспериментальных исследований, иллюстрирует это положение.

Рекомендуемые ГОСТ 23741–79 вертикальные давления P, установленные на основе одноплоскостного среза, не учитывают реальной несущей способности грунта под кольцом диаметром 40 см. Как показали выполненные в ПНИИИС исследования, максимальная из трех рекомендуемых нагрузок превышает $P_{пр}$. Таким образом, строгое регламентирование вертикальных давлений при испытаниях целиков на срез может приводить к существенному занижению показателей прочностных свойств грунтов. В связи с этим представляется более рациональной разработанная и опробованная нами методика, учитывающая несущую способность исследуемых песков. В процессе испытаний работа проводится в определенной последовательности. Подготовленное к опыту кольцо испытывается на сжатие по ускоренной методике с одновременным построением графика $S = f(P)$. Как только намечается нарушение пропорциональности между осадкой и нагрузкой, дальнейшее увеличение вертикального давления прекращается и производится срез грунта при $P_3 \leqslant P_{пр}$. Два других среза выполняются при нагрузках, равных: $P_1 = 1/3\, P_{пр}$; $P_2 = 2/3\, P_{пр}$.

8.27. Рекомендуемая методика позволяет получить помимо показателей прочностных свойств модуль деформации исследуемого грунта по графику $S = f(P)$. В этом случае используется несколько видоизмененная формула Шлейхера

$$E = (1 - \mu^2)\, \omega\, (d + h)\, \frac{\Delta P}{\Delta S},$$

где h – площадь слоя грунта в кольце, см.

Таблица 22

№ п.п.	Наименование песка	Геологический индекс	Природная влажность W, %	Коэффициент пористости e	Лабораторный срез одноплоскостной			Полевой срез целиков		
					количество испытаний n	φ^o	C, МПа	количество испытаний	φ^o	C, МПа
1	Средний	lim Q_{III}	6,0	0,797	17	37,1	0,011	11	25,1	0,009
2	Мелкий	"	4,4	0,716	18	33,4	0,017	8	21,4	0,008
3	Гравелистый	"	7,1	0,785	6	36,2	0,010	9	22,6	0,032
4	Пылеватый	"	13,0	0,822	9	34,8	0,018	19	26,3	0,023
5	Мелкий нефелиновый	teg Q_{IV}	23,6	0,705	6	36,4	0	6	18,2	0,003
6	То же	"	5,4	0,716	6	37,3	0,006	6	26,0	0,004
7	Мелкий намывной	"	10	0,727	9	33,8	0	4	21,0	0,008
8	Пылеватый намывной	"	19,4	0,574	9	39,4	0	10	20,8	0,009
9	То же	"	15,6	0,785	9	31,8	0,012	8	30,2	0,006

Площадь сдвигового кольца составляет ≈ 1300 см^2, в связи с чем получаемые значения E хорошо согласуются с данными стандартных штамповых испытаний.

8.28. Различие в условиях проведения полевых и лабораторных испытаний на срез весьма существенны и не могут не сказываться на получаемых показателях. В табл.22 приведены результаты сопоставительных испытаний, выполненных на озерных песках Кольского полуострова, нефелиновых песках, слагающих отвалы комбината "Апатит", и намывных песках дамб обвалования Копетдагского водохранилища.

Как видно из таблицы, различия между углами внутреннего трения очень велики. Объем выполненных исследований недостаточен для установления соответствующих коэффициентов перехода в зависимости от состава и плотности исследуемых песков. На данной стадии изучения этого вопроса следует пользоваться единым для всех случаев эмпирическим соотношением

$$\varphi_{лаб} = 1{,}45\,\varphi_{пол},$$

где $\varphi_{лаб}$, $\varphi_{пол}$ – углы внутреннего трения, полученные по данным одноплоскостного среза и среза целиков грунта.

МЕТОДИКА ПОВТОРНЫХ СРЕЗОВ

8.29. Повышение точности определения показателей прочностных свойств может быть достигнуто путем увеличения объема информации, получаемой при сдвиге. С этой целью наряду с основным, первичным сдвигом, выполненным по стандартной методике, рекомендуется произвести 2–3 повторных сдвига при возрастающих вертикальных давлениях. При этом в зависимости от состава исследуемых песков возможны три случая (рис.62). Линия *1* характерна для глинистых, преимущественно пылеватых, реже мелких песков, которые могут упрочняться в процессе среза. Линия *2* соответствует гравелистым и крупным пескам, не обладающим заметным сцеплением. Мелкие пески (линия *3*), как правило, несколько снижают сопротивление срезу при повторных сдвигах. Вместе с тем отклонения линий *2* и *3* от основно-

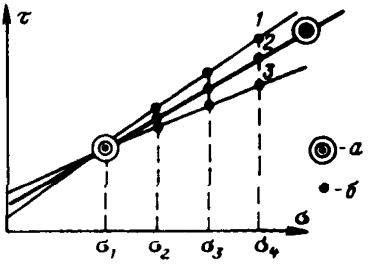


Рис.62. Изменение сопротивления *песков сдвигу* τ *при повторных срезах*

а – первичный срез; *б* – повторный срез

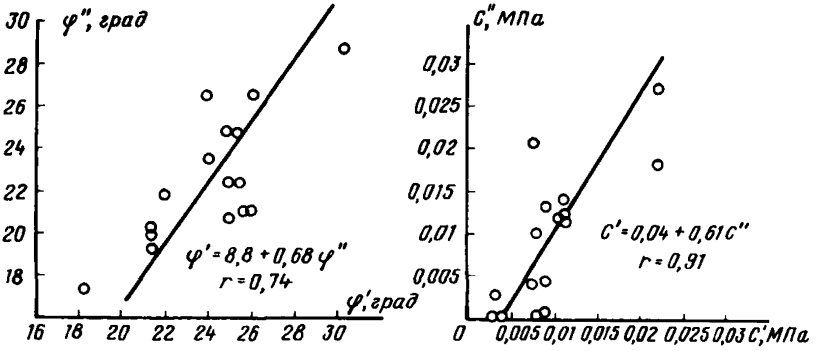


Рис.63. Взаимосвязь показателей прочностных свойств песков φ и C при первичном и повторном срезах целиков

го графика $\tau \rightarrow \rho$ (жирная линия), полученного по первичным сдвигам, невелики и находятся в пределах естественного разброса значений. Следует отметить, что первичные точки на графике относятся к различным монолитам, а повторные – к одному, что снижает погрешности определения φ и C по данным повторных сдвигов.

Сопоставление показателей прочности, полученных по первичным (φ' и C') и повторным (φ'' и C'') сдвигам, проведено на песках различного генезиса и состава и свидетельствует о достаточно хорошей взаимосвязи между ними (рис.63). В дальнейшем, по мере накопления фактического материала, эти зависимости можно дифференцировать с учетом конкретных особенностей исследуемых песков.

При проведении испытаний по методике повторных сдвигов максимальное сопротивление срезу при каждом вертикальном давлении фиксируется при возникновении незатухающих горизонтальных деформаций без увеличения касательных напряжений либо при горизонтальной деформации, не превышающей 20 мм. Указанная в ГОСТ 23741–79 величина $l = 50$ мм характерна для глинистых грунтов и не отвечает деформационному поведению песков, что следует учесть при очередном пересмотре документа.

МЕТОДИКА СДВИГА ЦЕЛИКОВ ГРУНТА С КОЛЬЦЕВОЙ ПРИГРУЗКОЙ

8.30. Метод сдвига целиков грунта является одним из наиболее трудоемких видов полевых испытаний. Он требует создания системы анкеровки для восприятия многотонных реактивных усилий; оборудование для испытаний тяжелое и громоздкое; не решен вопрос о проведении сдвигов на глубинах, превышающих

2–3 м, так как в этих условиях анкеровка упором в ферму, закрепленную на поверхности, становится очень сложной. Сокращение габаритов оборудования возможно при уменьшении диаметра сдвигового кольца. Однако такой путь ведет к уменьшению $P_{пр}$, в результате чего испытание может быть проведено только в области малых напряжений, т.е. на участке, где кривизна графика $\tau \to \rho$ сказывается особенно сильно (см. п.8.18).

С целью значительного облегчения трудоемкости сдвиговых испытаний при сохранении необходимого интервала вертикальных давлений в ПНИИИС разработан и изготовлен прибор для сдвига целиков с кольцевой нагрузкой. Создание пригрузки способно существенно повысить несущую способность исследуемого грунта.

Прибор для сдвига с кольцевой пригрузкой достаточно компактен и может использоваться в шурфах площадью 1х2,5 м. Площадь сдвигового кольца составляет 40 см^2, а площадь кольцевой пригрузки – 200 см^2. Конструкцией прибора предусмотрена возможность независимого приложения вертикальных нагрузок к сдвиговому кольцу P и к кольцевой пригрузке $P_{к.п}$.

Сопоставление углов внутреннего трения по данным испытаний, выполненных по стандартной методике и на установке облегченного типа с кольцевым пригрузом, показано на рис.64. Приведенные данные свидетельствуют о хорошей сходимости результатов, что позволяет рекомендовать метод сдвига целиков грунта с кольцевой пригрузкой для массового использования. Данные по сцеплению гораздо хуже согласуются между собой из-за высокой изменчивости этого показателя. В целом значения C, получаемые на установке облегченного типа, несколько ниже из-за малых размеров исследуемого образца (больше вероятность нарушений при вырезке кольца). Для перехода к данным стандартного среза целиков рекомендуется эмпирическое соотношение

$$C_{ст} = 1{,}2\, C_{к.п},$$

где $C_{к.п}$ – сцепление по данным испытаний с кольцевой пригрузкой.

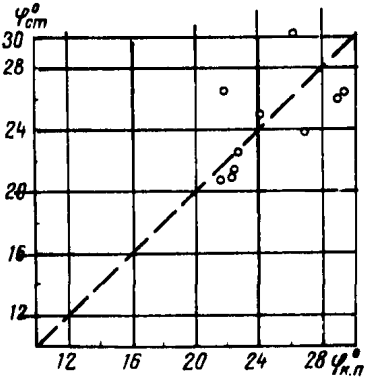


Рис.64. Зависимость $\varphi_{ст}$ от $\varphi_{к.п}$

ИСПЫТАНИЯ МЕТОДОМ ПОСТУПАТЕЛЬНОГО СРЕЗА В СКВАЖИНАХ

8.31. Метод поступательного среза применяется для изучения прочностных свойств песков любого состава (кроме гравелистых) средней плотности и рыхлых неводонасыщенных, не содержащих крупнообломочных включений размером более 10 мм или гальки и гравия (2–10 мм) в количестве более 15% по весу. Толщина однородного слоя грунта, предназначенного для испытания на срез в скважинах, должна быть не менее 1,5 высоты рабочего наконечника. Предельная глубина испытания грунтов методом поступательного среза 20 м. Испытания следует проводить с помощью установок, состоящих из следующих основных узлов:

рабочего наконечника, представляющего собой распорный штамп (или прессиометр) с поперечными лопастями;

устройств для создания и измерения нормального и касательного давлений;

приборов для измерения деформаций сжатия и среза грунта.

Основные технические требования к аппаратуре, предназначенной для производства испытаний, изложены в ГОСТ 21719–80.

В настоящее время существуют два типа приборов для испытаний методом поступательного среза. В п.7.36 дано описание штампа распорного для испытания грунтов в скважине и в массиве. С помощью несложного приспособления его переоборудуют для производства поступательного среза. С этой целью распорные штампы оснащают съемными поперечными грунтозацепами толщиной 1,5–3 и высотой 5–10 мм. Расстояние между грунтозацепами составляет 40 мм.

8.32. Подготовку стенок скважины к испытаниям следует проводить, срезая стенки боковыми полками двутавра. В процессе испытаний прибор опускается в скважину на заданную глубину, после чего поперечные лопасти вдавливают в грунт ступенями нормальных давлений по 0,01–0,02 МПа до момента соприкосновения распорного штампа (или стенок прессиометра) со стенками скважины. Испытания проводятся при консолидированном и неконсолидированном режимах при трех вертикальных давлениях, большее из которых не должно превышать $\sigma_{пр}$. Установление значений σ производится аналогично методике, рекомендованной при срезе целиков.

Методика определения прочностных свойств песков методом поступательного среза регламентируется ГОСТ 21719–80.

Максимальное сопротивление сдвигу фиксируется по резкому увеличению скорости перемещения рабочего наконечника либо по максимальному усилию на выдергивание при перемещении на 3 см.

Сдвиги при больших значениях вертикальных давлений рекомендуется проводить без монтажа и демонтажа прибора. В этом случае 2-й и 3-й сдвиги производятся в той же скважине сразу же

после завершения 1-го среза. Сопоставление результатов, полученных по указанной методике, с опытами, при которых каждый сдвиг осуществляется на одной и той же глубине в разных скважинах (в опытном кусте), указывает на близкие значения показателей прочностных свойств. Различие между углами внутреннего трения составляет 1–2,5° (большие значения получаются при испытаниях в одной скважине), величина сцепления изменяется без видимой закономерности.

Имеющиеся материалы свидетельствуют о удовлетворительной сходимости показателей прочности, определенных методом поступательного среза в скважинах, с результатами одноплоскостного лабораторного среза и данными трехосных испытаний.

КОСВЕННЫЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ

8.33. При проведении изысканий под сооружения II–IУ классов капитальности нормативными документами (СНиП II-15-74) допускается использование косвенных методов оценки величин c и φ. Преимущества использования косвенных методов очевидны: они позволяют заменить трудоемкие виды исследований более простыми, не требующими сложной аппаратуры и высококвалифицированных исполнителей. В качестве косвенных методов определения c и φ используются, так же как и при определении показателей деформационных свойств (п.7.41), зондирование и определение пористости и гранулометрического состава. Применение косвенных методов основано на установлении корреляционных зависимостей между показателями сжимаемости и другими характеристиками, определение которых не представляет большой сложности. Подобный подход реализован СНиП II-15-74 и "Указаниями по зондированию" (СН 448-72), где приводятся таблицы, устанавливающие взаимосвязь между показателями зондирования песков, их коэффициентом пористости, крупностью и прочностными характеристиками.

8.34. С целью дальнейшего совершенствования методики определения показателей прочностных свойств песков по косвенным данным в ПНИИИС последние 10 лет проводилось систематическое изучение прочностных свойств песков различного состава и генезиса комплексом полевых и лабораторных методов. Обработка результатов исследовании методами многомерного и корреляционно-регрессионного анализа свидетельствует, что показатели прочностных свойств песков наиболее тесно связаны с динамическим сопротивлением $P_Д$ и коэффициентом пористости e. Остальные показатели (средний диаметр частиц, коэффициент неоднородности, влажность и т.п.) малоинформативны. По-видимому, влияние этих факторов можно установить, лишь существенно увеличив объем исследований по каждой разновидности песков и снизив таким образом погрешность получаемых резуль-

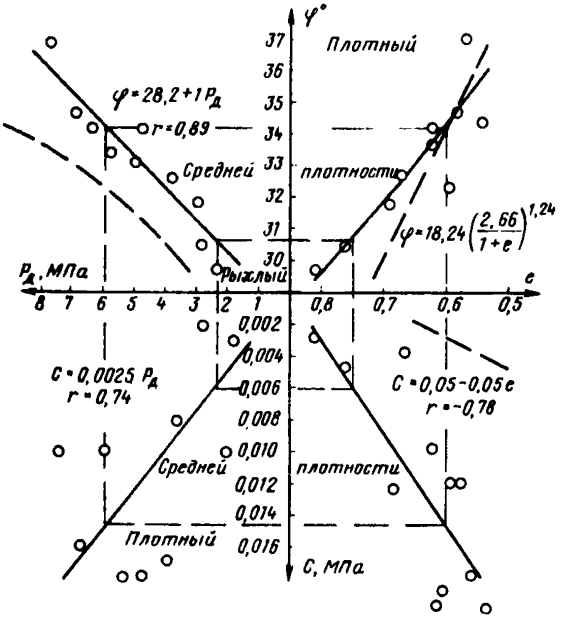


Рис.65. Графики взаимосвязи между φ, C, $P_Д$ и e по экспериментальным данным

татов. Однако на основе выполненных исследований нет смысла использовать все аргументы для определения C и φ, так как уравнение с одной переменной ($P_Д$ или e) дает такую же точность прогноза, как и многомерное уравнение регрессии.

Корреляционные зависимости между показателями зондирования, коэффициентом пористости и прочностными характеристиками, полученные по данным экспериментальных исследований, выражаются уравнениями:

$$\varphi = 28{,}2 + 0{,}1\,P_Д;$$

$$\varphi = 18{,}24\left(\frac{2{,}66}{1+e}\right)^{1{,}24};$$

$$C = 0{,}0025\,P_Д;$$

$$C = 0{,}5 - 0{,}59e.$$

Обобщенные результаты выполненных экспериментальных исследований показаны на рис.65. Здесь же для сопоставления показаны графики, построенные по данным СНиП II-15-74 (пунктирная линия). Как видно из сопоставления графиков, использование результатов экспериментальных исследований позволит повысить значения показателей прочностных свойств по данным косвенных определений.

9. ИЗУЧЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ПЕСКОВ

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

9.1. Деформационные и прочностные свойства песков могут существенно меняться при динамических воздействиях. Эти воздействия сопровождаются возникновением ускорения колебаний образца или массива и появлением инерционных сил, приложенных к центрам масс отдельных грунтовых частиц. Действие инерционных сил приводит к разрушению структурных связей между частицами. Первоначальные локальные зоны разрушения внутренних связей в грунте образуются около наиболее крупных и тяжелых частиц. С увеличением ускорения колебаний выше определенных критических значений наступают процесс массового слияния локальных зон и замена исходных более прочных связей менее прочными. Следствием ослабления структурных связей и появления дополнительных динамических напряжений является снижение прочности грунта и возникновение дополнительных деформаций уплотнения и сдвига.

В зависимости от свойств песка (внутренних факторов), характера и длительности приложения ударных и вибрационных, а также статических нагрузок (внешних факторов) неблагоприятные последствия динамического воздействия могут проявляться в виде вибропросадочности, плывунности и разжижения.

9.2. Вибропросадочностью (термин предложен Н.И.Кригером) называется способность грунта к дополнительному уплотнению при динамическом воздействии в результате вызванного этим воздействием ослабления структурных связей коренного изменения структуры грунта. Вибропросадочность характеризуется кратковременно протекающими осадками с последующей быстрой стабилизацией. Вибропросадочность может проявляться в песках рыхлых и средней плотности сложения, различной степени крупности и влажности, в том числе и в водонасыщенных песках с хорошими условиями дренирования.

9.3. Плывунность большинством авторов формулируется как способность водонасыщенных дисперсных пород переходить в подвижное состояние при вскрытии их горными выработками. В соответствии с этим определением причиной возникновения плывунности могут быть статическое давление вышележащих толщ, гидродинамический напор и другие силы, создающие касательные напряжения τ, вызывающие вытекание грунта в котлован, выработку и т.п. Плывунность может проявляться и без динамических воздействий, поэтому включение этого явления в данный раздел в известной степени условно.

9.4. Разжижение песков относится к числу наиболее грозных явлений, связанных с динамическим воздействием. Несмотря на огромные масштабы катастроф, вызванных этим явлением [10],

оно практически не описано в основной справочной и учебной литературе. Имеющиеся сведения часто содержат неточности и ошибки; разжижение иногда отождествляется с тиксотропией и плывунностью. Поэтому целесообразно подробнее остановиться на этом вопросе.

Основные представления о явлении разжижения определялись к началу 50-х годов в результате исследований В.А.Флорина, Н.Н.Маслова, М.Н.Гольдштейна, Н.Л.Иванова. В настоящее время оно формулируется как полная или частичная потеря водонасыщенным песком несущей способности, возникающая в результате разрушения структуры и смещения частиц песка относительно друг друга, сопровождаемая увеличением порового давления и уменьшением пористости.

9.5. Основные черты сходства и различия между разжижением и плывунностью заключаются в следующем. Плывунность, как отмечалось выше, представляет собой способность водонасыщенных дисперсных пород (практически любого состава) переходить в подвижное состояние при вскрытии их горными выработками. Согласно этой формулировке, для проявления плывунности необходимо наличие касательных напряжений, которые превысили бы сопротивление породы сдвигу. Источником таких напряжений могут быть статические, гидродинамические или вибрационные воздействия.

Разжижение в отличие от плывунности может проявляться в любом замкнутом объеме и при отсутствии касательных напряжений ($\tau = 0$). Статическая нагрузка, способствующая возникновению плывунности, препятствует проявлению разжижения.

Плывунности могут быть подвержены практически любые водонасыщенные породы, способные к перемещению под действием статического, гидродинамического или других напряжений, действующих в направлении разгруженного вскрытого откоса. Плывунность реализуется перемещающейся массой грунта (плывуна), поступающего в горные выработки, скважины, котлованы и т.п.

Разжижение наиболее полно проявляется преимущественно в мелких и пылеватых песках, так как в более крупных по составу грунтах с большим коэффициентом фильтрации процесс разупрочнения чрезвычайно кратковременен (доли секунты), а в более дисперсных грунтах с низкой водопроницаемостью уплотнение затруднено процессами тиксотропного восстановления структурного каркаса. Внешне явление разжижения проявляется в оседании поверхности и проявлении грифонов в связи с резким повышением порового давления подземных вод.

Таковы основные различия между плывунностью и разжижением. Эти процессы вызываются различными причинами и различно проявляются внешне (рис.66).

9.6. Определенные черты сходства и различия имеются между явлениями разжижения и тиксотропии. Тиксотропией называется

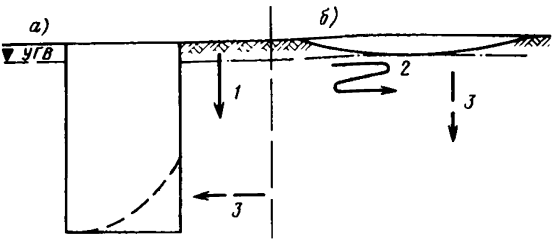


Рис.66. Схема действия главных сил, вызывающих явления

а – плывунности; *б* – разжижения; *1* – статическая нагрузка; *2* – динамическая нагрузка; *3* – гидродинамический напор

разрушение структуры грунта при механическом воздействии и последующее самопроизвольное развитие ее во времени под влиянием броуновского движения молекул дисперсной среды. Тиксотропия представляет собой обратимый изотермический процесс. Он проявляется в грунтах с частицами размером меньше 0,005 мм, способных к поступательному броуновскому движению. Если система состоит из частиц размером 0,01 мм и больше, она, как правило, не тиксотропна, так как под действием своей массы частицы укладываются компактно.

Между явлениями тиксотропии и разжижения много общего. Общность проявляется во внутреннем состоянии грунта, подверженного этим явлениям (рыхлое сложение и сравнительно слабые структурные связи), во внешних факторах, способствующих их проявлению (динамические воздействия с нарушением структуры), и в сходной реакции на внешние воздействия (временное разупрочнение с последующим упрочнением). Однако причины упрочнения пород при тиксотропии и разжижении различны, в чем и заключается принципиальное различие между ними. В тиксотропных системах упрочнение сопровождается созданием рыхлого структурного каркаса и восстановлением структурных связей. При разжижении рыхлая структура не восстанавливается, а упрочнение происходит за счет создания более компактного осадка. Процесс тиксотропии является обратимым: многократные динамические воздействия одной и той же интенсивности приводят к одним и тем же последствиям. Упрочнение при разжижении – необратимый процесс: после уплотнения грунт практически теряет способность к разжижению под действием таких же, как первоначальная, динамических нагрузок. Для повторного проявления разжижения необходимы более мощные динамические воздействия.

Основные черты различия и сходства между тиксотропией и разжижением показаны в табл.23.

Таблица 23

Фактор	Разжижение	Тиксотропия
Плотность сложения	Преимущественно рыхлое	
Дисперсность грунтов	$>0{,}01$ мм	$<0{,}01$ мм
Реакция на динамическое воздействие	Разрушение структуры и разупрочнение	
Завершение процесса	Уплотнение	Восстановление рыхлого структурного каркаса
Общий характер процесса	Необратимый	Обратимый

9.7. Возможность возникновения неблагоприятных явлений, связанных с динамическим воздействием на грунт, и степень их проявления зависят от динамической устойчивости песков. Под динамической устойчивостью понимается сопротивление песков динамическому воздействию, определяемое рядом внешних и внутренних факторов. В общем случае условие устойчивости грунта по какой-либо площадке можно представить уравнением [12]

$$\tau \pm \Delta\tau_{д} < [\sigma - \rho(t) \pm \Delta\sigma_{д}(t)] \operatorname{tg}\varphi,$$

где τ, σ – касательные и нормальные напряжения в скелете грунта по рассматриваемой площадке до приложения динамической нагрузки;

$\Delta\tau_{д}(t), \Delta\sigma_{д}(t)$ – дополнительные напряжения в период действия динамической нагрузки;

$\rho(t)$ – избыточное давление в поровой воде, возникающее в результате действия динамической нагрузки;

φ – угол внутреннего трения.

Согласно последним представлениям, угол внутреннего трения песка не изменяется под влиянием динамических воздействий. Этот вывод сделан на основе многочисленных экспериментов [12], результаты которых обрабатывались с учетом амплитуды циклических напряжений.

ВЛИЯНИЕ ВНЕШНИХ И ВНУТРЕННИХ ФАКТОРОВ НА ДИНАМИЧЕСКУЮ УСТОЙЧИВОСТЬ ПЕСКОВ

9.8. Сопротивление песков динамическим воздействиям зависит, с одной стороны, от внешних факторов – величины этих воздействий, их направления, начального статического напряжения, испытываемого грунтом, а с другой – от внутренних факторов, характеризующих состав, строение и свойства песка.

9.9. Исследованиями Д.Д.Баркана [1], Н.Н.Маслова [13] установлено, что в качестве меры динамического вибрационного воздействия на грунты рекомендуется принимать максимальное ускорение колебаний

$$\eta = A\omega^2,$$

где A – амплитуда колебаний;
ω – круговая частота.

Отмечено, что изменение деформационных и прочностных свойств грунтов при увеличении η подчиняется экспоненциальной зависимости начиная с определенного значения ускорений колебаний, которое было названо пороговым, или критическим, ускорением $\eta_{кр}$ (рис.67) и является характеристикой динамической устойчивости песков.

Начальная статическая нагрузка оказывает наибольшее влияние на поведение грунтов при вибрации, и прежде всего на значение критического ускорения. По Н.Н.Маслову [13], зависимость критического ускорения $\eta_{кр}$ от нагрузки (рис.68) может быть представлена в виде

$$\eta_{кр} = \alpha\rho + \eta_0,$$

где ρ – статическая нагрузка;
α – угловой коэффициент;
η_0 – критическое ускорение при отсутствии нагрузки.

Имеются также указания на нелинейный характер зависимости критического ускорения от статической нагрузки.

Существенное влияние статическая нагрузка оказывает на величину конечного коэффициента пористости при динамических воздействиях. В общем случае зависимость конечного коэффициента пористости от статической нагрузки при динамических воздействиях нелинейна и носит сложный характер [1].

Направление колебаний оказывает малое влияние на эффект вибрации при сравнении результатов вибрации в двух направлениях – горизонтальном и вертикальном [1]. Работами И.Т.Валишева, В.А.Ершова доказано, что эффект вибрации зависит от угла

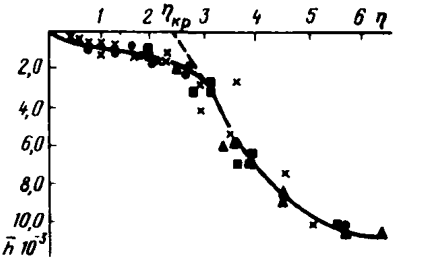


Рис.67. Зависимость изменения относительной осадки песчаных грунтов $\bar{h}$ от величины относительного ускорения η при разных частотах колебаний (по И.Н.Ермолаеву и Н.В.Сенину, 1969)

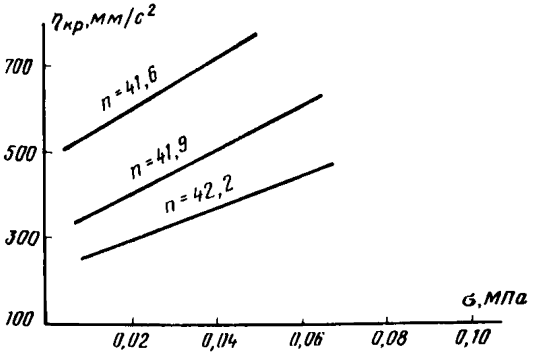


Рис.68. Зависимость критического ускорения $\eta_{кр}$ от вертикальной нагрузки σ (n – пористость, %) (по Н.Н.Маслову, 1959)

направления колебаний по отношению к горизонту. При этом отмечено, что наименьшее критическое ускорение достигается при угле направления колебаний, близком к углу внутреннего трения грунтов.

9.10. Влияние частоты колебаний грунта ω на его деформируемость рассматривается в работах [1, 13]. В пределах реальных сейсмических и промышленных частот влияние величины ω на конечную осадку песков незначительно. При более высоких частотах (50–100 Гц и и выше), при постоянных значениях ускорения колебаний наблюдается тенденция к некоторому увеличению конечной относительной плотности. Влияние частоты в этом диапазоне сказывается в основном на увеличении времени достижения конечной осадки.

ВНУТРЕННИЕ ФАКТОРЫ

9.11. Влияние угла внутреннего трения на величину критического ускорения довольно существенно. По данным В.А.Ершова, критическое ускорение, при котором начинается изменение сопротивления сдвигу, подчиняется следующим зависимостям:

$$\eta_{кр} = \frac{\eta_0 + m_0 \rho}{1 + \frac{m_0 \rho}{g} \cos\Delta}; \qquad \eta_0 = a e^{bD},$$

где η_0 – критическое ускорение при $\rho = 0$;
a, b – параметры, зависящие от физических свойств грунтов;
D – относительная плотность;
m_0 – коэффициент пропорциональности, зависящий от угла внутреннего трения;
Δ – угол наклона возмущающей силы к вертикальной оси.

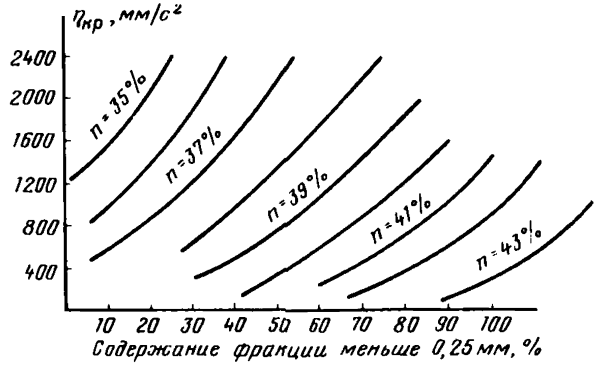


Рис.69. Зависимость критического ускорения $\eta_{кр}$ от гранулометрического состава песков при различных значениях пористости (по Н.Н.Маслову, 1969)

Для водонасыщенных песков может быть использована рекомендуемая Н.Н.Масловым зависимость [13]

$$\eta_{кр} = M(\rho_0 + \Delta_b h) tg \varphi,$$

где ρ_0 – пригрузка;
Δ_b – удельный вес воды;
h – высотая слоя;
M – коэффициент, зависящий от физических свойств грунтов.

9.12. Гранулометрический состав песков оказывает влияние на поведение грунтов при вибрации. Установлено [13], что с увеличением содержания частиц меньше 0,25 мм критическое ускорение увеличивается (рис.69). Д.Д.Баркан, а затем Н.И.Ермолаев, выявили зависимость коэффициента пористости от времени вибрирования

$$e = e_\eta + (e_0 - e_\eta) e^{-\beta t},$$

где β зависит от гранулометрического состава и статического давления.

Содержание глинистых частиц снижает динамическую устойчивость песков. Установлено, что увеличение содержания глинистых частиц в песках на 10–30% приводит к увеличению конечного коэффициента пористости грунта на 5–15%.

Большое влияние на поведение грунтов при динамических воздействиях оказывает форма частиц. По К.Терцаги, наиболее неустойчивые с точки зрения разжижения пески содержат большое количество окатанных зерен.

При обработке результатов опытов с различными песками И.Т.Валишев получил для критического ускорения зависимость

$$\gamma_{кр} = EA^{p}D^{n},$$

где A – амплитуда колебаний;
D – относительная плотность песка;
p, n – коэффициенты, зависящие от свойства грунтов и условий проведения опытов;
E – коэффициент, связанный с формой частиц зависимостью

$$E = 264,1\,N^{0,83},$$

здесь N – процент содержания угловатых зерен.

9.13. Начальная пористость песков в значительной степени определяет их деформацию при динамических воздействиях. Так как конечный коэффициент пористости, по мнению многих исследователей [1, 10], является константой для каждого грунта, то чем больше начальный коэффициент пористости, тем больше осадка песка при вибрации. При оценке предполагаемой осадки необходимо учитывать статическую нагрузку и влажность песка. Как правило, при статической нагрузке плотность укладки при одних и тех же ускорениях снижается [1]. Это объясняется тем, что статическая нагрузка увеличивает трение между частицами, требуя дополнительной энергии для его преодоления.

9.14. Влияние влажности при вибрации грунтов установлено Д.Д.Барканом, О.Я.Шехтером и др. Отмечено, что меньший эффект при вибрации наблюдается в пределах $5\% < W < 13\%$, что объясняется возникновением в песке сил капиллярной связности.

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ВИБРОПРОСАДОЧНОСТИ

9.15. Работами Д.Д.Баркана, О.А.Савинова и др. установлено, что вибрационные воздействия могут вызывать в грунтах основания дополнительные осадки (вибрационные просадки – по терминологии Н.И.Кригера).

Считая, что грунты при вибрации могут уплотняться до некоторой предельной в конкретных условиях величины коэффициента пористости e_b, и зная коэффициент пористости в условиях их естественного залегания e_0, вибрационную просадку определяют по формуле

$$S_b = \sum_{0}^{H_B} h_i \frac{e_0 - e_b}{1 + e_0}.$$

Здесь знак суммы должен быть распространен на все слои грунта – от подошвы источника колебаний до глубины H_B, соответствующей мощности виброуплотняемой толщи.

9.16. По данным П.Л.Иванова [12], наличие предельного коэффициента пористости e_b является существенной особенностью ударно-виброкомпрессионного уплотнения несвязных грунтов. В результате виброкомпрессионных опытов с песками получена

связь конечной достигаемой величины коэффициента пористости e_b с интенсивностью статической нагрузки σ и ускорениями колебаний η. В достаточно широком диапазоне ускорений колебаний (до $0{,}8\,g$) зависимость коэффициента пористости от сжимающих напряжений в скелете грунта при постоянном ускорении колебаний может быть принята линейной

$$e_b = e_0 - \alpha(\sigma_{e_0} - \sigma_g),$$

где α – коэффициент уплотнения;

σ_{e_0} – статические напряжения, которые при начальном коэффициенте пористости e_0 препятствуют разрушению структуры грунта динамическим воздействием интенсивностью η;

e_0 – конечный коэффициент пористости при действующих в грунте динамических напряжениях σ_g и ускорениях колебаний η.

При однородном слое грунта с постоянным по глубине объемным весом γ_0, коэффициентом пористости e_0 и равномерном по толще ускорении колебаний (например, при сейсмических воздействиях) мощность виброуплотняемой толщи H_B определяется из условия $\sigma_z = \gamma_0 H_b = \sigma_{e_0}$, откуда $H_B = \sigma_{e_0} / \gamma_0$ Тогда конечный коэффициент пористости равен:

$$e_b = e_0 - \alpha(\gamma_0 H_B - \gamma_0 z).$$

После простейших преобразований получим

$$S_b = \frac{1}{2} \frac{\alpha \gamma_0}{1 + e_0} H_B^2.$$

Достоинством рассмотренной методики расчета является возможность прогнозирования виброосадок в достаточно широком диапазоне вертикальных нагрузок. Указанная методика требует допущения, что при ускорениях колебаний, величина которых ниже критического ускорения, остаточные деформации в грунте отсутствуют.

9.17. Просадка песков может быть вызвана небольшими по ускорениям колебаниями, реально возникающими при сейсмических и промышленных динамических нагрузках (табл.24).

Таблица 24

Вид динамических нагрузок	Параметры нагрузок	Максимальные ускорения колебаний грунта α, м/с^2	Относительное ускорение α / g
Сейсмические	7 баллов	0,61–1,2	0,062–0,122
	8 баллов	1,21–2,4	0,123–0,244
	9 баллов	2,41–4,8	0,246–0,489
Промышленные	Машина с вращающимися деталями при числе оборотов 1200 об/мин и амплитуде колебаний 0,1 мм	0,39	0,04

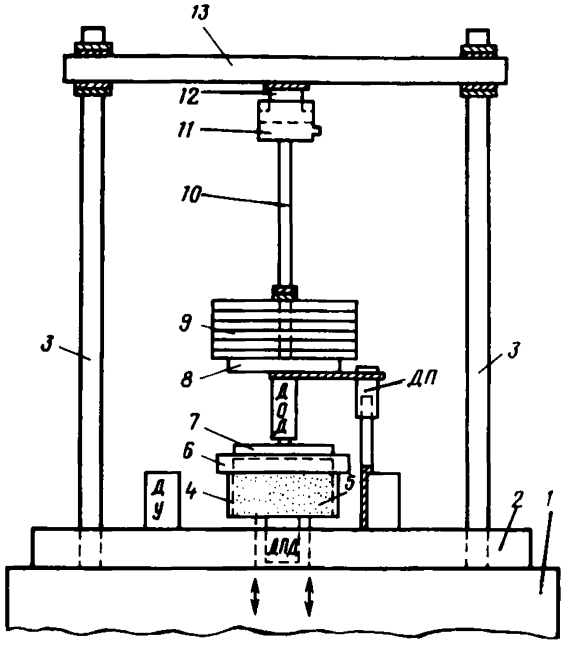


Рис.70. Принципиальная схема виброкомпрессионного прибора конструкции ПНИИИС–НИС Гидропроект

1 – вибростенд; *2* – опорная плита; *3* – стойки; *4* – подстаканник; *5* – стакан с грунтом; *6* – зажимное кольцо; *7* – штамп; *8* – грузовая площадка; *9* – грузы (гири); *10* – стержень грузовой площадки; *11* – цилиндр гидродомкрата; *12* – поршень гидродомкрата; *13* – грузовая траверса; *ДВ* – датчик вибрации; *ДУ* – датчик ускорений; *ДП* – датчик перемещения штампа; *ДОД* – датчик общего давления; *ДПД* – датчик порового давления

Для прогнозирования возможных вибропросадок грунта в достаточно широком диапазоне вертикальных нагрузок в ПНИИИС разработана методика определения вибропросадочности грунтов, аналогичная методике определения просадочности при замачивании. Испытания проводятся на компрессионном приборе, совмещенном с вибрационным стендом. В качестве возможного варианта оборудования для таких испытаний на рис.70 показана схема прибора, разработанного и изготовленного совместно ПНИИИС и НИС Гидропроекта. Рекомендуемая методика испытаний заключается в следующем. К образцу грунта с заданной плотностью и влажностью прикладываются различные вертикальные нагрузки σ (0,01; 0,025; 0,05; 0,1; 0,2 и 0,3 МПа). После стабилизации

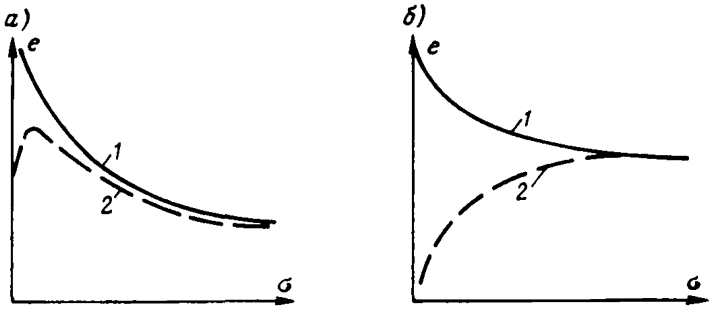


Рис.71. Компрессионные кривые при различных видах уплотняющих нагрузок

а – песок влажный; *б* – песок воздушно-сухой; *1* – статические нагрузки; *2* – совместное воздействие статических и динамических нагрузок

осадки от статической нагрузки производится вибрация грунта в режиме предполагаемого динамического воздействия. За стабилизацию осадки при вибрации принимается приращение осадки не более 0,01 мм за 45 с вибрирования.

Характер деформирования песков под влиянием вибрационных воздействий при различных вертикальных давлениях показан на рис.71. Приведенные графики несколько напоминают результаты компрессионных испытаний грунтов с замачиванием по схеме "двух кривых". Верхняя кривая представляет собой обычный график $e = f(\sigma)$ при статическом нагружении, нижняя показывает изменение коэффициента пористости при динамическом воздействии. В качестве критерия вибропросадочности вводится понятие относительной вибропросадки:

$$i_b = \frac{h_{ст} - h_в}{h_{ст}},$$

где $h_{ст}$ – высота образца породы после уплотнения статической нагрузкой;
h_b – то же, после вибрационного воздействия.

Вибропросадочными следует считать грунты при $i_b \geqslant 0{,}01$, а общую мощность виброуплотняемой толщи определяют из величины давления, при которой $i_b = 0{,}01$.

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ СПОСОБНОСТИ ПЕСКОВ К РАЗЖИЖЕНИЮ

9.18. Процесс разжижения хорошо иллюстрируется моделью несвязного грунта в виде рыхло уложенных шаров [10]. При разрушении структуры, например, путем сдвига верхнего ряда шаров они временно занимают положение над промежутками между ша-

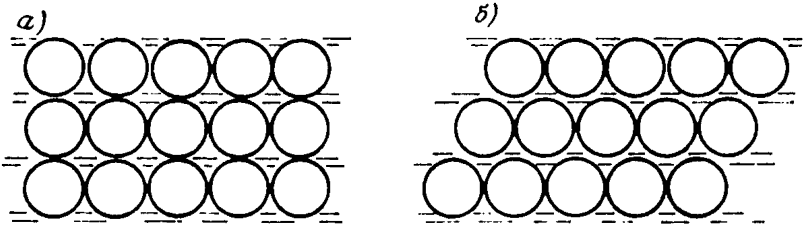


Рис.72. Модель разжижения рыхлого водонасыщенного несвязного грунта (по Л.Л.Иванову)
а – структура грунта до разжижения; *б* – структура грунта после разжижения

рами нижнего ряда (рис.72), что приводит к потере контактов между шарами верхнего и нижнего рядов. Под действием собственного веса шары верхнего ряда стремятся опуститься в промежутки между шарами нижнего ряда и образовать более плотную укладку. Так как пространство между шарами заполнено водой, то перемещение вниз шаров верхнего ряда происходит не сразу. Оно зависит от скорости отжатия воды и сопровождается увеличением давления поровой жидкости. Погружение шаров верхнего ряда в промежутки между шарами нижнего ряда иллюстрирует разжиженное состояние песка, так как из-за отсутствия контактов между частицами прочность системы шаров резко снижается.

Необходимыми условиями возникновения явлений разжижения, таким образом, являются разрушение структуры, возможность уплотнения грунта, полное или близкое к полному насыщение грунта водой. Невыполнение какого-либо из них приводит к невозможности возникновения явлений разжижения. Мероприятия по борьбе с разжижением основаны на нарушении тем или иным путем одного из данных условий.

Способность песков переходить в разжиженное состояние зависит от интенсивности воздействий, в частности динамических, начального напряженного состояния, пористости, прочности структурных связей. Установлено, что разжижение может происходить в водонасыщенных песках любой крупности. Общий характер процесса разжижения не зависит от гранулометрического состава, но с увеличением крупности и, следовательно, водопроницаемости значительно уменьшается время пребывания грунта в разжиженном состоянии. Например, при разрушении структуры водонасыщенных крупнозернистых песков время пребывания их в разжиженном состоянии настолько мало (доли секунды), что в них практически не проявляются опасные последствия этого явления. Время консолидации грунта в основном определяется его водопроницаемостью, величиной изменения пористости, длиной пути фильтрации отжимаемой из пор грунта воды и мощностью зоны разжижения.

9.19. На этапах, предшествующих производству испытаний, грунты следует подразделять на разновидности, обладающие или не обладающие потенциальной способностью к разжижению. Грунтами, не вызывающими опасений в отношении их разжижения, являются:

грунты, слагающие маломощные слои с уклоном менее 2%; предполагается, что даже в случае разжижения больших смещений или осадок не произойдет;

глинистые грунты с достаточно высоким сцеплением или песчаные грунты плотного сложения;

крупнозернистые грунты с хорошими условиями дренирования.

Если по данным предварительного анализа инженерно-геологических условий исследуемой территории грунты нельзя отнести к категории динамически устойчивых, то проводятся соответствующие испытания.

Ниже рассматриваются основные методы оценки возможности перехода песков в разжиженное состояние.

9.20. Методом критических ускорений колебаний в соответствии с методом, предложенным О.А.Савиновым, Н.Н.Масловым, в качестве критерия невозможности возникновения явлений разжижения принимается условие

$$\eta = K_з \, \eta_д \leqslant \eta_{кр},$$

где η – расчетное ускорение колебаний;

$K_з$ – коэффициент запаса;

$\eta_д$ – действующее в рассматриваемой зоне массива грунта ускорение колебаний;

$\eta_{кр}$ – критическое ускорение колебаний для конкретного грунта при статическом напряжении, соответствующем условиям его залегания.

Действующее в массиве грунта ускорение колебаний $\eta_д$ определяется или прогнозируется различными методами: путем решения динамических задач колебаний грунтов, на основе натурных наблюдений и т.д. Критические ускорения колебаний определяются по результатам виброкомпрессионных испытаний.

Таким образом, при оценке возможности разжижения по методу критических ускорений колебаний ставится условие отсутствия заметного разрушения структуры грунта.

9.21. Метод взрывного зондирования разработан П.Л.Ивановым [11] и основан на использовании взрывов камуфлетных зарядов в грунтах, т.е. взрывов без образования воронки выброса или выпора грунта.

При камуфлетном взрыве в водонасыщенном несвязном грунте практически мгновенно образуется камуфлетная полость (сфера), заполненная газами взрыва, и по водонасыщенному грунту распространяется интенсивная ударная волна. В результате действия ударной волны, а также благодаря расширению газовой полости и действию фильтрационных сил происходит разрушение

структуры достаточно рыхлого несвязного грунта и его разжижение на больших расстояниях от места взрыва.

После разрушения структуры происходит процесс переукладки частиц – уплотнение разжиженного грунта и осадка поверхности. В качестве основного критерия возможности разжижения водонасыщенных песков в методе взрывного зондирования принимается средняя относительная осадка поверхности δ в пределах радиуса воронки оседания R:

$$\delta = \frac{S_R}{h_{уп}} \ 100\%,$$

где S_R – средняя осадка в радиусе R;
$h_{уп}$ – глубина зоны разрушения структуры, равная полуторной глубине заложения заряда.

Радиус воронки оседания может быть определен инструментально на местности или по эмпирической зависимости

$$R = (5 \div 2)\sqrt[3]{Q},$$

где Q – масса заряда, кг.

Заряд для камуфлетного взрыва рассчитывается по формуле

$$Q = 0{,}55\, h^3,$$

где h – глубина заложения заряда.

Для замера осадки на поверхности по двум взаимно перпендикулярным направлениям разбивается нивелировочная сеть. Через 1–2 м забиваются колышки или устанавливаются поверхностные марки и производится нивелировка поверхности до и после взрыва.

Оценка способности мелких и средней крупности песков к разжижению по данным взрывного зондирования производится согласно табл.25, составленной П.Л.Ивановым [11].

При необходимости выделения наиболее рыхлых участков и дифференцированной оценке динамической устойчивости песков по глубине слоя следует производить зондировочные взрывы зарядов различной массы на различных глубинах.

Чтобы обеспечить отсутствие заметного влияния взрыва первого заряда Q_1 на результаты испытания слоя грунта вторым зарядом большей массы Q_2, эти взрывы должны производиться на расстоянии больше, чем $2R_1 + 2R_2$.

9.22. Метод динамического зондирования не только комплексно характеризует плотностно-прочностные особенности песков, но и четко отражает изменения их после камуфлетных взрывов.

Практическая применимость динамического зондирования для оценки разжижаемости песков была установлена Н.В.Замориной и И.В.Дудлером при изучении намывных песков. В этих опытах впервые была получена связь между показателями динамического

Таблица 25

Характеристика плотности песков и возможности их разжижения	Средняя относительная осадка поверхности в пределах	Средняя осадка поверхности в пределах R, см (при Q=5 кг)
Пески очень рыхлые (большая вероятность возникновения явлений разжижения)	> 3	> 20
Пески рыхлые и средней плотности (возможно возникновение явлений разжижения)	3–1,5	10–20
Пески средней плотности и рыхлые со структурными связями (возникновение явлений разжижения маловероятно)	1,5–0,5	4–10
Пески средней плотности и плотные или имеющие прочные структурные связи (возникновение явлений разжижения практически невозможно)	< 0,5	< 4

зондирования, с одной стороны, возникновением явления разжижения и осадками поверхности песков после камуфлетных взрывов – с другой. Последующие исследования, выполненные И.В.Дудлером, Т.А.Грязновым, Н.Я.Денисовым, В.В.Поповым и другими авторами в намывных, аллювиальных и морских песках, подтвердили применимость динамического зондирования для изучения разжижаемости песков, изменения их структурно-текстурных особенностей и свойств после взрывных и сейсмических воздействий. В частности, при изучении аллювиальных нижневолжских песков установлена четкая зависимость характера и величины изменения плотности-прочности песков после взрыва в зависимости от ее начального значения, характеризуемого данными динамического зондирования (табл.26).

Таблица 26

Группа песков	$P_д$, МПа	$S_{r=5}$, см	$\pm \Delta P_д$, МПа
I	3,0	12	+3,0
II	3,5; 4,0; 4,5	10; 8; 6	+ 1,0; −1,0; −1,5
III	5,0; 5,5	5; 3	−2,5; −3,5

В рыхлых слабоустойчивых песках (группа I) после разжижения происходило интенсивное уплотнение песка и его прочность повышалась; в упрочненных песках средней плотности (группа III) разжижение не происходило, но прочность снижалась за счет разрушения структурных связей; в песках промежуточного состояния (группа II), в которых разжижение не происходило или носило локальный характер, разрушение структурных связей компенсировалось уплотнением песка и существенного изменения его прочности не происходило.

На основании указанных работ были установлены критерии оценки разжижаемости песков по данным динамического зондирования, включенные в СН 448-72 (табл.27).

Таблица 27

Категория динамической устойчивости и возможность разжижения	Динамическое зондирование		
	$P_{Д средн}$, МПа	$P_{Д мин}$, МПа	$П_у = \frac{P_{Д ненар}}{P_{Д нар}}$
I. Неустойчивые. Разжижение неизбежно	Менее 2,0	Менее 0,7	1
II. Слабоустойчивые. Разжижение вероятно	2,0–3,5	0,7–1,4	1,0–1,5
III. Устойчивые. Разжижение маловероятно	3,5–5,0	1,4–2,0	1,5–2,5
IУ. Высокоустойчивые. Разжижение невозможно	Более 5,0	Более 2,0	Более 2,5

Следует подчеркнуть, что надежность оценки разжижаемости песков возрастает при одновременном учете комплекса критериев, приведенных в табл.6 разд.2 данных Рекомендаций. При этом повышается информативность получаемых данных и достоверность соответствующих оценок и прогнозов.

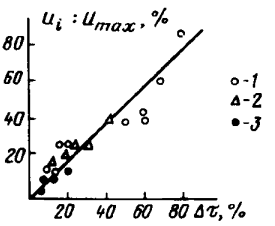
9.23. Метод определения степени разжижения. Рассмотренные выше методы критических ускорений взрывного и динамического зондирования позволяют установить вероятность возникновения процесса разжижения. Однако этот процесс может проявляться либо в полной мере и сопровождаться полной потерей прочности, либо частично, и тогда следует говорить о частичном разжижении [10]. В последнем случае возможно несущественное падение прочности, не представляющее опасности для сооружения. Таким образом, количественная оценка возможного снижения прочности при тех или иных динамических воздействиях является важной инженерно-геологической задачей.

Изменение прочности грунта при динамическом воздействии происходит вследствие разрушения структурных связей, что сопровождается уплотнением грунта, возникновением порового давления U и соответственно снижением эффективного давления $\sigma_p = \sigma_0 - U$, где σ_0 – вертикальное давление от собственного веса грунта (с учетом взвешивающего влияния воды) и дополнительной нагрузки от сооружения. В этих условиях известное уравнение прочности Кулона приобретает вид

$$\tau_p = \sigma_p \operatorname{tg} \varphi = (\sigma_0 - U) \operatorname{tg} \varphi.$$

При полном разжижении вертикальное давление приобретает характер гидростатического, при этом возникает максимальное

Рис.73. Зависимость падения прочности пылеватого водонасыщенного песка ($\Delta\tau$,%) от величины U_i / U_{max} при различных вертикальных давлениях (σ)
1 – σ = 0,001 МПа; *2* – σ = 0,002 МПа; *3* – σ = 0,008 МПа



поровое давление $U_{max} = \sigma_0$ и, как видно из уравнения, сопротивление сдвигу τ_p становится равным 0.

При частичном разжижении поровое давление U_i составляет определенную часть от U_{max}. Соотношение $U_i / U_{max} = N$, названное П.Л.Ивановым "степенью разжижения" [10], может служить мерой падения прочности грунта при разжижении. Сопротивление сдвигу при разжижении

$$\tau_p = \tau_0 (1 - N),$$

где τ_0 – сопротивление сдвигу в статических условиях.

Потеря грунтом прочности $\Delta\tau\,(\%) = \frac{\tau_0 - \tau_p}{\tau_0}$ численно равно N. Результаты экспериментальной проверки этого положения показаны на рис.73.

Таким образом, вместо прямого определения потери прочности при динамическом воздействии рекомендуется определять ее по величине порового давления U_i, возникающего в результате этого воздействия.

9.24. Для определения потери прочности грунта при разжижении в ПНИИИС изготовлен прибор для ускоренных полевых испытаний. Прибор представляет собой вакуумный грунтонос, с помощью которого грунт можно испытывать как в условиях естественного залегания (в шурфе), так и на монолите из скважины (вблизи места отбора). Испытания выполняются непосредственно в грунтоносе. Вертикальное давление на грунт, соответствующее природному и дополнительному от сооружения на глубине отбора, создается гирями через рычаг либо редуктором с динамометром. Динамические воздействия осуществляются ударами молотка по корпусу грунтоноса. Интенсивность воздействия может изменяться путем изменения угла отклонения молотка α_m. Для измерения U_i к грунтоносу прикрепляются датчики порового давления (при отборе грунта отверстия для датчиков закрыты заглушками).

Для перехода от величины α_m к общепринятым вибрационным характеристикам (например, к ускорению колебаний a) разработана методика тарировки, основанная на известном положении, в соответствии с которым каждой величине интенсивности

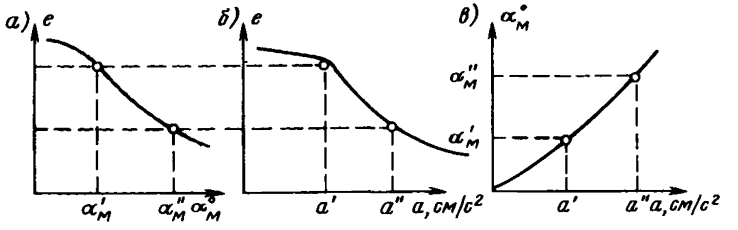


Рис.74. Схема тарировки прибора
а – ударно-компрессионная кривая; *б* – виброкомпрессионная кривая; *в* – взаимосвязь между углом отклонения молотка ($\alpha^{\circ}_{м}$) и ускорением колебаний (*a*, см/с²)

динамического воздействия (ударного или вибрационного) соответствует своя предельно достигаемая плотность. Тарировка осуществляется в стационарных условиях на любом вибростенде, позволяющем создавать заданные параметры вибрации. Суть ее заключается в испытании грунта, построении ударно- и виброкомпрессионных кривых и сопоставлении их между собой (рис.74).

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ СПОСОБНОСТИ ПЕСКОВ К ПРОЯВЛЕНИЮ ПЛЫВУННОСТИ

9.25. Плывунностью называется способность водонасыщенных пород переходить в подвижное состояние при вскрытии выработками. Исходя из этой формулировки прямым определением склонности песков к плывунности являются наблюдения за поведением грунта в стенках горно-буровых выработок. Плывунность проявляется в образовании пробок в скважинах и в заплывании шурфов грунтовой массой. Интенсивность заплывания указывает на степень проявления плывунности.

Данные полевых наблюдений позволяют сделать предварительное заключение о возможности проявления плывунности лишь на период проходки выработки. Вместе с тем плывунность может проявиться впоследствии в результате повышения уровня грунтовых вод, изменения напряженного состояния грунтов и появления вибрационных воздействий в процессе строительства.

9.26. В качестве лабораторного метода изучения плывунности рекомендуется применять предложенный И.В.Поповым метод определения критического значения градиента фильтрации по формуле

$$J_к = \frac{\gamma' - 1}{1 + e},$$

где γ', e – удельный вес и коэффициент пористости пород.

Под воздействием фильтрационного потока песок может перейти в плывунное состояние в том случае, если градиент фильтра-

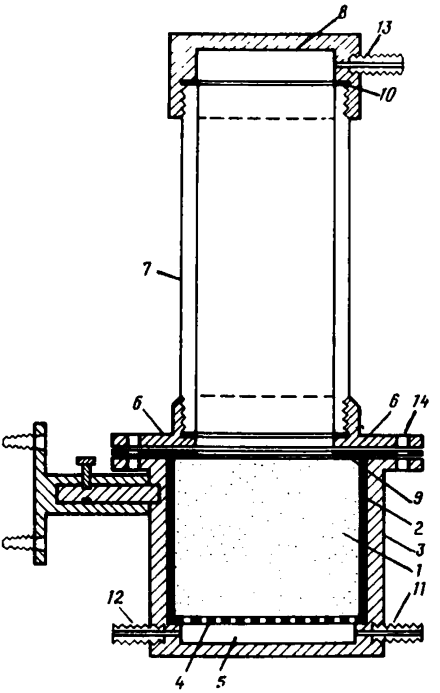


Рис.75. Фильтрационный прибор для определения критических градиентов возникновения плывунов и суффозии КГС-2

ционного потока достигнет критического значения $J_к$. Критический градиент для различных песков лежит в пределах 0,79–1,24. Пористость песков, находящихся под воздействием фильтрационного потока, при переходе в плывунное состояние увеличивается.

9.27. Для экспериментального определения критических градиентов возникновения плывунов под влиянием гидродинамического воздействия и вибрации рекомендуется использовать прибор КГС-2 системы В.Н.Славянова (рис.75).

Прибор представляет собой камеру *3* для монолита грунта *1* в режущем кольце *2*. Нижняя часть камеры имеет водоприемник *5*, отделенный от основной камеры перфорированным диском *4*. Водоприемник имеет два одинаковых штуцера *11*, *12* для подачи воды в прибор и для манометра. Над монолитом грунта в крышке прибора установлена прозрачная трубка *7*. Площадь поперечного сечения монолита грунта 40 см^2. Внутренняя площадь поперечного сечения прозрачной трубки 25 см^2. Площадь сечения водо

приемника 25 см^2. Трубка сверху прикрыта колпаком *8* со штуцером *13* для отвода профильтровавшейся воды и ее замеров.

Между корпусом прибора и крышкой *6* имеется резиновая прокладка *9*, в которую вдавливается режущее кольцо *2* для предотвращения просачивания воды между режущим кольцом и корпусом прибора. Резиновые прокладки *10* установлены и по краям прозрачной трубки для герметизации прибора. К одному из винтов крепления крышки на корпусе прибора может быть укреплен держатель *14* манометра. Для обычных опытов достаточно двухметровой стеклянной трубки с линейкой вместо манометра.

Вода подается в прибор через один из штуцеров водоприемника. Образец насыщается водой до начала испытания со скоростью, не превышающей скорость капиллярного поднятия и $K_ф$ данной породы. Эту скорость следует сохранить и до полного заполнения прибора водой (до верхнего штуцера).

Для подачи воды со строго регистрируемыми градиентами применяется высокий (до потолка) штатив, на котором устанавливаются два ползунка с воронкой и сосудом Мариотта (опрокинутой бутылью). Вода в воронке стоит на уровне горлышка сосуда Мариотта и дополняется при фильтрации из последнего. Разница между уровнем воды в манометре и верхним уровнем воды в приборе создает давление воды, а отношение давления воды к высоте образца – градиент. Двигая ползунок с сосудом Мариотта и воронку по штативу, можно изменять давление воды и градиент.

В полевых условиях давление воды можно создавать подъемом сосуда с водой или через переходную емкость, в которой давление воды создается воздушным насосом (например, автомобильным). Под влиянием возрастающего гидродинамического давления порода начинает выдавливаться вверх по прозрачной трубке прибора. Градиент, при котором начинается этот процесс, называется критическим градиентом возникновения плывуна.

Величина критического градиента может снижаться при динамических воздействиях, способствующих разрушению структуры исследуемого грунта. Поэтому при испытаниях грунтов по указанной выше методике рекомендуется подвергать грунт ударным или вибрационным воздействиям. Их интенсивность назначается исходя из возможных промышленных и сейсмических воздействий на территории проектируемого строительства.

10. КОМПЛЕКСНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЕСКОВ

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ, НАПРАВЛЕНИЯ, ЗАДАЧИ И ПРИНЦИПЫ КОМПЛЕКСНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПЕСКОВ

10.1. Комплексный подход к исследованиям грунтов является одним из важнейших принципов проведения инженерно-геологических изысканий. Это положение закреплено в рекомендациях научного совета по инженерной геологии и гидрогеологии АН СССР о направлениях инженерно-геологических исследований в одиннадцатой пятилетке*. Разработка научных основ комплексирования различных методов инженерно-геологических исследований является актуальной задачей тематики и применительно к исследованию песков.

10.2. Необходимость комплексного подхода к изучению песчаных грунтов обусловлена: многофакторностью природы строительных свойств песков, требующей обязательного изучения, комплекса показателей их состава, строения, состояния и свойств при обязательной оценке структурно-текстурных особенностей песков в массивах; различной представительностью, информативностью и точностью применяемых лабораторных и полевых методов; необходимостью улучшения технико-экономических показателей инженерно-геологических изысканий.

10.3. Комплексный подход к изучению песков, как и любых других грунтов, предусматривает обязательность применения разнообразных полевых и лабораторных методов.

Учитывая наблюдающуюся на практике неопределенность в трактовке основных терминологических понятий, касающихся данного вопроса, представляется целесообразным привести соответствующие определения сформулированные и обоснованные ранее применительно к комплексным исследованиям грунтов полевыми методами[7].

Комплекс лабораторных и полевых методов — это совокупность ряда методов изучения грунтов в лабораторных и полевых условиях.

Оптимальный комплекс методов — это оптимальное сочетание лабораторных и полевых методов, необходимое и достаточное для решения определенной строительной задачи в конкретных инженерно-геологических условиях при затрате минимума средств и времени.

Комплексирование лабораторных и полевых методов — это установление и реализация в практике изысканий оптимального комплекса лабораторных и полевых методов и рациональной тех-

---

*Трофимов В.Т. О направлениях инженерно-геологических исследований в одиннадцатой пятилетке. – Инженерная геология, 1979, № 5.

нологической схемы его применения, предусматривающей определенное соотношение задач и объемов работ отдельных методов, очередность их применения, порядок обработки, взаимокорректировки и интерпретации получаемых результатов.

Комплексные исследования грунтов лабораторными и полевыми методами — это исследование взаимосвязанного и взаимообусловленного комплекса важнейших показателей состава, строения, состояния и свойств грунтов с помощью лабораторных и полевых методов на основе их рационального комплексирования.

10.4. Целью комплексных исследований грунтов является повышение качества и эффективности изысканий и инженерно-геологического обоснования проектов сооружений с учетом требований рационального использования и охраны геологической среды.

10.5. Основными направлениями комплексных исследований песков следует считать:

изучение природы строительных свойств песков на основе генетического подхода к комплексному изучению состава, строения, состояния и свойств песков в их взаимосвязи и взаимообусловленности;

разработку комплекса показателей и критериев для оптимальной характеристики состава, строения, состояния, свойств песков и выделения их основных категорий;

разработку и совершенствование методики и методов изучения песков в естественном залегании и в земляных сооружениях;

изучение закономерностей формирования и проявления свойств песков в природных массивах;

изучение закономерностей формирования и проявления свойств песков в техногенных массивах;

разработку и совершенствование методов прогноза изменения состояния и свойств песков под влиянием различных техногенных воздействий и изменения природных (инженерно-геологических) условий;

разработку и совершенствование методов геотехнического контроля за качеством воздействия земляных сооружений, возводимых из песков, и качеством технической мелиорации песков;

разработку и совершенствование классификации песков;

разработку и совершенствование нормативно-методических документов (общесоюзных и региональных), касающихся изучения и использования песчаных грунтов с учетом требований рационального использования и охраны геологической среды.

Перечисленные направления исследований полностью корреспондируют с указанными выше рекомендациями научного совета по инженерной геологии и гидрогеологии.

10.6. При выборе методов исследований песков следует учитывать, что лабораторные методы обеспечивают изучение песков и получение информации на мезо- и микроуровне, а полевые — на макроуровне. Как лабораторным, так и полевым методам свой-

ственны определенные достоинства и недостатки. Поэтому комплексирование полевых и лабораторных методов предусматривает максимальное использование преимуществ каждой из указанных групп методов и сведение к минимуму проявления присущих им недостатков.

10.7. Основными задачами комплексных исследований песков лабораторными методами следует считать:

выявление и изучение минералого-петрографических и структурных особенностей песков различного генезиса, а также некоторых показателей состояния и свойств песков, которые не могут быть выполнены полевыми методами;

получение ряда необходимых классификационных характеристик (показателей) песков, которые могут быть обеспечены только лабораторными методами;

установление ряда показателей (характеристик) состояния и свойств песков в лабораторных условиях в дополнение к определению их полевыми методами с целью тарирования, контроля и корректировки показаний последних;

проведение различных специальных исследований (в том числе модельных) при изучении поведения песков при разных видах внешних воздействий), включая воздействия химически и биологически активных веществ, в широком диапазоне изменения влажности, температуры, напряженного состояния и т.п.

10.8. Основными задачами комплексных исследований песков полевыми методами являются:

выявление и изучение на строительной площадке тех особенностей строения, состояния и свойств песков, определение которых затруднено или невозможно осуществить лабораторными методами, в частности, в связи с известной сложностью отбора ненарушенных образцов ниже уровня воды. Прежде всего это касается изучения и оценки роли структурных связей сцепления, упрочнения и некоторых текстурных особенностей песков;

оценка состояния и свойств песков в массиве, в том числе установление закономерностей и диапазона их пространственной изменчивости в плане и на глубине изучаемого массива при обеспечении непрерывности исследования песков в вертикальном разрезе;

повышение представительности данных изысканий за счет увеличения объема и детальности контролируемых и испытуемых песков;

осуществление параллельных определений показателей состояния и свойств песков разными полевыми методами с целью их взаимного контроля, необходимой в ряде случаев корректировки получаемых данных и более обоснованной (объективной) интерпретации результатов исследований;

исключение субъективных факторов и элементов случайности при выборе характерных ключевых пунктов в пределах изучаемой площадки для проведения детальных исследований песков

расширенным комплексом полевых методов и отбора образцов песка для лабораторных исследований;

повышение производительности работ, снижение трудозатрат, стоимости и сроков изысканий за счет широкого применения полевых экспресс-методов, использования максимальной автоматизации и стандартизации применяемого оборудования.

10.9. Научно-технический уровень, эффективность и качество инженерно-геологических изысканий в значительной мере зависят от методологического подхода к их проведению, конкретизируемого в используемых принципах методики изысканий.

При постановке комплексных исследований песков рекомендуется исходить из следующих принципов:

генетического подхода к инженерно-геологическому изучению песков, требующего комплексного изучения и учета всех особенностей состава, строения, состояния и свойств песков в конкретных инженерно-геологических условиях (с учетом регионально-геологических, зонально-географических и техногенных факторов);

пространственно-временной оценки массива песка, требующего изучения и оценки закономерностей распределения основных характеристик песков в массиве и составления прогноза изменения их во времени под влиянием строительства и эксплуатации проектируемого сооружения;

перспективности инженерно-геологических изысканий, требующего планирования и учета развития изысканий от стадии к стадии, от этапа к этапу проектирования. Этот принцип определяет необходимость последовательного и планомерного уточнения инженерно-геологических особенностей изучаемого массива песков (по схеме от общего к частному), своевременного выбора ключевых пунктов, организации режимных наблюдений с самого начала изысканий;

технологичности и оперативности инженерно-геологических изысканий, требующего разработки четкой технологической схемы ведения работ и обеспечения возможности оперативной выдачи результатов изысканий проектировщикам и строителям;

тарирования полевых методов, требующего обязательного тарирования полевых экспресс-методов непосредственно на изучаемой площадке для повышения надежности и эффективности их применения в конкретных инженерно-геологических условиях;

оптимизации изысканий, предусматривающего возможность формализации природных условий и системного подхода к назначению детальности и объемов работ, статистического подхода к интерпретации полученных материалов (реализация предложенных М.В.Рацем принципов обратной связи, оптимальности и адаптации);

комплексного планирования и оценки технико-экономической эффективности инженерно-геологических изысканий (в данном

случае комплексных исследований песков), требующего оценивать эту эффективность в общем комплексе "изыскания – проектирование – строительство – эксплуатация объекта".

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММЫ И ВЫБОР МЕТОДОВ КОМПЛЕКСНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ПЕСКОВ

10.10. Указанные в пп.10.5, 10.7–10.9 направления, задачи и принципы комплексных исследований песков в практике изысканий должны реализовываться в соответствии с программами изыскательских работ.

10.11. При разработке программ основное внимание следует уделять обоснованию и изложению методики исследований и технологии их проведения. Программа работ должна отличаться конкретностью и четкостью указаний по всем аспектам выполняемых исследований. В частности, в программе должны указываться: намеченные виды и объемы работ; последовательность их выполнения; глубинность проведения геофизических, буровых и горнопроходческих работ, испытаний и исследований песков; предварительное расположение ключевых пунктов исследований, в том числе проведение режимных наблюдений; перечень методов исследований, регламентированный нормативными документами, и детальная методика специальных исследований, для которых отсутствуют нормативные рекомендации; методика проведения тарировочных работ и изучения свойств песков в прогнозируемых изменениях природных условий; порядок ведения изыскательских работ с обеспечением мероприятий по охране окружающей среды и соблюдению техники безопасности; сведения об используемых технических средствах, обеспечиваемой ими точности получаемых данных и соответствии требованиям Палаты мер и весов; рекомендации к обработке и оформлению материалов исследований.

10.12. В процессе исследований в программы могут вноситься изменения и дополнения на основании анализа результатов, получаемых в ходе работы или новых заданий на проводимые исследования.

10.13. Основными факторами комплексирования полевых и лабораторных методов являются:

особенности проектируемых сооружений – их назначение, виды, класс, тип фундаментов, характер воздействия на грунты, особенности технологического процесса в период эксплуатации;

стадия проектирования;

сложность инженерно-геологических условий, обусловленных совокупностью тектонических, геоструктурных, литологостратиграфических, грунтоведческих, гидрогеологических, геоморфологических, геодинамических, сейсмогенных и техногенных условий изучаемой территории;

степень изученности рассматриваемого района (площадки, участка строительства).

10.14. При постановке изыскательских работ следует учитывать повышение роли фактора стадийности проектирования.

Согласно постановлению ЦК КПСС и Совета Министров СССР "О мерах по дальнейшему улучшению проектно-сметного дела" (№ 312 от 30 марта 1981 г.), в целях сокращения сроков разработки и объемов в проектно-сметной документации устанавливается следующая стадийность проектирования:

в одну стадию – рабочий проект со сводным сметным расчетом стоимости для предприятий, зданий и сооружений, строительство которых будет осуществляться по типовым и повторно применяющимся проектам, а также для технически несложных объектов;

в две стадии – проект со сводным сметным расчетом стоимости и рабочая документация со сметами для других объектов строительства, в том числе крупных и сложных.

Во исполнение указанного постановления с 1 января 1982 г. введена в действие "Инструкция о составе, порядке разработки, согласования и утверждения проектно-сметной документации на строительство предприятий, зданий и сооружений" (СН 202-81).

Указанные документы обусловливают необходимость особо серьезного подхода к обоснованию программы изысканий, которая должна обеспечить максимально обоснованный подбор объекта-аналога по инженерно-геологическим условиям, в кратчайшие сроки выявить имеющиеся отличия в инженерно-геологических условиях конкретного района (площадки, участка) проектируемого сооружения и определить оптимальные состав, объем, методику и технологию необходимых комплексных исследований. При этом в большинстве случаев все принципиальные вопросы исследований должны быть решены на первой (иногда единственной) стадии проектирования.

10.15. Для особо ответственных и сложных объектов, например АЭС, крупных ГЭС и мощных хвостохранилищ, целесообразно предусматривать следующую этапность работ.

В составе схемы (внестадийное проектирование):

изыскания для выбора пункта строительства;

изыскания на выбранном пункте строительства.

На стадии проекта:

изыскания для выбора варианта компоновки сооружений;

изыскания для разработки основных положений проекта (по выбранному варианту компоновки сооружений.

На стадии рабочей документации:

этап дополнительных изысканий в период дополнительных проектных проработок;

этап заключительных работ и исследований при строительстве, необходимых для окончательной корректировки строительных решений.

10.16. В условиях требований и рекомендаций, изложенных в пп.10.14 и 10.15, особое значение приобретает постановка комплексных исследований на основе широкого комплексирования лабораторных, полевых и аналитических методов изучения песков.

Весьма большой перечень разнообразных методов исследования песков, приведенный в табл.28, позволяет осуществить широкое варьирование при выборе комплексов полевых и лабораторных методов, необходимых для решения той или иной практической задачи.

Таблица 28

Основная категория	Методы	
	Группы	Название
I. Состав: минеральный	Лабораторные	Минералого-петрографические (микроскопический, спектроскопический, рентгеноструктурный, термический, магнитной сепарации и др.)
химический	То же	Физико-химические (валовый химический анализ, водные и соляно кислотные вытяжки, определение обменных катионов, исследование состава пленок)
биологический	"	Физико-химические, в частности метод прокаливания, метод определения углерода. Специальные биохимические методы изучения содержания микроорганизмов
водный	"	Методы определения весовой влажности, в частности методы определения максимальной молекулярной влагоемкости (метод высоких колонн, метод центрифугирования), метод определения оптимальной влагоемкости (стандартное уплотнение) и др.
	Полевые	Определение влажности электрическим, нейтронным и другими геофизическими методами, а также полевыми экспресс-методами высушивания песка (например, в пламени спирта)
газовый	Комбинированные	Искусственное замораживание песков, отбор образцов мерзлого песка, лабораторное исследование плотности-влажности с аналитическим расчетом содержания защемленного воздуха (по методике Я.Л.Когана)
II. Строение:		
дисперсность (крупность или гранулометрический состав)	Лабораторные	Методы гранулометрического анализа: ситовый, Сабанина (гидравлический, отмучивания), пипеточный; в модификации полевых приборов – метод Ковалева, трафаретов (стандартных шкал). Микроскопический метод (изменение отдельных зерен). В исследовательских целях – методы определения удельной поверхности зерен (в том числе с пленками и после снятия пленок – хроматографическим методом)

Продолжение табл.28

Основная категория	Методы	
	Группы	Название
сортированность (соотношение преобладающих фракций)	Аналитические	Аналитические, по данным гранулометрического анализа
гранулометрическая неоднородность	То же	Аналитические, в том числе статистические методы определения и выражения параметров неоднородности
морфология	Лабораторные	Морфометрические (измерение зерен под микроскопом, использование специальных трафаретов формы зерен). Морфоскопические (исследования на сканирующем электронном микроскопе с аналитической обработкой сканограмм поверхности зерен). Ускоренные методы на морфоанализаторах и с использованием "метода истечения" навески песка (для определения обобщенного показателя морфологии зерен и песков в целом – метод А.Д.Потапова)
структурные связи	То же	Физико-химические, минералого-петрографические и физико-механические (в том числе реологические) в различных модификациях
	Полевые	Различные виды испытаний песков в массиве методами зондирования, сдвига и др. с аналитической обработкой опытных данных, полученных до и после нарушения природной структуры песка
текстура	То же	Визуальные наблюдения и измерения характера слоистости песков, ориентировки зерен, а также различные методы определения плотности их сложения (метод режущего цилиндра, радиометрические методы, методы зондирования и др. с обязательным тарированием всех косвенных методов)
III. Состояние:		
относительная уплотненность	Комбинированные	Совместное применение различных методов определения плотности песков в сочетании с лабораторными испытаниями их на компрессию и сдвиг при различных значениях плотности-влажности и напряженного состояния в сопоставлении с их природными значениями

Продолжение табл. 28

Основная категория	Методы	
	Группы	Название
относительная плотность	То же	Лабораторные методы определения предельных значений плотности скелета (коэффициента пористости) песков (как обязательное условие объективного учета структурных особенностей песков) в сочетании с полевыми методами определения плотности песков в условиях естественного залегания (или в теле земляных сооружений). При использовании косвенных методов определения плотности песков обязательно выполнение тарировочных работ
относительная упрочненность	Полевые	Испытания песков различными полевыми методами до и после нарушения их природного сложения (структуры) в условиях неизменной плотности-влажности; сопоставление сопротивляемости песков статическим и динамическим воздействиям, в частности статическому и динамическому зондированию
относительная водонасыщенность	Комбинированные	Аналитический расчет индекса водонасыщенности по данным определения грунтовых характеристик (влажность, пористость, удельный вес) соответствующими лабораторными и полевыми методами
напряженное состояние	Полевые, аналитические	Специальные тензометрические измерения и аналитические расчеты
IУ. Свойства:		
прочность	Лабораторные	Испытания песков на сдвиг в различных модификациях методики и применяемых приборов
	Полевые	Испытания песков на сдвиг в разных модификациях сдвига целика, раздавливания призм, выдавливания призм и вращательного среза. Применение косвенных методов (зондировочных и сейсмоакустических) при обязательном установлении тарировочных зависимостей
сжимаемость	Лабораторные	Компрессионные испытания в различных модификациях приложения статических и динамических нагрузок
	Полевые	Испытания песков штампами, в частности вибро-штампами, в разной модификации применяемых установок; испытания песков прессиометрами; применение косвенных методов (см. "Прочность")
динамическая устойчивость	Лабораторные	Испытание песков на вибростендах, виброкомпрессионных и вибросдвиговых приборах
	Полевые	Испытания песков камуфлетными взрывами и модификации стандартного взрыва и взрывного зондирования (по методтке И.Л.Иванова) в сочетании с динамическим зондированием и в комплексе с другими полевыми методами (по методике И.В.Дудлера)

Продолжение табл.28

Основная категория	Методы	
	Группы	Название
уплотняемость	Лабораторные	Испытание песков в приборах стандартного уплотнения при одновременной фиксации плотности-влажности песка при заданной работе уплотнения
	Полевые	Опытное уплотнение песков в насыпях с параллельным определением их плотности-влажности при осуществляемой работе уплотнения
влагоемкость	Лабораторные	Определение различных видов влагоемкости, в том числе максимальной молекулярной, по стандартным методикам, а также экспресс-методами (например, методом высоких колонн малого диаметра) и аналитическими методами при использовании корреляционных зависимостей со структурными характеристиками песков
водопроницаемость	Лабораторные	Лабораторные исследования на фильтрационных приборах различной модификации
	Аналитические	Аналитические методы расчета по комплексу грунтовых характеристик
	Полевые	Определение K_Φ методами налива воды в шурф, по действительной скорости, опытными откачками в различной модификации этих методов

10.17. С точки зрения комплексирования целесообразно выделять по три категории (группы) полевых и лабораторных методов, указанных в пп.10.18 и 10.19.

10.18. Для полевых методов выделяются[7]:

А – экспресс-методы разведки и испытания песков;

Б – методы прямого определения показателей свойств (реже состава, строения и состояния) песков;

В – экспериментальные методы испытаний песков.

В группу А входят методы геофизической разведки и испытания песков зондированием: сейсморазведка, электроразведка, радиоизотопный каротаж, динамическое и статическое зондирование, в том числе пенетрационно-каротажные методы на базе установок типа СПК. Использование этих методов обычно требует предварительного тарирования аппаратуры и установления соответствующих корреляционных зависимостей для интерпретации получаемых данных. Применяются эти методы для проведения массовых исследований песков в пределах всей изучаемой территории (площадки, створа и т.д.).

В группу Б входят буровые и горнопроходческие методы – бурение скважины, проходка шурфов, шахт, траншей и т.д., предусматривающие отбор образцов и монолитов песка для лабораторных исследований, выполнение лабораторных работ и методы испытаний грунтов, относящиеся по общей классификации полевых методов к опытным. В их числе испытания грунтов

штампами, прессиометрами, сдвигами целиков, камуфлетными взрывами и др. Использование этих методов требует проходки скважин и горных выработок, а часть из них (например, прессиометрия) – обязательного тарирования; применяют их обычно в ограниченном объеме, часто только в ключевых пунктах изучаемой площадки.

В группу В входят методы экспериментальных исследований – испытания свай, опытных фундаментов, оснований и фрагментов земляных сооружений; в некоторых случаях в эту группу могут быть включены методы стационарных и режимных натурных наблюдений. Использование этих методов требует специального обоснования и разработки самостоятельных программ на проведение исследований. За исключением статических и динамических испытаний свай, эти методы применяют только для особо ответственных сооружений, преимущественно I класса.

10.19. Для лабораторных методов выделяются:

а) методы изучения и определения классификационных показателей;

б) методы определения нормативных показателей;

в) специальные методы исследований.

В группу "а" входят методы изучения состава (минерального, химического, гранулометрического, биохимического и газового), строения (преимущественно морфологические исследования и изучение структурных связей), состояния (определение естественной плотности и предельных плотностей для установления категории относительной плотности песков), свойств (определение различных видов влагоемкости, уплотняемости и некоторых других).

В группу "б" входят главным образом методы изучения свойств песков (прочность, сжимаемость, динамическая устойчивость, водопроницаемость и др.).

В группу "в" входят различные методы специальных исследований, в том числе связанные с изучением и моделированием подверженности песков разнообразным физико-геологическим процессам и явлениям, эффективности различных способов их технической мелиорации, изменения свойств при взаимодействии с промстоками и т.д.

Группы "а" и "б" могут включать как стандартные, так и ускоренные (экспрессные) методы исследований (например, описанный в главе 5 метод определения показателя морфологии λ), а также различные аналитические методы (например, описанные в главе 6 метод определения коэффициента фильтрации).

10.20. При выборе комплекса полевых методов для решения наиболее распространенных задач изучения песчаных грунтов рекомендуется пользоваться классификационной схемой, приведенной в табл.29. В этой таблице для каждой задачи рекомендованы соответствующие методы исследований по указанным кате-

Таблица 29

Задача исследования	Комплексы полевых методов по категориям			
	А	Б	В	для ключевого пункта
Определение литологического состава и уточнение литологического расчленения разреза	ДЗ, РК (ПКК)	БС	–	БС, ДЗ (ПКК)
Определение кровли несущего слоя для свайных фундаментов	ДЗ (СР, ЭР, СЗ, ПКК)	БС	ДИС	БС, ДЗ (СР, ЭР, СЗ, ПКК), ДИС
Определение физических характеристик песков (плотности, влажности и др.)	РК, ДЗ (СР, ПКК, ЭР)	ГВ (БС)	–	ГВ (БС), РК, ДЗ, СЗ (ПКК, ЭР)
Определение деформационных свойств песков при действии нагрузок:	ДЗ (СЗ, ПКК, СР)	Шт (ПМ), ГВ	ОЗ, ИОФ	ГВ (ВС), Шт, ПМ, ДЗ (СЗ, ПКК, СР, ОЗ, ИОФ)
статических и вибрационных	ДЗ, СР	ВШт (ПМ), ГВ (БС)	ОЗ, ИОФ	ГВ (БС), ВШт (ПМ), ДЗ, СР (ОЗ, ИОФ)
Определение сопротивляемости песков сдвигу и параметров сопротивления сдвигу	ДЗ (СЗ, ПКК)	СЦ (ВС), ГВ	ОЗ, ИОФ	ГВ, СЦ (ВС) ДЗ (СЗ, ПКК), (ОЗ, ИОФ)
Определение динамической устойчивости (разжижаемости и изменения прочности) песков при импульсных нагрузках	ДЗ	КВ, БС	–	БС, КВ, ДЗ
Определение несущей способности свай	ДЗ (СЗ)	БС	ДИС, СИС	БС, ДЗ (СЗ), ДИС, СИС
Геотехнический контроль за возведением земляных сооружений	ДЗ (СЗ, РК, СР, ЭР, ПКК)	ГВ	ОН, ОУ	ГВ, ДЗ (СЗ, РК, СР, ЭР, ПКК), (ОН, ОУ)

Примечание. БС – бурение скважин с отбором образцов грунта для лабораторных исследований; ГВ – горнопроходческие выработки (шурфы, шахты и др.) с отбором монолитов грунта для лабораторных исследований; СР – сейсморазведка в различных модификациях; ЭР – электроразведка в различных модификациях; РК – радиоактивный каротаж в разлиных модификациях; ДЗ – динамическое зондирование; СЗ – статическое зондирование; ПКК – пенетрационно-каротажный комплекс; Шт – статические нагрузки на штамп; ВШт – вибрационные нагрузки на штамп; ПМ – прессиометрия; СЦ – сдвиг целиков грунтов в различных модификациях; КВ – камуфлетный взрыв, в том числе взрывное зондирование; СИС – статическое испытание свай; ДИС – динамические испытания свай; ОЗ – опытное замачивание грунта; ОУ – опытное уплотнение грунта; ОН – опытный намыв грунта; ИОФ – испытание опытных фундаментов. В скобках указаны возможные варианты методов, используемых в дополнение или взамен основных рекомендуемых методов.

гориям (А, Б и В), а также указан целесообразный комплекс методов для исследования песков в ключевых пунктах изучаемой площадки.

В табл.29 не включены методы натурных (стационарных и режимных) наблюдений, которые следует применять по специальным заданиям и программам, а также методы визуального обследования и описания песчаных грунтов, используемые независимо от комплексирования полевых методов.

При одновременном решении нескольких задач, указанных в табл.28, целесообразно выбирать тот комплекс полевых методов, который наиболее полно удовлетворяет их общему решению.

10.21. Комплексирование лабораторных методов должно осуществляться аналогичным образом. При этом исходя из поставленных задач лабораторные методы рассматриваются как сопутствующие (например, определение грансостава, морфологии зерен, предельных плотностей), дополняющие (например, компрессионные, стабилометрические и другие испытания) или контролирующие (например, определение естественной плотности-влажности) по отношению к исследованиям песков полевыми методами.

ТЕХНОЛОГИЯ КОМПЛЕКСНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПЕСКОВ

10.22. Основным технологическим принципом организации и проведения комплексных исследований (изысканий) является этапность выполнения работ. В общем плане целесообразно различать три основных этапа работ: подготовительно-методический, опытно-производственный, производственный.

Соответствующие рекомендации, разработанные применительно к действовавшей ранее трехстадийной схеме проектирования, приведены в работе [7]. В указанной работе отмечалось, что подготовительно-методический этап следует выделять на всех стадиях проектирования для обоснования программно-методических вопросов; опытно-производственный, – как правило, на второй стадии для корректировки программы и методики изысканий на основе предварительных исследований; производственный охватывает все стадии проектирования и включает решение широкого круга вопросов (рис.76).

10.23. В условиях новой двухстадийной системы проектирования данная схема принципиально должна сохраниться, однако в предложенную ранее технологическую схему необходимо внести определенные изменения. При этом важно учитывать следующие два обстоятельства:

сокращение сроков изыскательских (исследовательских) работ и необходимость принятия этих принципиальных проектных решений на первой стадии проектирования;

неизбежность проработки вариантов генплана и появления оптимального на заключительном этапе первой стадии в тот мо-



Рис.76. Схема поэтапного проведения комплексных исследований грунтов

мент, когда основной объем изыскательских работ уже выполнен и обычно не остается ни средств, ни времени для выполнения сколь-либо значительного объема дополнительных исследований.

Последнее обстоятельство касается главным образом проектирования крупных энергетических и промышленно-гражданских объектов. Отмеченные многовариантные изменения генплана вызваны, как правило, стремлением усовершенствовать проектное решение, учесть выявление в процессе изысканий дополнительных инженерно-геологических данных (например, уточнение прогноза повышения уровня грунтовых вод, ориентировочно установленного в начале первой стадии проекта методом ЭГДА, и соответственно уточнение оценки сейсмичности изучаемой площадки). По данным Б.Л.Горловского, поздние изменения генплана нередко обусловливают посадку отдельных сооружений таким образом, что ранее пробуренные скважины и пункты испытаний грунтов полевыми методами остаются за пределами контуров вновь наме-

ченных сооружений или глубина бурения и состав выполненных исследований не отвечают требованиям обоснования проектируемого сооружения (например, дымовой трубы высотой 200–300 м). Возникает необходимость в достаточно подробных дополнительных исследованиях, не предусмотренных программой и сметой. Следовательно, изыскания должны строиться таким образом, чтобы уже на первом этапе стадии проекта (см. п.10.15) получить максимально полный объем материалов, необходимый и достаточный для проработки любого варианта компоновки и посадки сооружений, включая решения основных вопросов производства строительных работ. В этих условиях на втором этапе стадии проекта и на стадии рабочей документации оказывается достаточным выполнить ограниченный объем дополнительных исследований в пределах контуров (пятен) отдельных сооружений проектируемого объекта.

10.24. В соответствии с положениями п.10.23 целесообразно принять следующую технологическую схему исследования песков на стадии проекта:

1) изучение технического задания на изыскания, сбор и анализ фондовых и литературных материалов по району (площадке, участку) строительства, рекогносцировочное обследование изучаемой территории с ограниченным применением методов разведки и опробования грунтов, проведение ограниченного объема лабораторных исследований песков для выявления их основных литолого-генетических и минералого-петрографических особенностей;

2) разработка программы работ, включая обоснование методики, методов и технологии исследований, а также подбора объекта-аналога по инженерно-геологическим особенностям изучаемых песков, в частности решение вопроса о возможности использования общесоюзных или региональных норм применительно к данным инженерно-геологическим условиям конкретного района (площадки, участка);

3) проведение инженерно-геологической съемки масштабов 1:5000–1:2000 по всей изучаемой территории; уточнение на этой основе инженерно-геологических условий района, внесение необходимых коррективов в программу и методику исследований. При этом рекомендуется: осуществить геофизическую разведку, проходку буровых скважин по створам, пересекающим геоморфологические элементы местности; выполнить параллельные испытания песков полевыми методами, преимущественно экспресс-методами; продолжить определение классификационных показателей песков.

На основании выполненных исследований выделяются основные инженерно-геологические элементы (разновидности изучаемых песков), намечаются ключевые пункты для дальнейших детальных исследований песков комплексом лабораторных и полевых методов;

4) выполнение подробных исследований состава, строения, состояния и свойств песков (для всех выделенных разновидностей – слоев). При этом проводятся массовые исследования песков принятым комплексом полевых экспресс-методов, детальные исследования в ключевых пунктах (полным комплексом намеченных методов) и соответствующий объем лабораторных исследований, преимущественно направленных на определение нормативных показателей песков. Объем выполняемых работ должен обеспечить возможность надежной статистической обработки полученных данных для решения следующих основных задач: установления характера изменчивости свойств песков в плане и по глубине для каждого выделенного инженерно-геологического элемента; установление тарировочных зависимостей для каждого из примененных полевых экспресс-методов и установление корреляционных зависимостей между показателями состава, строения, состояния и свойств песков, определенных лабораторными и полевыми методами (на этой базе в необходимых случаях должны быть обоснованы отступления от рекомендаций действующих нормативно-методических документов); установление диапазона изменения каждого из изучаемых свойств песков и на основе факторно-диапазонного анализа – оценки влияния различных интервалов изменения показателей свойств песков на технико-экономические показатели проектных решений;

5) проведение комплекса лабораторных и полевых исследований для прогнозирования изменений природных условий, состояния и свойств песков в процессе строительства и в период эксплуатации сооружений применительно к ожидаемым видам, характеру, масштабу и интенсивности техногенных воздействий. Параллельно выполняются все виды общих инженерно-геологических изысканий и анализ изучаемого района с точки зрения общих тектонических, геоморфологических, гидрогеологических, сейсмических условий. Вносятся при необходимости коррективы в программу лабораторных и полевых исследований песков и реализуются некоторые виды специальных исследований (например, определение динамической устойчивости песков).

6) выполнение итоговой камеральной обработки материалов и выпуск отчета с инженерно-геологическим обоснованием проекта. В особо сложных условиях в дополнение к отчету производственной организации к этому времени должен быть выпущен отчет о специальных работах, выполненных научно-исследовательскими организациями по хоздоговорам. До выпуска сводного отчета в процессе изысканий проектировщикам представляются промежуточные заключения и предварительные рекомендации, необходимые для проработки вариантных решений проекта;

7) после окончательного согласования генплана в вышестоящих организациях (до утверждения проекта) выполняются дополнительные исследования (проходка буровых скважин и ограниченный объем контрольных исследований полевыми и

лабораторными методами) в пределах контуров (пятен) основных сооружений. Поскольку ранее выполненные исследования охватывают примерно с одинаковой детальностью всю изучаемую площадку, то при дополнительных исследованиях оказывается достаточным провести определение классификационных показателей песков и лишь в отдельных случаях провести небольшой объем контрольных испытаний песков.

10.25. Технологическая схема исследований на стадии рабочей документации включает два этапа. На первом этапе осуществляются: изучение инженерно-геологических вопросов, выдвинутых при обсуждении и утверждении проекта; инженерно-геологическое обоснование новых технических решений, принимаемых в ходе разработки рабочей документации; дальнейшая детализация и конкретизация инженерно-геологических условий строительства отдельных сооружений или их элементов, включая уточнение нормативных и расчетных характеристик (показателей) свойств песков; продолжение начатых ранее режимных наблюдений и уточнение прогнозов изменения природных условий на период строительства; выработка уточненных инженерно-геологических рекомендаций к строительству.

На втором этапе, в процессе начавшихся строительных работ, осуществляется значительный цикл инженерно-геологических работ и исследований, включающий главным образом контроль за реализацией инженерно-геологических рекомендаций. В необходимых случаях проводится ограниченный объем опытно-строительных работ (при возведении фрагмента земляного сооружения, выполнении работ по технической мелиорации песков и т.п.). Особое внимание уделяется документации строительных котлованов. Для наиболее ответственных сооружений, возводимых в сложных инженерно-геологических условиях, проводятся крупномасштабные исследования (например, вибродинамические испытания опытных фрагментов фундаментов под мощные турбоагрегаты). Отрабатывается методика геотехнического контроля за возведением земляных сооружений. Продолжается цикл начатых режимных наблюдений.

Одной из особенностей работ на этой стадии должно явиться максимально тесное взаимодействие проектировщиков (группы рабочего проектирования) с инженерами-геологами изыскательской партии и с группой геотехнического контроля.

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ОПТИМИЗАЦИИ КОМПЛЕКСНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПЕСКОВ

10.26. При разработке и реализации методики оптимизации инженерно-геологических изысканий, направленной на повышение их экономической эффективности, необходимо учитывать, что всякая формализация при решении рассматриваемых вопросов

должна быть обоснована не только с математических позиций и не только с точки зрения стоимостных показателей, но и с инженерно-геологических позиций, требующих обеспечения в максимально возможной мере генетического подхода к изучению строительных свойств грунтов, учета фактической точности и информативности применяемых методов, а также оценки необходимых инженерно-геологических прогнозов развития геодинамических и техногенных процессов и явлений в период строительства и эксплуатации проектируемых сооружений.

10.27. Выбор метода исследования определяется целевым назначением работ, инженерно-геологическими особенностями объекта исследования и возможностями проектно-изыскательской организации.

Объективные критерии для выбора метода исследования грунта из двух конкурирующих, отличающихся по точности, согласно [17], определяется выражением

$$\frac{\sigma_1^2}{\sigma_2^2} \gtrless \frac{C_2}{C_1},$$

где σ_1, σ_2 – среднеквадратические отклонения результатов, полученных рассматриваемыми методами;
C_1, C_2 – стоимости этих методов.

Если оказывается справедливым условие "меньше", то предпочтение отдается первому методу, в противном случае – второму. Выбор между методом непосредственного определения показателя свойств грунта и косвенным методом оценки того же показателя по уравнению регрессии требует дополнительного обоснования. Применение косвенного метода оценки целесообразно при условии выполнения следующего неравенства [17]:

$$|\rho| > \sqrt{\frac{C_к}{C_п}},$$

где $|\rho|$ – абсолютная величина истинного коэффициента корреляции между рассматриваемыми показателями свойств грунта;
$C_к, C_п$ – стоимости соответственно косвенного и прямого методов.

Однако обычно бывает известно не истинное значение коэффициента корреляции, а его статистические оценки – выборочные значения коэффициента r. Поэтому, согласно [17], рекомендуется поступать следующим образом: при $|r| > \sqrt{\frac{C_к}{C_п}}$ следует повторить проверку этого неравенства, заменив r его нижней доверительной границей, при $|r| < \sqrt{\frac{C_к}{C_п}}$ сделать то же, используя верхнюю доверительную границу. Если при этой замене знак неравенства не изменился, то остается в силе решение о целесообразности использования косвенного метода. При перемене знака рассматриваемая процедура выбора не приводит к ответу на поставленный вопрос. Для того чтобы упростить процедуру выбора метода, используются специальные номограммы для 95 и 99% доверительных вероятностей.

10.28. Выбор мест постановки испытаний грунта, закладки горно-буровых выработок, отбора образцов в общем случае диктуется реальными инженерно-геологическими условиями. Однако по мере увеличения детальности исследования для небольших по размерам участков возникает необходимость в более формализованном подходе к размещению точек опробования.

В зависимости от целей и условий инженерно-геологических исследований пункты определения инженерно-геологических параметров грунта могут располагаться на одной линии (т.е. лежать в створе) либо быть рассредоточенными по заданной сетке. Расстояние между лежащими на одном направлении пунктами с точками опробования, т.е. шаг опробования, зависит от детальности исследования и степени изменчивости свойств грунта. Так, для обоснования гражданского строительства соответственно для территорий III, II и I категорий сложности рекомендуемые максимальные расстояния между разведочными выработками составляют 20–40, 40–60 и 50–100 м (СН 225-79).

Инженерно-геологическая изменчивость свойств массива обусловлена характером размещения однородных элементов грунта. Установить режим этой изменчивости можно лишь при условии, что шаг опробования меньше интересующего нас однородного элемента грунта.

Величина шага опробования нередко зависит от избранного направления в связи с анизотропией изменчивости свойств грунта. В качестве меры этого явления Г.К.Бондарик [3] рекомендует так называемый модуль изотропности

$$G(L)_{x/y} = \frac{V_x}{V_y},$$

где $G(L)_{x/y}$ – модуль изотропности изменчивости характеристики L по направлениям X и Y;

V_x, V_y – коэффициенты вариации характеристики L в направлениях X и Y.

Наиболее интенсивную изменчивость следует ожидать по направлению сноса исходного материала, а минимальную изменчивость – в перпендикулярном ему направлении (вдоль фронта сноса). Эти направления Г.К.Бондарик предложил называть главными направлениями изменчивости. Именно по ним в общем случае следует закладывать инженерно-геологические профили.

Соотношение между шагом опробования по направлении сноса исходного материала (T_x) и шагом вдоль фронта сноса (T_y), как показал Г.К.Бондарик, можно выразить через модуль изотропности и размеры исследуемого участка в соответствующих направлениях (M_x и M_y):

$$\frac{T_y}{T_x} = [G(L)x/y]^2 \frac{M_x}{M_y}.$$

Саму же величину шага опробования в главных направлениях рекомендуется определять по формулам [3]:

$$r_x = \frac{M_x}{\sqrt{n}\, G(L)_{x/y}}; \qquad r_y = \frac{M_y}{\sqrt{n}\, G(L)_{x/y}},$$

где n – необходимое количество испытаний грунта.

10.29. В настоящее время все более заметную роль начинает играть формализованный подход к решению задачи о нахождении оптимального объема исследований свойств грунта. Он выгодно отличается от многих регламентаций своей теоретической обоснованностью и объективностью. В его основе лежит требование к определению с заданной точностью среднего значения характеристики грунта. Исходя из этого требования несложными расчетами можно установить количество проб грунта или испытаний, обеспечивающее заданную точность. Для практических целей могут быть рекомендованы два метода. Один из таких методов позволяет рассчитать необходимое количество проб грунта n по заданному отклонению ($\Delta \leqslant \tilde{L} - \bar{L}$) среднего значения характеристики грунта $\bar{L}$ от своего истинного значения $\tilde{L}$ и известному значению среднеквадратического отклонения σ:

$$n = \frac{t^2 \sigma^2}{\Delta^2},$$

где t – статистический критерий, зависящий от степени надежности определения среднего значения характеристик грунта, находится по таблице распределения Стьюдента.

Отметим, что распределение характеристики L не должно сильно отличаться от нормального.

Иногда эту формулу записывают иначе [17]:

$$n = \frac{t^2 V^2}{\rho^2},$$

где $V = \frac{\sigma_L}{\bar{L}}$ – коэффициент вариации характеристики L;

$\rho = \frac{\Delta}{\bar{L}}$ – показатель степени точности оценки среднего значения характеристики.

Этот метод оценки необходимого числа проб (испытаний) грунта имеет один недостаток: следует заранее располагать значениями Δ или ρ и V. Их можно получить из предварительного небольшого по объему опробования (серии испытаний) либо по таблице, приведенной в ГОСТ 20522–75. Следует отметить, что данные указанной таблицы обобщены по всем грунтам без учета их состава и особенностей. Выполненные в ПНИИИС комплексные исследования позволили установить, что показатели V и ρ для песков отличаются от приведенных в ГОСТ 20522–75. В табл.30, составленной по результатам исследований песков различного состава и генезиса на 25 площадках, расположенных в различных регионах Союза ССР, приведены обобщенные значения V и ρ.

Таблица 30

Показатель свойств грунта	Количество	ν			ρ		
		от	до	среднее	от	до	среднее
Объемная масса, г/см^3	1024	0,01	0,05	0,02 (0,05)	0,002	0,009	0,004 (0,005)
Влажность, %	922	0,02	0,48	0,17 (0,15)	0,01	0,09	0,04 (0,05)
Модуль деформации:							
по штампу	74	0,05	0,50	0,26 (0,30)	0,06	0,33	0,15 (0,1)
по прессиометру	111	0,04	0,52	0,24 (0,30)	0,02	0,24	0,12 (0,1)
по компрессии	255	0,07	0,54	0,17 (0,30)	0,03	0,15	0,05 (0,1)
Сопротивление сдвигу при вертикальных нагрузках, МПа:							
0,05	48	0,07	0,12	0,09 (0,20)	0,02	0,05	0,03 (0,1)
0,1	200	0,03	0,24	0,08 (0,20)	0,01	0,14	0,03 (0,1)
0,2	200	0	0,26	0,07 (0,20)	0	0,08	0,02 (0,1)
0,3	200	0,01	0,27	0,07 (0,20)	0,01	0,08	0,03 (0,1)

Примечание. Значения ν и ρ, указанные в скобках, приведены из прил. 3 к ГОСТ 20522–75.

Использование приведенных в табл.30 уточненных данных позволит в ряде случаев снизить необходимое число проб.

Применение рассматриваемого метода во многом облегчают специальные графики зависимости n от V и ρ [17].

Вторым методом является метод последовательного анализа. Он позволяет установить необходимое количество испытаний в процессе самого исследования.

Рекомендуется следующая процедура определения количества испытаний грунта n : для каждого нового i -го значения характеристики грунта L_i рассчитывается вспомогательная величина $U_i = \frac{1}{i(i-1)}\left[(i-1)L_i - \sum_{j=1}^{i} L_j\right]^2$; ; в качестве искомого количества испытаний n, удовлетворяющего неравенство $P\left\{\bar{L} - \frac{\Delta}{2} \leq \tilde{L} \leq \bar{L} + \frac{\Delta}{2}\right\} \geq 1-\alpha$, является такое значение n , при котором $\sum_{i=2}^{n} U_i \leq \frac{\Delta}{4t^2} i(i-3)$. Доверительная вероятность $P = 1 \div 2$ принимается равной 95%. Величина t определяется при числе степеней свободы $f = \infty$. В качестве оценки Δ принимают некоторое ориентировочное значение, основываясь на ранее выполненных исследованиях грунта и требованиях к детальности изысканий.

10.30. Изложенный выше подход к комплексным исследованиям песков полевыми и лабораторными методами в конечном итоге направлен на повышение надежности инженерно-геологического обоснования проектов различных сооружений и повышение технико-экономической эффективности исследовательских и изыскательских работ.

Подчеркнем лишь, что технико-экономическую эффективность инженерно-геологических изысканий, в частности комплексных исследований песков полевыми и лабораторными методами, необходимо рассматривать и оценивать в общем комплексе "изыскания – проектирование – строительство – эксплуатация" для каждого конкретного объекта и сооружения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баркан Д.Д. Виброметод в строительстве. М., 1959.
2. Белый Д.Д., Дудлер И.В., Мосьяков Е.Ф., Потапов А.Д., Юлин А.Н. Методика изучения и оценка роли морфологии зерен песков различного генезиса в формировании их инженерно-геологических свойств. – В кн.: Генетические основы инженерно-геологического изучения горных пород. Труды Международной конференции (4–6 июня 1974 г.). М., изд-во МГУ, 1975.
3. Бондарик Г.К. Основы теории изменчивости инженерно-геологических свойств горных пород. М., Недра, 1971.
4. Васильев А.В. Отбор проб горных пород при инженерно-геологических исследованиях. М., Недра, 1970.
5. Вопросы методики и техники отбора монолитов грунтов из буровых скважин при инженерно-геологических изысканиях. Труды ПНИИИС, т.9. М., 1971.
6. Гольдштейн М.Н. Механические свойства грунтов (напряженно-деформативные и прочностные характеристики). М., Стройиздат, 1979.
7. Дудлер И.В. Комплексные исследования грунтов полевыми методами. М., Стройиздат, 1979.
8. Дудлер И.В., Юлин А.Н. Учет структурных особенностей песков при определении их плотности динамическим зондированием. – В кн.: Инженерная геология. Полевые методы исследований. Межвузовский сборник. Новочеркасск, 1981.
9. Дундулис К., Микшас Р. Влияние петрографических особенностей на прочность и деформируемость песчаных пород. – В кн.: Научные труды высших учебных заведений Литовской ССР. География и геология, X, Вильнюс, Минтис, 1973.
10. Иванов П.Л. Разжижение песчаных грунтов. М., Госэнергоиздат, 1962.
11. Иванов П.Л. Уплотнение несвязных грунтов взрывами. М., Стройиздат, 1967.
12. Иванов П.Л. Разжижение и уплотнение несвязных грунтов при динамических воздействиях. Л., ЛПИ, 1978.
13. Маслов Н.Н. Условия устойчивости водонасыщенных песков. М., Госэнергоиздат, 1959.
14. Методы изучения осадочных пород, т.I. М., Госгеолтехиздат, 1957.
15. Методическое пособие по инженерно-геологическому изучению горных пород. М., Изд-во МГУ, 1968.
16. Петтиджон Ф., Поттер П., Сивер Р. Пески и песчаники. М., Мир, 1976.
17. Пособие по расчетам опробования грунтов при инженерных изысканиях для строительства. М., Стройиздат, 1975.
18. Потапов А.Д. Методика ускоренного определения морфологии зерен песков различного генезиса. Рук. деп. ВИНИТИ № 10–76. М., 1975.
19. Радина В.В. Об относительной плотности песков. Труды Гидропроекта № 3. М., 1960.
20. Ризаев Ш.Р. О методах определения угла естественного откоса сыпучих грунтов. Изв. АН УзССР, серия техн. наук, 1970, № 2.
21. Сергеев Е.М. и др. Грунтоведение. М., изд-во МГУ, 1971.
22. Сергеев Е.М. Инженерная геология – наука о геологической среде. – Инженерная геология, 1979, № 1.
23. Фадеев П.И. Пески СССР, ч.I. М., изд-во МГУ, 1951.
24. Фадеев П.И. Песчаные породы Мещерской низменности. М., 1969.
25. Фадеев П.И. Методические рекомендации по изучению и использо-

ванию гранулометрии песчаных пород в инженерно-геологических целях. М., изд-во МГУ, 1974.

26. **Ферронский В.И., Грязнов Т.А.** Пенетрационный каротаж. М., Недра, 1979.

27. **Хазанов М.И.** О природе упрочнения песков. Труды ПНИИИС, т. XVII. М., 1972.

28. **Хазанов М.И., Черняк Э.Р., Рубинштейн А.Я.** Об исследовании сжимаемости песков лабораторными и полевыми методами. – В кн.: Полевые методы изучения свойств песчаных грунтов. М., 1972.

29. **Хазанов М.И., Черняк Э.Р., Скрастиньш М.П.** О методике исследования сжимаемости грунтов методом прессиометрии. Прибалтийская геотехника. – Материалы II Прибалтийской конференции по геотехнике. Госстрой Эстонской ССР. Таллин, 1972.

30. **Химический** анализ горных пород и минералов. М., Недра, 1974.

31. **Чаповский Е.М.** Лабораторные работы по грунтоведению и механике грунтов. М., Недра, 1975.

32. **Черняк Э.Р., Иножарская Н.Г.** Оценка сжимаемости песков по данным компрессионных испытаний. Реф. сб. Изучение грунтовых массивов полевыми методами, вып.6 (47). М., изд-во ЦИНИС, 1976.

33. **Шванов В.Н.** Песчаные породы и методы из изучения (Распространение структуры, текстуры). Л., 1969.

34. **Шимкус Й., Аликонис А., Сидауга Б.** Строительные свойства глинистых и песчаных грунтов Литвы. Вильнюс, Мокслас, 1979.

СОДЕРЖАНИЕ

Стр.

Предисловие 3
1. Пески как природные образования. 5
2. Строительные свойства песков 18
3. Отбор образцов песчаных грунтов 53
4. Изучение химико-минерального состава песков 63
5. Изучение структуры и текстуры песков . . 70
6. Изучение влажности и водных свойств песков 96
7. Изучение деформационных свойств песков 107
8. Изучение прочностных свойств песков . . 140
9. Изучение динамической устойчивости песков 167
10. Комплексные исследования песков. . . . 187
Список литературы 209

ПНИИИС
Госстроя СССР

МИСИ
им. Куйбышева
Минвуза СССР

РЕКОМЕНДАЦИИ
ПО КОМПЛЕКСНОМУ ИЗУЧЕНИЮ И ОЦЕНКЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ СВОЙСТВ ПЕСЧАНЫХ ГРУНТОВ

Редакция инструктивно-нормативной литературы
Зав.редакцией *Л.Г.Бальян*
Редактор *О.Г.Дриньяк*
Мл.редактор *И.В.Машеро*
Внешнее оформление художника
Худ.редактор
Технический редактор *Д.И.Касимов*
Корректор *Е.Р.Герасимюк*

Н/К

Подписано в печать 09.08.84 Т–18041 Формат 84x1081/32
Набор машинописный Печать офсетная Бумага офсетная № 2
Усл.печ.л. 11,13 Усл.-кр.-отт. 11,34 Уч.-изд.л. 13,69 Тираж 5000 экз.
Изд. № ХП–60 Зак. № 747 Цена 70 коп.

Стройиздат, 101442, Москва, Каляевская, 23а

Тульская типография Союзполиграфпрома при
Государственном комитете СССР по делам издательств,
полиграфии и книжной торговли.
г. Тула, проспект Ленина, 109

gost.e-ecolog.ru