

Санкт-Петербургский государственный университет

ЛАЗУТА Анастасия Александровна

Выпускная квалифицированная работа

Анализ результатов изучения просадочных свойств лёссовых грунтов различными методами

Уровень образования: *Бакалавриат*

Направление *05.03.01 «Геология»*

Основная образовательная программа *СВ.5018.2016 «Геология»*

Научный руководитель:

Кандидат геолого-минералогических наук, доцент

Корвет Надежда Григорьевна

Рецензент: Главный специалист

Отдела инженерных изысканий

ООО "ПИИ Лигато" Медведева Н. В.

Санкт-Петербург

2020 г.

Аннотация

Изучены особенности лёссовых грунтов, методы, применяемые для оценки просадочности, также, проведена оценка просадочности лёссовых грунтов косвенными методами на различных участках. Проведён сравнительный анализ результатов, выбраны наиболее достоверные критерии оценки просадочности для исследуемых участков.

Annotation

The features of loess soils, the methods used to assess subsidence are studied, and the subsidence of loess soils by indirect methods in various areas is assessed. A comparative analysis of the results was carried out, the most reliable criteria for assessing subsidence for the studied areas were selected.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЛЁССОВЫХ ГРУНТОВ	6
ГЛАВА 2. ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЛЕССОВЫХ ГРУНТОВ	8
2.1. Состав лёссовых пород	9
2.2. Водорастворимые соли.....	10
2.3. Физико-химические свойства лёссовых грунтов.....	10
2.4. Структурные связи лёссовых грунтов	11
2.5. Физико-механические свойства лёссовых пород	12
2.6. Просадочность лёссовых пород	14
ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЯ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ ЛЁССОВЫХ ГРУНТОВ ДЛЯ ИХ ОЦЕНКИ КАК ОСНОВАНИЙ СООРУЖЕНИЙ	16
3.1 Оценка просадочности лёссовых грунтов косвенными методами	17
3.2. Оценка просадочности лёссовых грунтов прямыми методами	22
3.2.1. Применение лабораторных методов испытания грунтов.....	22
3.2.2. Применение полевых методов испытания грунтов	24
ГЛАВА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНКИ СКЛОННОСТИ ГРУНТОВ К ПРОСАДОЧНЫМ ЯВЛЕНИЯМ РАЗЛИЧНЫМИ МЕТОДАМИ	26
4.1 Оценка просадочности грунтов прямыми методами по результатам лабораторных испытаний	26
4.2 Оценка склонности грунтов к просадочным явлениям по косвенным признакам.....	34
4.3 Анализ полученных результатов с целью возможности их использования для оценки просадочности лёссовых грунтов.....	48
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	52
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	53
ПРИЛОЖЕНИЯ	55

Введение

Важной задачей инженерно-геологических исследований является оценка взаимодействия сооружения с горными породами, слагающими геологический разрез участка строительства.

Многие из горных пород со строительной точки зрения являются структурно-неустойчивыми, и строительство на таких породах связано с различными трудностями. К числу таких пород относятся лёссовые породы, занимающие значительные территории во всём мире. Строительство сооружений на них невозможно без принятия решений по обеспечению безопасности, которое связано с решением проблемы просадочности – особого свойства лёссовых пород.

В своей работе я рассматриваю инженерно-геологические особенности лёссовых пород и методы их инженерно-геологической оценки как оснований для различных сооружений. Эта оценка заключается в определении физико-механических пород при решении задач для обеспечения устойчивости сооружений. Учитывая, что лёссовые породы обладают просадочностью (способностью терять свою прочность при воздействии на них водой), для них определяют показатели свойств, характерные только для них. В отличие от других пород, для лёссов возможна предварительная оценка их инженерно-геологических особенностей большим количеством косвенных показателей с целью уменьшения дорогих и трудоёмких прямых методов оценки. На основе косвенных показателей возможно прогнозировать склонность пород к просадочным явлениям. Результаты прогноза используются для предварительного районирования территории с выделением участков по признаку просадочности и непросадочности лёссовых грунтов. Но не всегда косвенные методы могут достоверно оценить свойства лёссов, поэтому необходимо дополнительно их определять прямыми методами. Исходя из этого, мною была определена:

Цель работы:

- анализ физико-механических свойств лёссовых грунтов строительных площадок различными методиками с целью возможности использования для оценки их просадочности.

Чтобы достигнуть данной цели, были поставлены следующие задачи:

- Изучить особенности лёссовых грунтов, определяющие их инженерно-геологические свойства.
- Изучить методы, применяемые для оценки просадочности лёссовых грунтов.

- Оценить просадочность лёссовых грунтов косвенными методами на различных участках.

- Провести сравнительный анализ результатов, полученных косвенными методами с предоставленными данными прямых лабораторных определений.

- Выбрать по результатам сравнительного анализа наиболее достоверные критерии оценки просадочности для исследуемых участков

- Установить склонность исследуемых пород к просадке в зависимости от основных факторов (естественной влажности и естественной пористости), влияющих на просадочность грунтов.

Благодарность. Автор выражает огромную благодарность своему научному руководителю к.г. – м.н. Н. Г. Корвет.

Глава 1. Общая характеристика лёссовых грунтов

Изначально лессами называли породы, которые имели «лессовые» признаки. Они характеризуются: пылеватым составом, светло-палевый цвет и наличие макропор. Но этот термин был настолько широкий, что объединял породы с разнообразным составом и свойствами. Поэтому возникла необходимость в разделении непосредственно лессов и многочисленных лессовидных пород (например: выщелоченный, гумусовый, слоистый, аллювиальный, оглеенный, каменный, и другие лессы). Н.Н. Карлов и М.И. Ломоноич, придерживались генетического толкования данного термина, и отнесли к лессам породы, которые имели эоловое происхождение, то есть были накоплены за счет ветровой деятельности. А вот породы, которые были лишь похожи на лессы, но происхождение было иное, они отнесли к лессовидным породам (Абелев, 1979).

Такие научные исследователи как, С.С. Морозов, Г.А. Мавлянов, А.П. Павлов, Н.Я. Денисов, под лессовыми понимали такие породы, которые имели следующие литологические признаки: светло-палевый цвет, пылеватый состав, макропористость, отсутствие слоистости и наличие большого количества карбонатов. С.С. Морозов давал некоторое уточнение, что к лёссам относятся все же те породы, которые, обладая обычными для лессовых пород признаками, состоят преимущественно из элементарных пылеватых частиц, причем в пылевой фракции крупнопылеватые частицы (0,05-0,01 мм) преобладают над мелкопылевыми (0,01-0,002 мм) (Денисов, 1946).

Некоторые авторы придерживались такого мнения, что для лёссов непременным свойством должна быть именно просадочность. Но это идет в разрез с предыдущими представлениями, потому что макропоры, нередко очень слабо заметны и не всегда присущи просадочным лёссам. Хотя лёссы, характеризующиеся макропористой структурой, иногда не являются просадочными, а напротив, служат устойчивым элементом строения лёссовых пород. Поэтому «макропористые грунты» и «лессовые породы» неравнозначны, и просадочность не является обязательным признаком лёсса (Лысенко, 1978).

На сегодняшний день принято объединять лёсс и многочисленные лессовые грунты термином «лессовые породы». И очень часто между ними не делают различие, потому что их сложно разделять между собой.

Следует отметить, что в принятом ГОСТе 25100-2011, как и в предыдущем ГОСТе 25100-95, понятие «лессовый грунт» заменил термин «просадочный глинистый» грунт, что, как считает Т.Г. Рященко «является недопустимой ошибкой и шагом назад в разработке проблем грунтоведения» (Рященко, 2010).

Вопрос о происхождении лёсса до сих пор не получил общепринятого решения. Но его образование связывают с разными геологическими процессами и стадиями породообразования. На этот счет существует несколько групп гипотез. Первая группа включает себя гипотезы, которые объясняют происхождение лёсса эоловым путём. Вторая группа рассматривает лёсс как породу, которая отложилась в водной среде. Ну а к третьей группе гипотез относятся высказывания, в соответствии с которыми пылеватый материал может накапливаться любым путем, а превращение его в лёсс как породу, обладающую определенной суммой признаков, происходит в результате процессов выветривания и почвообразования.

Территория стран СНГ на 34% покрыта лессовыми грунтами. В России они распространены больше в южной европейской части, а вот в Украине они занимают 4/5 всей площади страны. Так же лёссы имеют почти повсеместное распространение в Западной, Восточной и Южной Сибири, Средней Азии и Казахстане. На рисунке 1 мы можем наблюдать распространение лёссовых пород на территории России и в странах СНГ.

Для того чтобы на территории развивались лессовые грунты, необходимы определенные физико-географические и климатические условия, орографические обстановки в плейстоцене, в течение которых протекали гипер- и диагенетические преобразования. Из-за того что на Русской равнине в определенные ледниковые этапы физико-географические зоны сдвигались, формирование и отложение лессовых пород происходило на больших территориях. Иногда мы можем встретить их даже на тех территориях, где по физико-географическим условиям они не могли образоваться.

На Русской равнине прослеживается тенденция увеличения мощности этих пород, с севера на юг. В целом она варьирует от долей метра до десятков метров. На возвышенностях (Приволжская, Вольно-Подольская, Донецкая и др.), которые отличаются небольшой относительно высотой, мощность лёссовых пород значительно меньше, нежели на приводораздельных пологих склонах. В долинах рек, мощность лессовых пород растет, обычно от первой надпойменной террасы к равнинным водоразделам. Примером могут служить долины рек Днепр и Дон. Благодаря геологической истории территории и по характеру слагающих её пород, мы можем определить мощность лёсса.

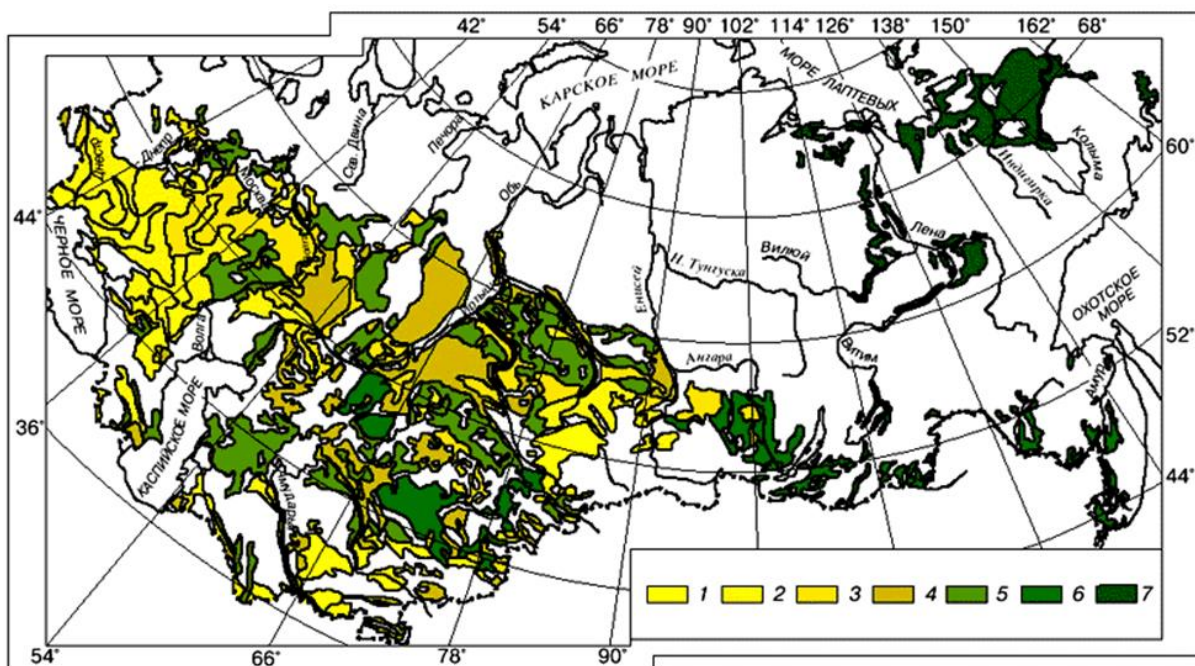


Рисунок 1. Карта распространения лёссовых пород на территории России и стран СНГ (составили В.С. Быкова и С.А. Пастушкова, 1985): 1 - лёссы и лёссовые породы большой мощности (более 10 м), проявляющие просадку под собственным весом; 2 - лёссовые породы и лёссы мощные (более 5 м), проявляющие значительные просадочные деформации при дополнительных нагрузках; 3 - лёссовые породы средней мощности (5 - 10 м), проявляющие незначительные просадочные деформации при дополнительных нагрузках; 4 - лёссовые породы прерывистого распространения (3 - 5 м), непросадочные; 5 - лёссовые породы прерывистого и островного распространения изменчивой мощности, неоднородные по просадочности; 6 - лёссовидные и покровные глинистые породы островного и прерывистого распространения, маломощные, непросадочные; 7 - мерзлые покровные пылеватые глинистые породы, проявляющие термопросадки в результате оттаивания (Лёссовые..., 1986)

Глава 2. Инженерно-геологическая характеристика лёссовых грунтов

Лёссовые породы, являются покровными континентальными образованиями. Они распространены на очень больших территориях с различными физико-географическими условиями, это широкий спектр гипергенных изменений. Эти обстоятельства вызывают значительные пространственные изменения, динамичность грунтов и их особые черты, таких как: полиминеральность, полидисперстность и своеобразную текстуру массивов лёссовых пород. Поэтому целесообразно рассмотреть состав, структуру и основные свойства лёссовых пород.

2.1. Состав лёссовых пород

Следует различать лёсс и лёссовые породы.

Лёссовые породы – это тип континентальных пород разного генезиса. По составу их относят к суглинкам и супесям. От лёссов они отличаются тем, что в них присутствует слоистость и прослой галечников (Абелев, 1979).

Лёсс – это лёссовая порода, которая характеризуется следующими признаками: своеобразная структура, отсутствие слоистости и минеральный состав.

Одним из главных признаков, по которому отличают типичный лёсс от лёссовых пород – это гранулометрический состав.

По гранулометрическому составу наиболее однородными являются лёссы. Их состав постоянен, не зависимо от области, в которой они распространены. Во всех районах они характеризуются: высоким содержанием крупнопылеватых частиц (до 70-80%) диаметром 0,05-0,01 мм, очень маленьким количеством частиц крупнее 0,25 мм и конечно глинистая фракция, которая обычно не превышает 16%. А вот лёссовые породы характеризуются более разнообразным гранулометрическим составом. Выделяют: лёссовидные суглинки, лёссовидные супеси, лёссовидные пески и лёссовидные глины.

Гранулометрический состав лёссовых пород колеблется от легких пылеватых супесей и мелкозернистых пылеватых песков до глин. В большинстве случаев, лёссовые породы представлены пылевыми суглинками, в составе которых содержится 50-80% пылеватых частиц, диаметр которых варьирует от 0,05 до 0,002 мм, 3-30% - составляют глинистые частицы (менее 0,002 мм), и до 15% мелкопесчаных частиц (0,05-0,25 мм). Не больше 5% составляют частицы крупнее 0,25 мм.

Важным отличительным критерием лёссов от лёссовидных пород служит отношение между крупнопылевыми (0,05-0,01 мм) и мелкопылевыми (0,01-0,002 мм) частицами. В лёссовидных породах это отношение близко к единице, а в лёссах составляет примерно 1,5-2 и более (Галай, 1984).

Что касается компонентов химического состава в лёссовых породах, они очень разнообразны и пределы их колебания значительны (SiO_2 — 43,1—78,0%; Al_2O_3 — 4,0-17,54%; Fe_2O_3 — 0,4—9,79%; CaO — 2,68—15,9%, MgO — 0,69—3,89%; Na_2O — 0,07—3,15%; K_2O — 0,19—2,8% и т. д.). Это объясняется различием их гранулометрического состава, а также химического состава пород местных областей сноса (Галай, 1984).

2.2. Водорастворимые соли

Водорастворимые соли оказывают важное влияние на свойства лёссовидных грунтов. В них преобладают карбонаты, так же встречаются сульфаты, бикарбонаты и конечно хлориды. В них преобладают карбонаты, так же встречаются сульфаты, бикарбонаты и конечно хлориды. В твердом виде присутствуют гипс и карбонаты магния и кальция, а легкорастворимые соли находятся в растворе и твердом состоянии. На окраску лёссовых пород влияет присутствие карбоната кальция, способствует макроагрегации, образованию и сохранению вертикальных отдельностей, устойчивости макропор, созданию структурных связей.

На суше водорастворимые соли образуются в процессе выветривания горных пород, а также выделяются при вулканических извержениях. Их повышенное содержание характерно для отложений озёр и морей, которые находятся в аридном климате. Засоление поверхностных отложений происходит из-за повышения концентрации солей, вследствие испарения минерализованных грунтовых вод.

Общее количество водорастворимых солей варьирует в пределах от 0-10 до 15-20%, реже превышает. В пылевой фракции сосредоточена основная масса карбонатов, в типичных лёссах она составляет 59-84% от общего их количества в породе. В лёссах пустынной зоны значительное количество карбонатов приурочено к фракции тонкого песка (0,25-0,05 мм).

Перемещение легкорастворимых солей в лёссовой толще связывают с выпадением атмосферных осадков и с колебанием уровня грунтовых вод. Поэтому мы можем говорить, что распределение солей изменяется во времени. От микро- и макро рельефа участка зависит расположение горизонтов скопления легкорастворимых солей в лёссовой толще.

2.3. Физико-химические свойства лёссовых грунтов

В лёссовых породах величина рН варьирует в значительных пределах – от 4,5 до 9,2, что связано с отличиями их в степени выщелоченности, составом обменных катионов, присутствием простых солей. Непосредственно в лёссах рН изменяется примерно от 7 до 9. В лёссовых породах, которые находятся в лесной зоне, карбонатные соли встречаются достаточно редко и их величина рН равна 4,5-7. В

лесостепной зоне, величина рН колеблется от 7 до 8. В лёссовых породах рН достигает 8,5-9,2.

Между количеством атмосферных осадков и величиной рН лёссовых пород существует связь. Чем больше количество осадков, тем более выщелочены грунты. Величина рН выше в районах с засушливым климатом. На возвышенностях лёссовые породы характеризуются более низким рН, чем на низменностях.

Емкость поглощения и состав обменных катионов также изменяются зонально. Наибольшая емкость поглощения наблюдается в полосе черноземов лесостепи и степи, где климатические условия благоприятствуют химическому выветриванию. В зоне полупустыни и пустыни емкость поглощения снижается в связи с сухостью климата и относительно грубодисперсным составом лёссовых пород.

2.4. Структурные связи лёссовых грунтов

Инженерно-геологические свойства грунтов, определяют структурные связи, то есть связи между структурными элементами грунта (частицами, микроагрегатами, агрегатами, зёрнами) (Грунтоведение, 2005).

Формирование структурных связей в грунтах происходит в местах максимального сближения – контактах, а не по всей межфазной поверхности частиц. Важным показателем является характер индивидуальных контактов, а также их количество. Они определяют прочностные, деформационные и многие другие инженерно-геологические свойства грунта.

В грунтах выделяют следующие виды структур: коагуляционные; переходные; кристаллизационно – цементационные; смешанные и раздельнозернистые (несвязные) структуры. Все эти структуры отличаются друг от друга присутствием одного или нескольких типов контактов, которые различаются определенным прочностным и деформационным поведением, а также характерными морфологическими особенностями (микростроением). То есть определенным взаимным расположением структурных элементов с присущими им размерами и формой, а также ориентацией в пространстве.

Лёссовидные образования и лёссы – это грунты с переходным типом структуры. Как правило, в таких структурах преобладают переходные контакты, формирование которых идет в основном за счет ионно-электростатических связей в ходе регрессивного литогенеза и прежде всего – обезвоживания (подсушивания) грунта.

Снижение прочности структурных связей при увлажнении, является одним из важнейших факторов просадочности лёссовых грунтов и лёссов. Этот переход не сопровождается увеличением объёма системы из-за высокой её пористости, а приводит к тому, что даже при небольших внешних нагрузках она начинает быстро уплотняться вследствие отсутствия порового давления. Большинство грунтов с переходными структурами представляет собой водоненасыщенные трехкомпонентные системы.

Нельзя оставить без внимания тот факт, что на прочность породы влияют карбонаты, особенно высокодисперсные, так как они создают слаборастворимые, достаточно прочные, кристаллизационные связи между отдельными частицами в лёссовых породах. Кроме того, они обуславливают значительную насыщенность поглощающего комплекса лёссов кальция, что приводит к агрегации глинистой и коллоидной фракций.

2.5. Физико-механические свойства лёссовых пород

Лёссовые образования, являются полидисперсными, полиминеральными образованиями с различными типами структур, которые формируются в результате различных генетических, диагенетических и эпигенетических процессов. Поэтому рассматривая свойства лёссовых пород, мы должны это брать во внимание. Большое разнообразие факторов, действующих в условиях континентальной поверхности, неизбежно приводит к разнотипности лёссовых пород, как по составу и строению, так и по их инженерно-геологическим свойствам.

Основные физико-механические свойства лёссовых пород:

Плотность грунта ρ колеблется в пределах от 1,35 до 2,0 г/см³. Плотность грунта, непосредственно зависит от его влажности. Это важный фактор, который изменяется зонально. Например, в районах с засушливым климатом показатель влажности имеет меньшее значение, в отличие от гумидных областей.

Плотность скелета грунта ρ_d лёссовых пород находится в пределах от 1,15 до 1,82 г/см³. Чаще всего ρ_d находится в пределах 1,35-1,55 г/см³. Данная величина может увеличиваться с глубиной. Также, она коррелируется с просадочностью лёссовых пород. Мы можем проследить общую тенденцию к понижению просадочности, когда плотность скелета лёссовых пород более 1,41 г/см³.

Плотность минеральной части ρ_s лёссовых грунтов находится в пределах от 2,50 до 2,87 г/см³. Чаще всего она равна 2,59-2,78 г/см³. Среднее значение плотности

минеральной части примерно составляет $2,69 \text{ г/см}^3$. Данный показатель, как правило, бывает занижен тогда, когда лёссовые породы гуммузированы. Обычно плотность минеральной части в таких случаях колеблется от $2,53$ до $2,61 \text{ г/см}^3$.

Пористость n . Когда лёссовые породы находятся в сухом состоянии, они имеют повышенную пористость, примерно 44-56 %. И для таких пород характерно резкое уплотнение при замачивании водой.

Естественная влажность W . Данный показатель у лёссовых пород изменяется в широких достаточно пределах, от 2 до 45%. Чаще всего она колеблется от 6 до 21-28 %. Естественная влажность лёссовых пород в первую очередь зависит от климатических и гидрогеологических условий местности. К примеру, в очень засушливых районах, где грунтовые воды залегают достаточно глубоко, естественная влажность будет находиться в пределах от 2% до 23%. А вот в областях, где количество атмосферных осадков очень большое, и грунтовые воды залегают не глубоко, данный показатель может колебаться от 15-17% до 35-39%, что обычно выше влажности нижнего предела W_p . К таким областям в основном относятся: север Украины, Западная Сибирь, центральная часть России.

Коэффициент водонасыщения S_r . Этот показатель у лёссовых пород, обычно, меньше 0,8. А это является важным признаком для распознавания просадочных лёссовых пород, так как ярко выраженными просадочными свойствами обладают маловлажные грунты. Особенно если они относятся к рыхлым или очень рыхлым грунтам.

Число пластичности I_p у лёссовидных глин, которые не имеют широкого развития, не выше 25-30. Лёссы имеют данный показатель в пределах 4-10, лёссовидные суглинки – 7-1. Как правило, у лёссовых пород невысокая пластичность, это хорошо увязывается с особенностью их дисперсности и химико-минералогического состава.

Коэффициент сжимаемости a . Этот показатель у лёссовых пород изменяется в достаточно широких пределах от $0,004$ до $0,068 \text{ см}^2/\text{кг}$ в интервале нагрузок 1-2 кг/см^2 . Коэффициент сжимаемости тесно связан с влажностью и структурными особенностями породы. Сами по себе лёссовые грунты и лёссы обладают незначительной сжимаемостью, если естественная влажность небольшая. Осадка данных пород под нагрузкой невелика. Но когда порода резко насыщается водой, снижается сопротивление сжатию.

Сопротивление сдвигу τ определяется физическим состоянием лёссовых пород. Когда порода находится в сухом состоянии данная величина значительная, но как

только происходит увлажнение, она сильно снижается. Величина угла внутреннего трения ϕ лёссовых пород изменяется от 5 до 31°, а сцепление C – от 0 до 0,43 кг/см². Это зависит от приложенного нормального давления и влажности. У лёссовых пород есть характерная особенность: значительное снижение их сопротивления сдвигу в момент замачивания - угол внутреннего трения уменьшается на 4-8°. Величина сцепления C , также значительно падает.

Величина модуля общей деформации E лёссовых пород, изменяется от 24 до 525 кг/см². Данный показатель характеризует деформационные свойства породы. Самые большие значения модуля деформации, характерны для пород с влажностью ниже 16-18%. Сильно увлажнённые лёссовые породы, с влажностью больше 21-25%, имеют модуль деформации ниже 150 кг/см². У пород, которые находятся в водонасыщенном состоянии, данная величина меньше 44-50 кг/см².

2.6. Просадочность лёссовых пород

Склонность к просадочности - одна из отличительных черт лёссовых грунтов. Просадочность горных пород – это потеря ими связности при увлажнении с последующим быстрым уплотнением под весом вышележащих пород и нагрузкой от зданий и сооружений. Только для лёссов и лёссовых грунтов характерно явление просадочности, потому что они характеризуются повышенной макропористостью.

Так как лёссовидные грунты обладают большой пространственной изменчивостью и имеют очень много источников искусственного и естественного увлажнения, для них характерно проявление неравномерных по площади, масштабам и времени просадок. Это может привести к деформациям зданий, которые расположены на неравномерно проседающих грунтах. Процесс просадки идет довольно быстро и такие деформации очень часто приводят к аварийным ситуациям.

Необходимо более подробно рассмотреть процессы, которые способствуют формированию просадки. Интерес к проблеме формирования просадочности, появился после того, как была выпущена классическая работа Н. Я. Денисова (1946). В данной работе впервые была предложена теория просадочности, которую далее стали называть принципом Денисова. Одной из главных причин просадочности Н. Я. Денисов считал более высокую пористость лёссовых пород по сравнению с нормальной при данном напряженном состоянии. Породы, которые имеют нормальную пористость, в

природных условиях находятся в равновесии и называются нормально уплотненными породами, а просадочные лёссы являются недоуплотненными (Иванов, 2001).

Недоуплотнённое состояние, может быть вызвано различными факторами – способом отложения и составом осадков, скоростью нарастания вышележащей толщи, структурными связями между минеральными частицами, а также разуплотнение отложившихся разными способами осадков в результате изменения температурного режима и почвообразовательных процессов. Данные факторы выявил Н. Я. Денисов.

Механизм разрушения структурных связей Н. Я. Денисов связывает с расклинивающим давлением тонкого слоя воды, которое возникает на контактах между частицами (Денисов, 1946).

Так же есть теория, выдвинутая Г.А. Мавляновым, которая говорит о том, что просадочность имеет генетическую природу. Он считает, что разделение лёссовых пород на генетические типы позволит прогнозировать их просадочность. В частности, лёссы эолового и пролювиального происхождения наиболее просадочны, а аллювиальные лёссовидные отложения непросадочны (Иванов, 2001).

Как уже говорилось ранее, лёссовые грунты формируются в основном в зонах с аридным климатом и недостаток влаги способствует сохранению их недоуплотненного состояния, а следовательно и просадочности. Как только увеличивается влажность, грунт постепенно начинает уплотняться. Из этого следует, что грунт, обладающий большей естественной влажностью, будет менее просадочным, чем аналогичные грунты с меньшей влажностью. Благодаря этому, было установлено, что с ростом коэффициента водонасыщения (степени заполнения пор водой) коэффициент относительной просадочности грунтов закономерно и нелинейно снижается.

Существуют некоторые рекомендации и выводы для оценки и прогноза просадочности лёссовых пород при их взаимодействии с техногенной средой (Иванов, 2001):

1. В лёссовых породах структурные связи являются водонеустойчивыми.
2. Просадка происходит в несколько этапов: замачивание, разупрочнение системы (разрушение водонеустойчивых структурных связей), переход пылеватых частиц в движение, уплотнение всей системы, наступление равновесия, которое соответствует степени воздействия по увлажнению и давлению.
3. Просадочность происходит в лёссовых породах разного генезиса и контролируется физическим и напряженным состоянием.

4. Просадочность - свойство лёссовых макропористых пород особого (недоуплотненного) состояния, которое проявляется при замачивании под давлением в форме быстрого неравномерного уплотнения.

5. Обуславливающее просадочность физическое состояние лёссовых пород (плотность, влажность, связность), формируется вследствие геологических процессов, которые в свою очередь имеют прямую зависимость от географической (главным образом климатической) обстановки, начиная с момента осаждения и проходя через все стадии изменения осадка и превращения в породу.

6. В результате инженерно-геологических изысканий территорий, сложенных лёссовыми породами, необходимо давать оценку физического состояния и прогноз просадочности по всем прямым и косвенным признакам.

7. Величина просадочности и ее изменчивость в пространстве и во времени зависит от множества факторов процесса формирования просадочности лёссовых пород. При интенсивном техногенезе главную роль играет антропогенное влияние, которое пагубно влияет на процессы просадки. Когда лёссовая порода увлажняется, то происходит растворение цементационных связей и разрушение макропористой текстуры. Это способствует тому, что происходит резкая потеря прочности грунта, значительная и быстро развивающаяся деформация уплотнения – просадка.

Глава 3. Исследования инженерно-геологических особенностей лёссовых грунтов для их оценки как оснований сооружений

Так что же такое просадочность? **Просадочность** – это свойство лёссовой горной породы, которое проявляется в уменьшении объёма породы при замачивании под собственным весом, либо под действием внешних нагрузок. Для того чтобы выявить просадочные свойства грунта, необходимо применить косвенные и прямые методы.

Прямые методы исследования грунтов на просадочность применяют для получения численных характеристик просадочности. Их вычисляют посредством обработки данных, которые мы получаем в ходе специализированных полевых или лабораторных испытаний грунтов.

Косвенные методы определения просадочности нужны нам для определения склонности грунтов к просадке. Их используют на самых ранних стадиях изучения лёссовых грунтов на территории, чтобы её предварительно районировать и выделить

наиболее опасные участки по потенциальной угрожаемости лёссов к просадкам. На основе этого выбирается методика, которая в дальнейшем поможет изучить грунты и обосновать назначения специализированных полевых и лабораторных испытаний, ориентировочной оценки объёмов работ. Не смотря на всё это, косвенные методы не позволяют численно оценить величину просадочности лёссовых грунтов в отличие от прямых методов (Костарев, 2007).

3.1 Оценка просадочности лёссовых грунтов косвенными методами

Чтобы предварительно исследовать грунты на просадочность, мы используем косвенные методы. В этих методах применяют так называемые косвенные показатели (критерии) и «визуальные показатели».

Визуальные показатели рассматривают такие признаки как:

Климат и рельеф территории. Самые большие мощности лёссовых пород достигают на водораздельных плато и высоких террасах. Если на участке присутствуют пласты лёссов, то на поверхности могут быть отчетливо видны характерные формы рельефа, которые появляются вследствие того, что происходит проседание грунта. Как правило, проседание протекает неравномерно и локально. К ним относятся степные блюдца, овраги, воронки, котловины ну и так далее.

Следующий признак это – глубина залегания грунтовых вод. Под эту категорию непосредственно попадают непросадочные лёссовые грунты с залеганием горизонта грунтовых вод на глубине 5 метров.

Минеральный и гранулометрический состав. Нужно подметить, что лёссовые породы обладают характерным гранулометрическим и минеральным составом. Для них, как правило, характерно содержание в образце более 50-80% пылеватых частиц, где преобладает крупная пыль размером 0,01-0,05 мм. Глинистые минералы в лёссах представлены каолинитом и гидрослюдой.

Мощность лёссовых пород. Если на участке мощность лёссовых пород менее 5 метров, то это может быть причиной классификации грунтов как непросадочные.

Внешний облик пород. Лёссы имеют характерный светло-палевый окрас и макропористость. В них присутствуют соляные включения, карбонаты, гипсы – всё это, как правило, содержится в виде конкреций

Косвенные показатели (критерии) – это расчётные показатели, к которым относятся:

- коэффициент пористости **e**;
- плотность скелета грунта **ρ_d** ;
- коэффициент водонасыщения **S_r** ;
- показатель просадочности **Π** ;
- коэффициент снижения структурной прочности при увлажнении **K_c** ;
- показатель макропористости **K_y** ;
- индекс просадочности **$I_{п}$** ;
- коэффициент дефицита влажности **K** .

Плотность скелета грунта рассчитывается по следующей формуле:

$\rho_d = \frac{\rho}{1+w}$, где ρ – естественная плотность грунта в г/см³, w – естественная влажность грунта в %. Чем грунт рыхлее, тем меньше плотность грунта. Такой грунт больше подвержен к явлениям просадки.

Основываясь на коэффициенте пористости и плотности скелета грунта, было предложено следующее разделение лёссовых грунтов: средней плотности – $e < 0,7$; $\rho_d > 1,6$ т/м³, рыхлые – e от 0,7 до 1,0; ρ_d от 1,35 до 1,6 т/м³, очень рыхлые – $e > 1,0$; $\rho_d < 1,35$ т/м³ (Крутов, 1998). Данная классификация говорит нам о том, что грунты, которые подходят под категорию средней плотности, будут непросадочными. Несмотря на другие физические характеристики и любые нагрузки. В свою очередь очень рыхлые грунты, всегда будут обладать просадочными свойствами с наибольшим показателем относительной просадочности. А вот категория рыхлых грунтов является промежуточной между двумя предыдущими. И именно поэтому просадочность грунтов данной категории будет зависеть от их влажности.

Коэффициент пористости: $e = \frac{\rho_s}{\rho_d} - 1$ или $e = \frac{n}{1-n}$, где ρ_s – плотность слагающих породу минеральных частиц, г/см³, ρ_d – плотность скелета грунта, г/см³, а n – пористость грунта в долях единицы. Поскольку одним из условий просадочности является высокая пористость и большой объём пор грунта, то по значению данного коэффициента можно судить о возможности просадки грунта. Таким образом, чем больше этот коэффициент, тем более просадочным может оказаться грунт.

Коэффициент водонасыщения пород S_r рассчитывается по формуле: $S_r = \frac{w \cdot \rho_s}{e \cdot \rho_w}$, где w – природная влажность грунта, ρ_s – плотность частиц грунта т/м³, ρ_w – плотность воды, принимаемая равной 1 т/м³, e – коэффициент пористости. Данный показатель

один из главных характеристик лёссовых грунтов. Если $S_r > 0,8$, грунты – просадочные. По данному показателю есть подробная классификация лёссовых грунтов, в которой грунты делятся на три группы: маловлажные – $S_r < 0,5$; влажные – S_r от 0,5 до 0,7; очень влажные – $S_r > 0,7$. Просадочными свойствами обладают маловлажные грунты. Очень влажные грунты являются по большей части непросадочными, потому что их структурные связи могут быть уже разрушены, а грунт уплотнён (Крутов, 1998).

На основе данных критериев, которые перечислены выше, составлена обобщённая таблица зависимости просадочности лёссовых пород от их коэффициента пористости, плотности и коэффициента водонасыщения, с делением грунтов на 5 основных категорий от непросадочных до чрезвычайно просадочных (таблица 1) (Крутов, 1998).

Таблица 1

Взаимосвязь просадочности лёссовых пород с их плотностью и коэффициентом водонасыщения (Крутов, 1998)

Разновидности грунтов по степени просадочности	Коэффициент пористости (плотность скелета грунта $\rho_d, \text{т/м}^3$)	Степень влажности S_r
Непросадочные «Условно просадочные»	1) $e \leq 0,7$ ($\rho_d \geq 1,6$)	1) $S_r > 0,5$
	2) $e > 0,7$ ($\rho_d < 1,6$)	2) $S_r \geq 0,8$
	3) $e < 0,7$ ($\rho_d > 1,6$)	3) $S_r < 0,5$
	4) $0,7 < e \leq 0,8$ ($1,6 > \rho_d \geq 1,5$)	4) $0,5 < S_r \leq 0,7$
Слабопросадочные	1) $0,7 \leq e \leq 0,8$ ($1,6 > \rho_d \geq 1,5$)	1) $S_r < 0,7$
	2) $e > 0,8$ ($\rho_d \leq 1,5$)	2) $S_r > 0,7$
Среднепросадочные	1) $0,8 < e < 0,9$ ($1,5 > \rho_d \geq 1,4$)	1) $S_r < 0,5$
	2) $e > 0,9$ ($\rho_d < 1,4$)	2) $S_r > 0,5$
Сильнопросадочные	1) $0,9 < e \leq 1,05$ ($1,4 > \rho_d \geq 1,3$)	1) $S_r < 0,3$
	2) $e > 1,5$ ($\rho_d < 1,3$)	2) $S_r > 0,3$
Чрезвычайно просадочные	$e > 1,05$ ($\rho_d < 1,3$)	$S_r < 0,3$

Показатель просадочности П - характеризует естественную недоуплотнённость лёссовых пород. Его можно рассчитать по следующей формуле: $\Pi = \frac{e_L - e}{1 + e}$, где e – коэффициент пористости грунта природного сложения и влажности, e_L – коэффициент пористости, соответствующий влажности на границе текучести (W_L). $e_L = W_L * \frac{\rho_s}{\rho_w}$, где ρ_s – плотность твёрдых (минеральных) частиц грунта, ρ_w – плотность воды, принимаемая равной 1. Благодаря показателю просадочности и числу пластичности (I_p ,

%) можно выделить породы, которые будут обладать просадочными свойствами. К просадочным относятся грунты с сочетанием следующих характеристик: $\Pi < 0,1$ при I_p от 1 до 10; $\Pi < 0,17$ при I_p от 10 до 17; $\Pi < 0,24$ при I_p от 14 до 22 (Трофимов, 1999).

Показатель макропористости Н.Я. Денисова рассчитывается по формуле:

$$K_y = \frac{e_L}{e},$$

где e – коэффициент пористости грунта природного сложения и влажности,

e_L – коэффициент пористости, соответствующий влажности на границе текучести. Если $K_y < 1$, то грунты считаются просадочными. Разницу между коэффициентами пористости грунта естественной влажности и на границе текучести $e - e_L$ есть макропористость, при её наличии лёсс склонен к просадке (Денисов, 1946).

Показатель уплотнённости В.А. Приклонского можно рассчитывать по следующей формуле: $K_d = \frac{e_L - e}{e_L - e_p}$, где e_p - коэффициент пористости при влажности на пределе пластичности (W_p):

$$e_p = W_p * \frac{\rho_s}{\rho_w}.$$

По данной характеристике K_d породы разделяются:

1. на нормально уплотнённые при $K_d = 0$;
2. недоуплотнённые (просадочные) при $K_d < 0$;
3. переуплотнённые при $K_d > 0$ (Иванов, 2001).

Индекс просадочности I_n (по И.П. Иванову). Данный критерий зависит от влажности и пористости грунта. Его можно рассчитать: $I_n = \frac{w}{0,64 \frac{n-0,28}{1-n}}$ или

$$I_n = \frac{1,56 w * (1-n)}{n-0,28},$$

где w – естественная влажность, а n – пористость грунта при

естественной влажности. Благодаря многочисленным исследованиям, было выявлено, что если значение индекса просадочности $I_n < 1$, то грунты просадочные, а если $I_n \geq 1$ – непросадочные (Иванов, 1958).

Коэффициент дефицита влажности K . Данный показатель был предложен А.К. Ларионовым. Он также основывается на пористости и объёмной влажности. Его можно по следующей формуле: $K = \frac{W_0}{n - W_0}$. Если коэффициент дефицита влажности $K > 1,1$ –

1,2 – то грунты непросадочные (Иванов, 2001).

Классификация, которая представлена в данной таблице, даёт нам наиболее точное представление о просадочности лёссовых пород.

Сводная таблица характеристик, необходимых для вычисления косвенных показателей

Косвенный показатель	Необходимые физические и механические характеристики	Принцип классификации	Отличительная особенность показателя
Коэффициент пористости e и плотность скелета грунта ρ_d	$e (\rho_s, \rho, w)$; $\rho_d (\rho, w)$	средней плотности – $e < 0,7$; $\rho_d > 1,6 \text{ т/м}^3$, рыхлые – e от 0,7 до 1,0; ρ_d от 1,35 до 1,6 т/м^3 , очень рыхлые – $e > 1,0$; $\rho_d < 1,35 \text{ т/м}^3$.	Классификация основана на выделенных ранее характерных для просадочных грунтов физических показателях, и использовании их в совокупности для определения склонности грунта к просадочности. То есть, определения, насколько представленный грунт близок по этим показателям к эталонному просадочному образцу.
Коэффициент водонасыщения пород S_r	$S_r (w, \rho_s, \rho, \rho_w)$	маловлажные – $S_r < 0,5$ влажные – S_r от 0,5 до 0,7 очень лажные – $S_r > 0,7$	
Коэффициент пористости e , плотность скелета грунта ρ_d и коэффициент водонасыщения пород S_r	$e (\rho_s, \rho, w)$; $\rho_d (\rho, w)$; $S_r (w, \rho_s, \rho, \rho_w)$	См. таблицу 1	
Показатель просадочности Π	$e (\rho_s, \rho, w)$; $e_L (W_L, \rho_s, \rho, \rho_w)$	Грунты просадочны при: $\Pi < 0,1$ при I_p от 1 до 10, $\Pi < 0,17$ при I_p от 10 до 14 $\Pi < 0,24$ при I_p от 14 до 22	Данный показатель характеризует естественную недоуплотнённость лёссовых пород. Для классификации также необходимо значение числа пластичности.
Показатель макропористости K_y Н.Я. Денисова		Грунт просадочен при $K_y < 1$	Основывается на отношении коэффициента пористости при влажности на пределе текучести к коэффициенту пористости при естественной влажности грунта. То есть, грунт считается просадочным при $e > e_L$.
Показатель уплотнённости K_d В.А. Приклонского	$e (\rho_s, \rho, w)$; $e_L (W_L, \rho_s, \rho, \rho_w)$ $e_p (W_p, \rho_s, \rho, \rho_w)$	$K_d < 0$ – недоуплотнённый (просадочный) грунт, $K_d = 0$ – начальной степени уплотнения, $0 < K_d < 1$ – соответствует пластичному состоянию, $K_d = 1$ – переходит в полутвёрдое состояние, $K_d > 1$ – переуплотнённый, полутвёрдый.	Классификация построена на взаимоотношении величин коэффициентов пористостей при природной влажности, влажности на границе текучести и границе раскатывания. Показатель Приклонского по формуле напоминает показатель просадочности Π , но отличается использованием коэффициента пористости при влажности на пределе пластичности.
Индекс просадочности I_{Π}	w ; $n (\rho_s, \rho, w)$	Грунт просадочен при $I_{\Pi} < 1$	Представляет собой зависимость с участием множества коэффициентов, полученных в ходе многочисленных лабораторных испытаний
Коэффициент дефицита влажности K	$W_0 (\rho, w)$; $n (\rho_s, \rho, w)$	Грунт просадочен при $K < 1,1 - 1,2$	Представляет собой отношение процента содержания влаги в порах к заполняющим их газам. Таким образом, если влаги в порах грунта меньше чем воздуха и других газов, грунт считается просадочным.

3.2. Оценка просадочности лёссовых грунтов прямыми методами

Путём лабораторных и полевых экспериментальных испытаний, мы можем определить просадочность грунтов прямыми методами. По полученным данным устанавливается тип грунтовых условий, то есть степень опасности просадочных явлений для данного грунта и конечно комплекс мероприятий, которые мы можем применить, чтобы не допустить просадку.

Лёссовидные грунты относятся к просадочным грунтам, если величина относительной просадочности $\varepsilon_{sl} > 0,01$.

3.2.1. Применение лабораторных методов испытания грунтов

Для того чтобы оценить просадочность грунтов в лабораторных условиях, испытания проводят на специальных компрессионных приборах. В процессе испытаний образцов грунта ненарушенного сложения, мы получаем относительную деформацию. По этим результатам определяется характеристики просадочности грунта. Испытания проводятся на образцах грунта с замачиванием их водой, при давлении, последовательно увеличиваемом ступенями.

В компрессионных приборах можно проводить испытания на просадочных грунтах по следующим схемам:

1. «одной кривой» - для определения относительной просадочности ε_{sl} при одном заданном значении давления;
2. «двух кривых» - для определения относительной просадочности ε_{sl} при различных давлениях, а также начального просадочного давления p_{sl} .

Компрессионные приборы, которые применяют для испытаний просадочных грунтов, состоят из следующих деталей: поддона с емкостью для воды и перфорированной крышкой; цилиндрической обоймы; рабочего кольца с диаметром $d = 70 - 90$ мм и высотой h от 20 до 30 мм (при соотношении $d/h \geq 3$); перфорированного штампа; двух индикаторов с ценой деления шкалы 0,01 мм для измерений вертикальных деформаций образца грунта, и механизма вертикальной нагрузки образца. Они установлены на специальной станине. Модификации приборов могут быть различными, но испытания в них основаны на одном и том же принципе: исследование изменения пористости при замачивании грунтов под влиянием прикладываемой нагрузки.

Испытания заключаются в следующем:

В рабочее кольцо определённого диаметра и высоты помещают образец грунта, предварительно определив его влажность и плотность. Через специальное устройство прикладывают ступенями нагрузку, и по индикаторам, установленным с двух сторон кольца, определяют изменения высоты образца. Учитывая, что просадочность проявляется только в случае взаимодействия с водой, в процессе опыта осуществляют подачу воды к образцу снизу. В определённый момент под воздействием нагрузки и происходит резкое уменьшение высоты образца, которое фиксируется индикаторами.

Таким образом, в процессе опыта, мы получаем значения изменения высоты образца грунта h_0 в зависимости от прикладываемой нагрузки. Вычислить её мы можем как разность между начальной высотой образца h_n (высота рабочего кольца) и Δh_e – абсолютным сжатием грунта с природной влажностью при природном давлении: $h_0 = h_n - \Delta h_e$.

Производим расчёт значений коэффициента пористости при каждой ступени нагрузки по изменению высоты образца в процессе его уплотнения по следующей формуле: $\Delta e = \frac{\Delta h_i}{h_n} * (1 + e_1)$, где e_1 – коэффициент пористости при бытовой нагрузке; $e_1 = e_0 - \frac{\Delta h_i}{h_0} * (1 + e_0)$; Δh_i – изменение высоты образца породы при изменении её пористости от e_1 до e_2 при увеличении нагрузки от δ_{zg} до δ_{zg1} ;

Получаем величины осадки и просадки образца грунта S (или Δh_i) в мм с точностью 0,01. Эта величина вычисляется как средние арифметические значения показаний индикаторов.

По величинам относительного сжатия образцов ε_i следует строить график зависимости $\varepsilon = f(p)$ с отображением просадочных деформаций;

Относительную просадочность грунта ε_{sl} при заданном давлении P_3 при испытаниях по схеме «одной кривой» следует определять как дополнительное относительное сжатие образца грунта в результате замачивания по формуле:

$$\varepsilon_{sl} = \frac{\Delta h_{sl}}{h_0} = \frac{h' - h_{sat.p}}{h_0};$$

где Δh_{sl} – дополнительное сжатие (просадка) грунта в результате замачивания; h' – высота образца грунта с природной влажностью при заданном давлении; $h_{sat.p}$ – высота образца грунта после дополнительного сжатия (просадки) в результате замачивания;

Величины относительного сжатия образцов грунта ε_i с точностью 0,001 при соответствующих значениях давления p_i и условно стабилизированных деформациях по формуле: $\varepsilon_i = \frac{\Delta h_i - r}{h_0}$, где r – поправка на упругую деформацию по данным тарировки;

Начальное просадочное давление p_{sl} определяют по графику зависимости относительной просадочности от давления $\varepsilon_{sl} = f(p)$, принимая за величину p_{sl} то давление, при котором относительная просадочность составляет 0,01 Мпа;

Величину бытового давления грунта $\delta_{zg} = 0,01\rho_s \cdot H$, где H – глубина, м; ρ_v – объёмный вес водонасыщенного грунта. $\rho_v = n + \rho_d$, где n – пористость в долях единицы, ρ_d – плотность скелета грунта;

Результаты определения относительной просадочности выражают с точностью 0,001, начального просадочного давления — с точностью 0,1 кгс/см² и регистрируют в журнале испытаний с указанием наименования вида грунта и значений его физических характеристик;

Коэффициент относительной сжимаемости a_0 – величина сжатия в миллиметрах слоя грунта мощностью в 1 метр под данной нагрузкой, мм / м, вычисляется по формуле: $a_0 = \frac{\Delta h_s}{h_n} * 100$;

Модуль общей деформации пород E_0 , МПа, мы можем вычислить по формуле:

$$E_0 = \frac{[\beta \cdot (1 + e_1)]}{a},$$

где e_1 – коэффициент пористости при бытовой нагрузке; a – коэффициент сжимаемости см²/кгс, определяемый по формуле $a = \frac{(e_1 - e_2)}{(\delta_{zg2} - \delta_{zg})}$, e_2 – коэффициент пористости при давлении, превышающем бытовое δ_{zg2} ; β – множитель для перехода от сжатия без возможности бокового расширения при компрессионных испытаниях, к сжатию, имеющему место в природных условиях. В соответствии с нормативными документами, он составляет: для супесей – 0,74, для суглинков – 0,62, для глин – 0,40.

3.2.2. Применение полевых методов испытания грунтов

Наиболее распространенным методом определения просадочности грунтов является испытание опытными штампами.

По этой схеме на опытный штамп постепенно создаётся нагрузка, равная давлению от сооружения. После того как происходит стабилизация деформации производят замачивание, которая вызывает просадку грунта при достигнутой нагрузке. Нагрузку на штамп увеличивают ступенями до заданного давления. Его устанавливают

с учетом предполагаемого фактического давления на грунт в основании фундамента, которое равно сумме давлений от нагрузки фундамента и собственного веса грунта в водонасыщенном состоянии. После того, как была достигнута условная стабилизация осадки, на последней ступени, которая соответствует заданному давлению, грунт в основании штампа замачивают, при этом продолжается замачивание с измерениями просадки грунта до ее условной стабилизации. Критерий условной стабилизации просадки грунта принимают за скорость осадки штампа, которая не превышает 0,1 мм за два часа. Согласно ГОСТу 20276-2012. «Грунты. Методы полевого определения характеристик прочности и деформируемости.» (Взамен ГОСТ 20276-99).

На основании результатов полевых и лабораторных испытаний грунтов на просадочность, рассчитывается величина просадки лёссовой толщи, находящейся под давлением собственного веса в предположении её подтопления или затопления. Расчёт просадки проводится по формуле:

$$S_{sl} = \sum_{i=1}^n \varepsilon_{sl_i} * h_i * k_{sl_i},$$

где ε_{sl_i} – относительная просадочность i -го слоя при соответствующих значениях давления в i -м слое, определяется по графику $\varepsilon_{sl} = f(p)$ для давлений от собственного веса, действующего в середине расчётного слоя мощностью h_i ; h_i – мощность i -го слоя; k_{sl_i} – нормативный коэффициент = 1; n – число слоёв в просадочной толще. Расчётные слои выделяются в той части лёссовой толщи, где $p_i > p_{sl}$.

В соответствии с нормативными документами СП 22.13330.2011. Свод правил. Основания зданий и сооружений. (Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83*).27, лёссовые толщи можно поделить по величине просадки от собственного веса на два типа:

- В типе I, просадка, как правило, происходит в основном в пределах деформируемой зоны основания от нагрузки фундаментов или другой внешней нагрузки. Просадка от собственного веса грунта - отсутствует или не превышает 5 см;
- В типе II возможна просадка грунта от собственного веса. Она происходит преимущественно в нижней части просадочной толщи и превышает 5 см.

Глава 4. Результаты оценки склонности грунтов к просадочным явлениям различными методами

4.1 Оценка просадочности грунтов прямыми методами по результатам лабораторных испытаний

При оценке просадочности грунтов прямыми методами были использованы данные, полученные в результате испытаний, которые производились в лабораториях «ООО Нефтегазеодезия», и КДС «Групп», где я проходила практику.

В лабораториях производились испытания на образцах, доставляемых с определённых объектов. При этом указывались: название объекта, номера скважин, из которых были отобраны образцы и глубина отбора образцов. Таким образом, в работе исследовались образцы с участка 1 (Ростовская область), с участка 2 (Оренбургская область).

Для исследуемых грунтов определялись гранулометрический состав, физические и механические свойства.

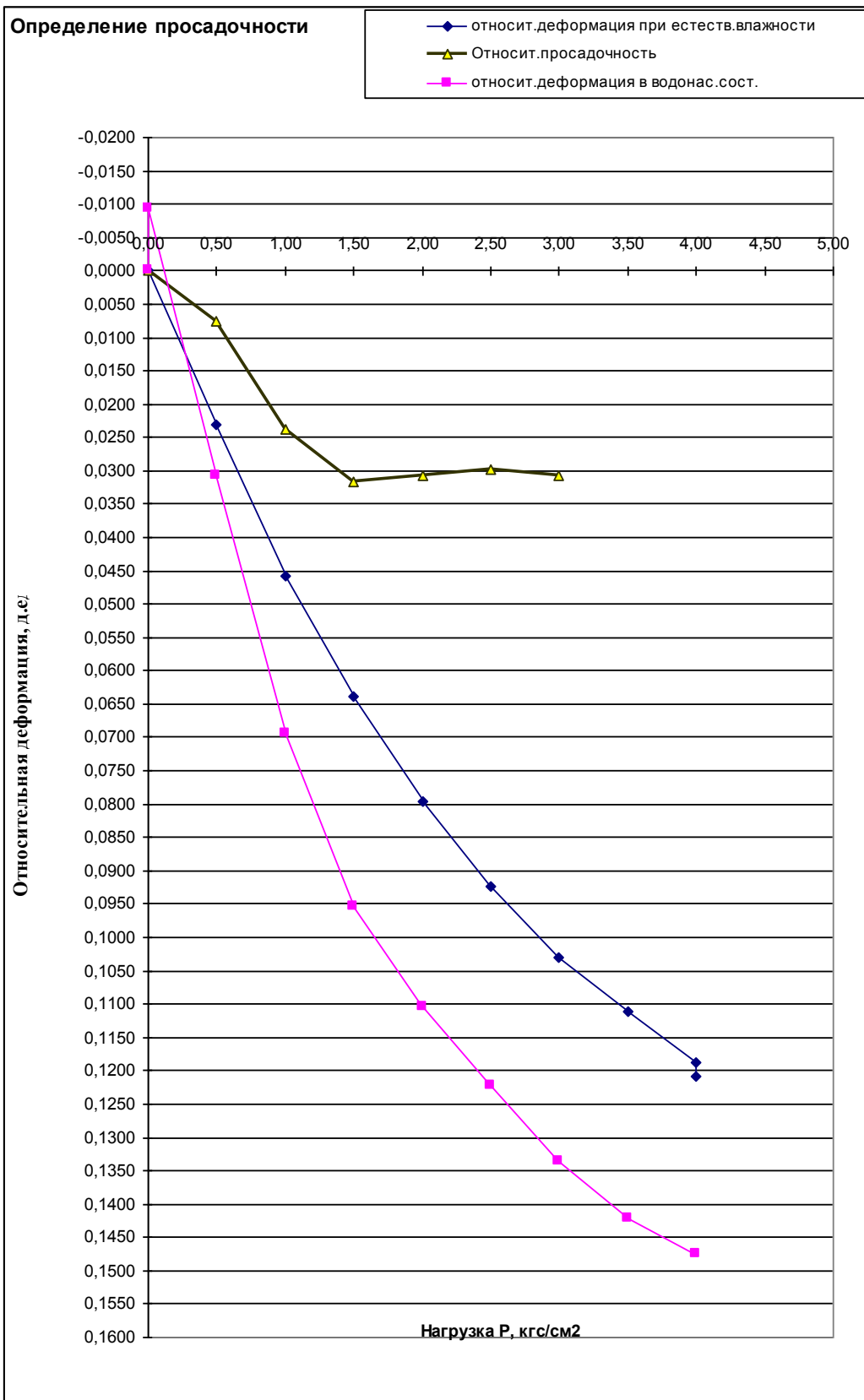
Результаты определения просадочности прямыми методами на компрессионных приборах показали следующее.

Участок 1.

Лёссовые грунты участка 1 были классифицированы по гранулометрическому составу, как суглинки тяжёлые пылеватые (ГОСТ 12536-2014 «Грунты. Методы лабораторного гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава»). Результаты исследований физических свойств грунтов, определяемые в соответствии с ГОСТ 5180-84, приведены в таблице 3 и 5.

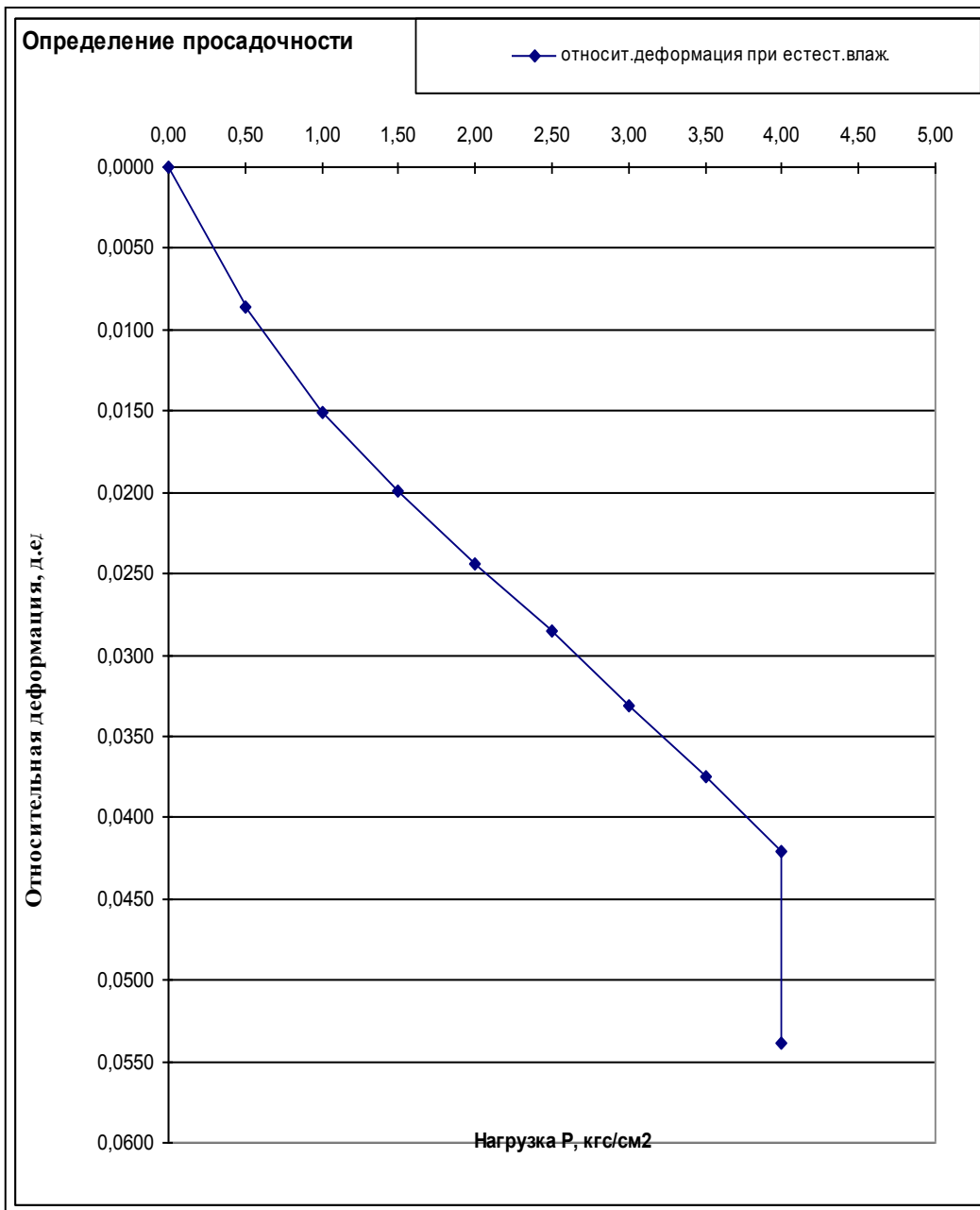
При лабораторных исследованиях монолитов, была выявлена просадочность: все исследуемые суглинки в условиях замачивания при нагрузках обладают просадочными свойствами.

На графиках в качестве примера приведены некоторые результаты определения просадочности грунтов участка 1.



Величина относит. просадочности, д.ед	0,029
---------------------------------------	--------------

Рисунок 2. Образец скв. 3, глубина отбора 3 метра.



Величина относит.просадочности, д.ед	0,012
--------------------------------------	--------------

Рисунок 3. Образец скв. 7, глубина отбора 8 метров.

Участок 2.

Лёссовые грунты участка 2 были классифицированы по гранулометрическому составу, также как и на участке 1, как суглинки тяжёлые пылеватые (ГОСТ 12536-2014 «Грунты. Методы лабораторного гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава»). Результаты исследований физических свойств грунтов, определяемые в соответствии с ГОСТ 5180-84, приведены в таблице 4 и 6.

При лабораторных исследованиях монолитов, просадочность не была выявлена: все исследуемые суглинки в условиях замачивания при нагрузках не обладали просадочными свойствами, в связи с чем возник вопрос о возможности их загрязнения каким-либо технологическими или бытовыми сточными водами, так как именно таким образом ведут лёссовые грунты при техногенном загрязнении (Левченко, 2010).

На графиках в качестве примера приведены некоторые результаты определения просадочности грунтов участка 2

Результаты определения типа грунтов по просадочности

Глубина отбора образца, м		Природное движение, Р ₀ Мпа	Относительная просадочность, δ
1,2	1,6	0,027	
2,2	2,5	0,045	-0,0022
3,1	3,4	0,055	-0,0023
4,2	4,5	0,066	-0,0020
5,5	5,8	0,116	-0,0006
6,8	7,1	0,141	0,0000
8,2	8,5	0,174	0,0002
9,0	9,3	0,192	-
10,2	10,5	0,217	0,0015
13,8	14,3	0,253	-
16,5	16,8	0,353	-
18,6	19,1	0,395	-
20,0	20,3	0,414	-
21,3	21,5	0,428	0,0161

Среднее значение относительной просадочности	-
Мощность просадочного слоя, м	-
Величина просадки, см	-
Тип просадочности	-

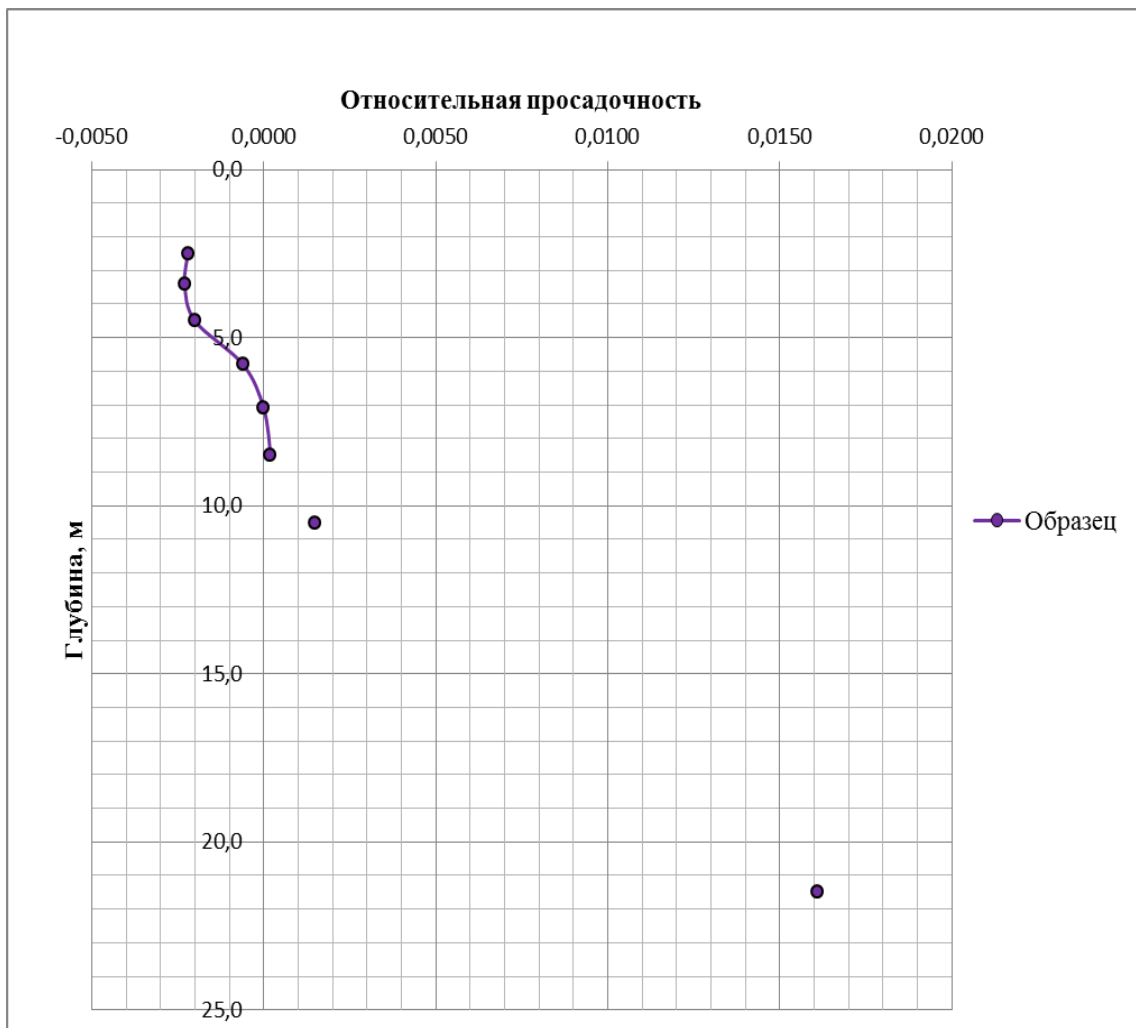


Рисунок 4. График, характеризующий отсутствие просадочности исследуемых лёссовых грунтов на участке № 2

Результаты определения типа грунтов по просадочности

Глубина отбора образца, м		Природное движение, Р _о , Мпа	Относительная просадочность, δ
2,5	2,7	0,052	-0,0006
3,7	4	0,080	-0,0016
5,5	5,8	0,113	0,0017
7,7	8	0,160	0,0035
11,2	11,5	0,232	-
14,7	15	0,304	-
16,8	17,1	0,307	-
19,8	20	0,414	-
22,7	23	0,481	-

Среднее значение относительной просадочности	-
Мощность просадочного слоя, м	-
Величина просадки, см	-
Тип просадочности	-

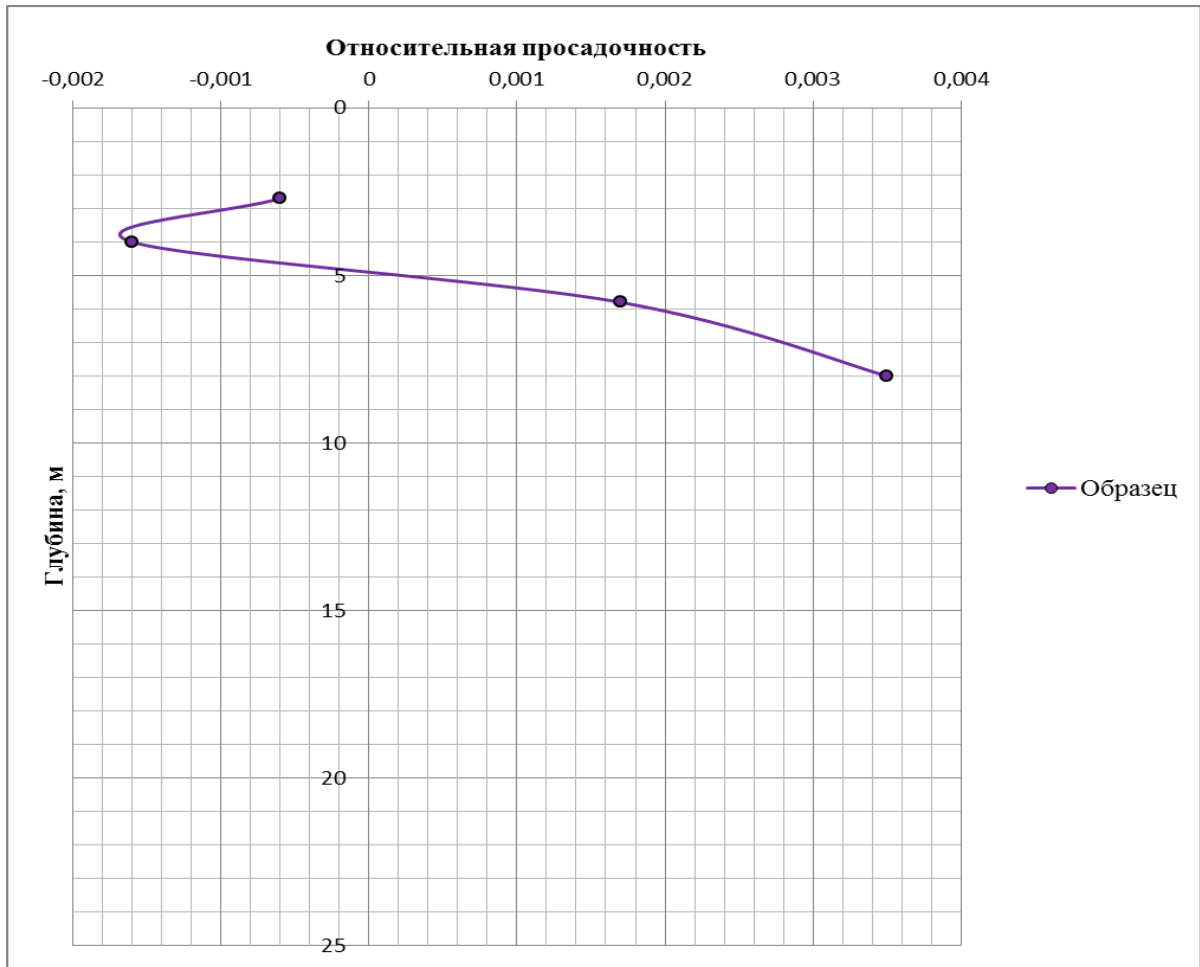


Рисунок 5. График, характеризующий отсутствие просадочности исследуемых лёссовых грунтов на участке № 2

4.2 Оценка склонности грунтов к просадочным явлениям по косвенным признакам

Как уже говорилось ранее, в главе 3.1, косвенные показатели для оценки потенциальной просадочности лёссовых грунтов учитывают их физическое состояние. Результаты исследования физических свойств мне были предоставлены, по которым мною была произведена оценка склонности грунтов к просадочным явлениям по косвенным признакам.

Участок 1

Лёссовые грунты участка 1 были классифицированы по гранулометрическому составу как суглинки. В таблице № 5 показаны характеристики физических свойств лёссовых грунтов участка № 1. Данные показатели были использованы для расчёта косвенных критериев (показателей). Результаты расчётов представлены в приложении 1 и на рисунках 9,10.

Таблица 5

Значения физических характеристик лёссовых грунтов участка № 1

№ Сква.	Глубина отбора образца	W	p	Sr	W _p	W _L	I _p	I _L	n	e
2	2,0	24,0	1,9	0,8	23,0	39,5	16,5	0,1	43,8	0,8
1	2,5	17,0	1,8	0,6	22,6	36,7	14,1	0,4	42,7	0,7
3	3,0	23,0	1,9	0,8	22,2	38,0	15,8	0,1	44,7	0,8
4	4,0	25,0	2,0	1,0	21,8	37,8	16,0	0,2	41,4	0,7
5	5,0	22,5	1,8	0,8	21,3	37,0	15,7	0,1	47,0	0,9
6-II	6,5	25,5	2,0	1,0	25,0	46,0	21,0	0,0	42,1	0,7
7	8,0	22,0	2,0	0,9	20,5	36,0	15,5	0,1	41,4	0,7
8	9,0	14,5	2,1	0,8	15,3	26,0	10,7	-0,1	32,3	0,5

Также мною было проанализировано изменение физико-механических свойств лёссовых грунтов участка номер один с глубиной. Для наглядности были построены графики, которые нам демонстрируют изменение свойств (рисунок б).

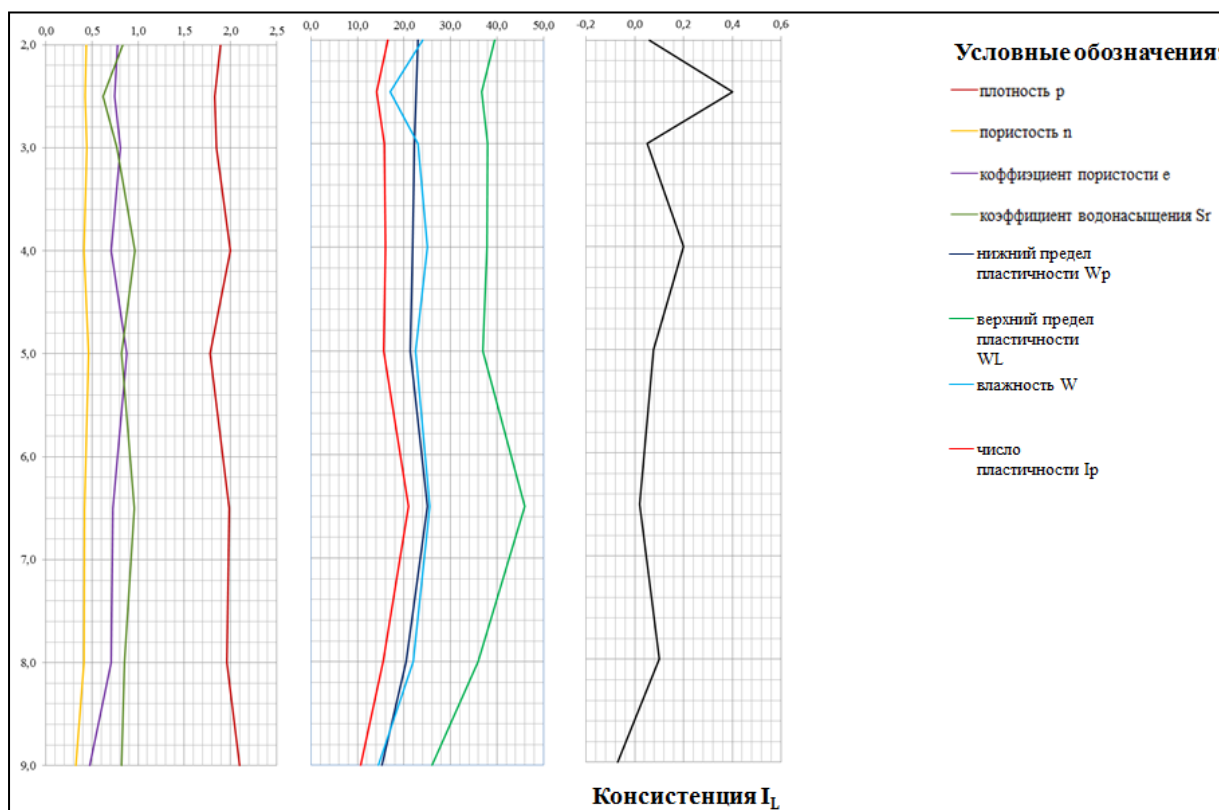


Рисунок 6. График изменения физико-механических свойств лёссовых грунтов с глубиной на участке № 1

В целом, на данных графиках характерно понижение влажности W , пределов пластичности W_p и W_L , числа пластичности I_p и консистенции I_L с глубиной. На глубине 2,5 м в скважине №1 мы можем наблюдать понижение влажности W и коэффициента водонасыщения S_r . А вот I_L наоборот, резко увеличивается на глубине 2,5 м в скважине № 1, что естественно, так как видна зависимость с влажностью W (она повышается). Плотность ρ увеличивается постепенно с глубиной. Небольшие колебания возможно связаны с тем, что в грунте присутствуют органические вещества. Значения пористости n и коэффициента пористости e - с глубиной почти не изменяются, но мы можем наблюдать понижение коэффициента пористости e на глубине 8 метров. Изменение общей тенденции в поведении отдельных показателей на графиках объясняются неоднородностью слоёв – возможным наличием в них включений гнёзд и стяжений карбонатов, или наличием погребенных почвенных горизонтов.

Участок 2

В таблице № 6 представлены характеристики физических свойств лёссовых грунтов участка № 2. Полученные результаты были использованы для расчёта косвенных критериев, которые представлены в приложении 2 и на рисунках 9,11.

Таблица 6

Значения физических характеристик лёссовых грунтов участка № 2

№ Скв.	Глубина отбора образца	W	W _L	W _p	I _p	I _L	p	e	Sr	n
17	1,5	21,1	36,4	22,9	13,5	0,13	2,1	0,6	1,0	37,6
14	5,5	22,5	40,5	23,8	16,7	-0,08	1,8	0,9	0,7	48,3
35	6,2	20,1	41,1	25,2	15,9	-0,32	1,9	0,7	0,7	42,2
11	8,0	18,0	40,1	23,5	16,6	-0,33	1,9	0,7	0,7	39,5
36	12,9	20,9	43,6	29,2	14,4	-0,58	1,9	0,8	0,8	42,2
24	14,0	15,9	37,6	21,2	16,4	-0,32	2,0	0,6	0,7	36,9
31	17,8	19,8	40,3	23,5	16,8	-0,22	1,9	0,7	0,8	40,8
31-а	19,0	19,4	39,6	23,2	16,4	-0,23	1,9	0,7	0,7	42,3
36-а	21,9	20,0	34,0	18,8	15,2	0,08	2,0	0,7	0,8	40,8
12	4,6	21,5	40,0	21,3	18,7	0,01	1,9	0,7	0,8	42,3
14	6,0	21,8	41,4	24,3	17,1	-0,15	1,8	0,9	0,7	46,9
16	13,3	16,7	37,9	22,6	15,3	-0,39	2,0	0,6	0,7	38,2
34-а	15,4	23,9	44,1	24,7	19,4	-0,04	1,8	0,8	0,8	45,4
36-б	17,2	23,1	46,8	25,9	20,9	-0,13	1,8	0,9	0,7	46,5
36-в	18,9	26,0	44,2	25,3	18,9	0,04	1,9	0,8	0,9	44,2
34	27,0	20,0	39,2	20,7	18,5	-0,04	2,0	0,7	0,8	40,2

Так же по данным таблицы № 6 были построены графики изменения физико-механических свойств лёссовых грунтов с глубиной на участке № 2 (рисунок 7,8).

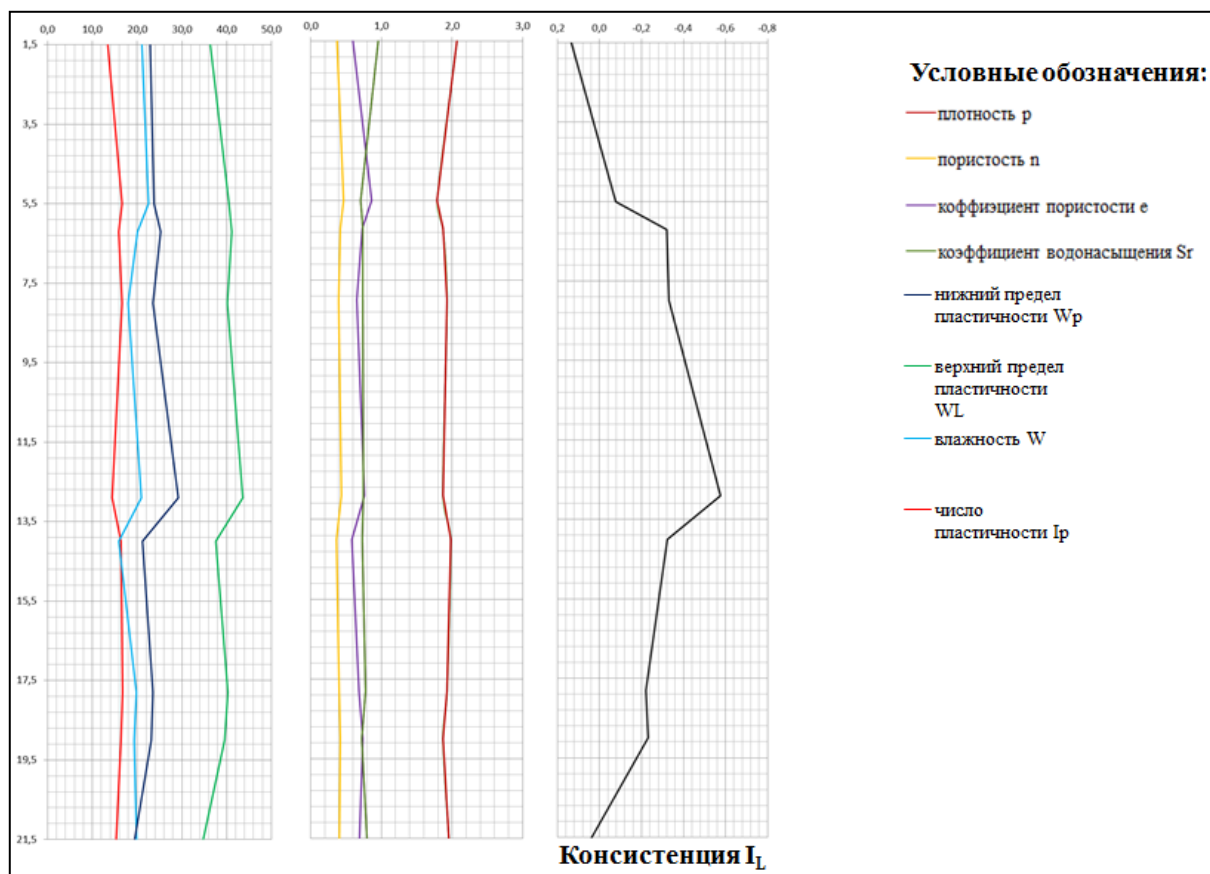


Рисунок 7. График изменения физико-механических свойств лёссовых грунтов с глубиной на участке № 2

Графики всех скважин в целом имеют тенденцию к общему уменьшению с глубиной влажности W , коэффициента водонасыщения S_r , пределов пластичности W_p и W_L , числа пластичности I_p и консистенции I_L ; уменьшению пористости n и коэффициента пористости e . Более подробно рассмотрев каждый показатель, можно наблюдать некоторые зависимости. Например, при уменьшении влажности W (на графике представлен голубым цветом) на глубинах 6,2 м, 8,0 м, мы можем увидеть рост показателя консистенции I_L . А при увеличении влажности W на глубинах 12,9 м, 17,8 м, 21,9 м, показатель консистенции I_L - уменьшается. На глубине 12,9 м, в скважине № 36, мы наблюдаем рост влажности W и рост консистенции I_L , что по не естественно. Для графиков всех скважин характерно наличие редких, но крупных «аномалий», связанных, по-видимому, с неоднородностью грунта.

Так же мы можем наблюдать, как изменяется плотность ρ и коэффициент пористости e . С увеличением глубины четко прослеживается некая зависимость данных показателей. На глубинах 5,5 м, 12,9 м, 17,9 м - плотность ρ уменьшается, а коэффициент пористости e растет. И, наоборот, на глубинах 6,2 м, 14,0 м, 21,9 м показатель плотности ρ растет, коэффициент пористости e уменьшается.

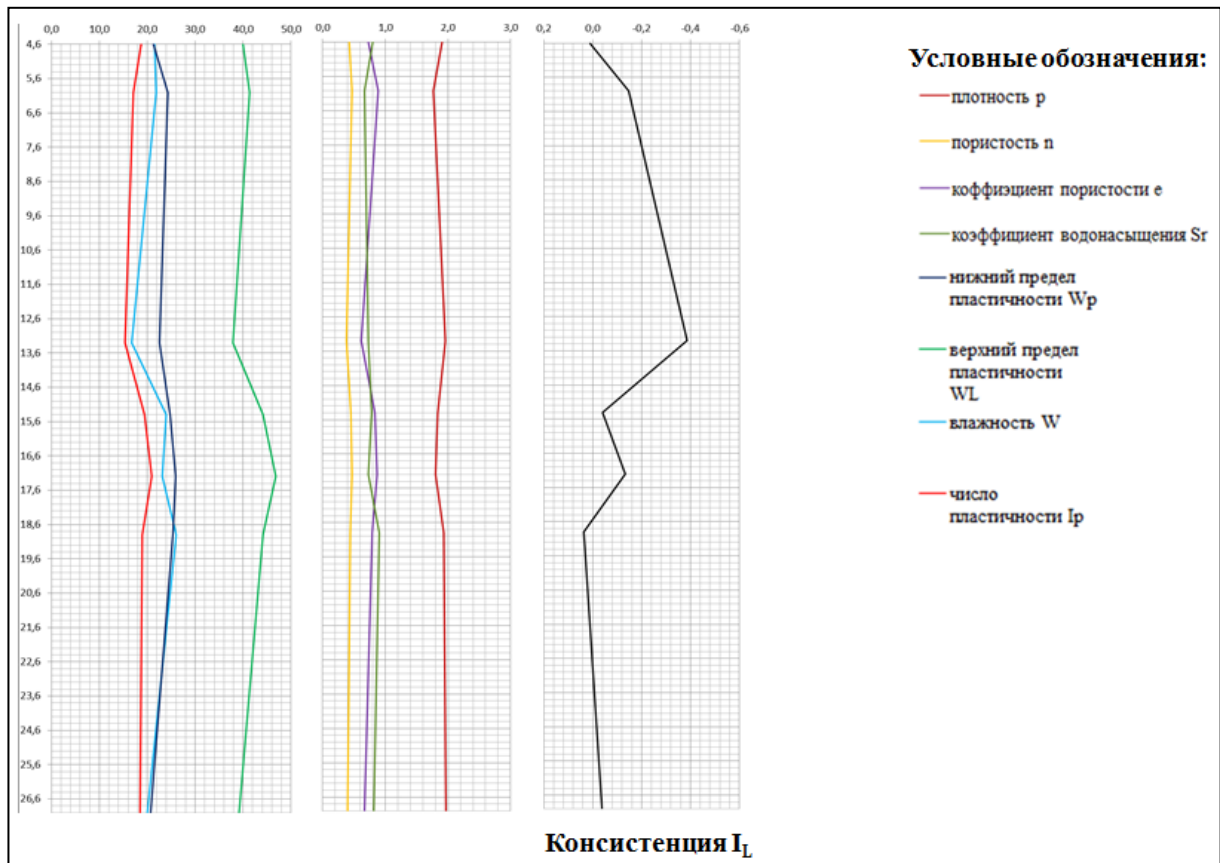


Рисунок 8. График изменения физико-механических свойств лёссовых грунтов с глубиной на участке № 2

Данный график, так же приурочен к участку № 2. И мы можем наблюдать некоторую схожесть с графиками на рисунке 7. В целом графики имеют тенденцию к общему уменьшению с глубиной влажности W , коэффициента водонасыщения S_r , пределов пластичности W_p и W_L , числа пластичности I_p . Почти не изменяется пористость n . А вот показатель плотности ρ и коэффициент пористости e имеют зависимость. В скважинах № 14, 34-а на глубинах 6,0 м и 15,4 м соответственно, показатель плотности ρ уменьшается. Тогда как коэффициент пористости увеличивается. На глубинах от 12,6 м до 19,6 м, мы наблюдаем «аномальные», резкие скачки показателей. Но в то же время они логичны. Например: показатель консистенции I_L увеличивается на глубинах 6,0 м, 12,9 м, 15,4 м и 27,0 м. Это можно объяснить тем, что на тех же глубинах, показатель влажности W – уменьшается. Изменение общей тенденции в поведении отдельных показателей на графиках можно объяснить неоднородностью слоёв – возможным наличием в них различных включений.

Косвенные показатели (критерии) – это расчётные показатели, к которым относятся: коэффициент пористости e ; плотность скелета грунта ρ_d ; коэффициент водонасыщения S_r ; показатель просадочности Π ; коэффициент снижения структурной

прочности при увлажнении K_c ; показатель макропористости K_y ; индекс просадочности I_n ; коэффициент дефицита влажности K .

Значения этих показателей, характеризующие просадочность грунтов, приведены в приложении 1 и 2.

Коэффициент водонасыщения пород S_r был определен на участке 1 как: 3 образца непросадочные грунты, 5 образцов – просадочные. На участке № 2: пять образцов были охарактеризованы как просадочные, одиннадцать - непросадочные

Показатель макропористости K_y Н.Я. Денисова. При определении охарактеризовал все грунты (24 образца) на двух участках как непросадочные.

Показатель уплотнённости K_d В.А. Приклонского по классификации все 24 образца на обоих участках были охарактеризованы как просадочные.

Показатель просадочности I охарактеризовал на первом участке 7 грунтов из 8 как просадочные и 1 непросадочный. На участке № 2: 11 образцов – непросадочные, 5 – просадочные.

Индекс просадочности I_n . Данный показатель был определен на двух участках как просадочный (все 24 образца).

Коэффициент дефицита влажности K на первом участке был охарактеризован у 4 образцов как просадочные грунты, и следовательно 4 – непросадочные. На участке номер два из 16 образцов, только 3 образца были охарактеризованы как непросадочные, все остальные 13 образцов – просадочные.

Коэффициент пористости e , плотность скелета грунта ρ_d и коэффициент водонасыщения пород S_r (по Крутову В.И.) Данная классификация на разных площадках, давала совершенно разные результаты. На первой площадке 5 образца из 8 – непросадочные, три образца – слабопросадочные. На участке номер два из 16 образцов только 3 образца мной были охарактеризованы как слабопросадочные грунты, соответственно 13 образцов – непросадочные.

Проанализировав полученные данные на всех площадках, мы можем дать общую оценку склонности грунтов к просадочности по косвенным показателям. Общая оценка приведена на рисунке 9.

На основании выше сказанного были выделены косвенные критерии, которые на участке № 1 и № 2 в наибольшем количестве охарактеризовали исследуемые грунты как просадочные: показатель уплотнённости K_d , индекс просадочности I_p , коэффициент дефицита влажности K . Другие показатели были верны лишь для участка 1 или участка 2.



Рисунок 9. Общая оценка склонности грунтов к просадочным явлениям по косвенным показателям на исследуемых участках



Рисунок 10. Оценка склонности грунтов к просадочным явлениям по косвенным показателям на участке № 1



Рисунок 11. Оценка склонности грунтов к просадочным явлениям по косвенным показателям на участке № 2

Анализируя возможность использование различных косвенных показателей просадочности, Иванов И.П. в своей работе отмечает их недостатки и указывает на допущении ошибок, что изложено ниже.

Используя общие признаки внешнего облика лессовых пород, а также их физические свойства не могут служить определителем просадочности данной породы. Указание на то, что посадочными являются те разновидности, у которых пористость выше 45%, не подтверждается нашими исследованиями. Как показано ниже, просадочные могут быть такие породы, у которых пористость составляет 38-40%, а непросадочными - с пористостью 50% и более. Точно также, предел естественной влажности - 15%, не может являться границей раздела между посадочными и непросадочными породами.

Данное утверждение основано на большом количестве определений лессовых пород средней Азии Сибири.

Также Ивановым И.П. рассмотрены возможности следующих показателей для оценки просадочности лессовых пород.

Показатель микропористости предложенный Денисовым Н.Я., представляет отношение коэффициента пористости при нижнем пределе текучести E_T к коэффициенту пористости в естественных условиях E_0 , то есть $K = \frac{E_T}{E_0}$, дает возможность

разделить лессовые породы на две группы: просадочные, если $K > 1$, и непросадочные, если $K < 1$.

Как показала проверка, эти коэффициенты могут использоваться только для пород сильнопросадочных. При применении данного метода к большинству лессовых пород допускаются ошибка в определениях, составляющая 35 - 40%.

Недостаточно точным оказался и метод Приклонского В.А., который рекомендует показатель уплотненности K_d использовать в качестве критерия для разделения пород на просадочные и непросадочные. Здесь также допускается ошибка в 40% и K_d может быть, применим только для разделения сильнопросадочных разностей от слабопросадочных.

Таким же недостатком страдает и метод сопоставления - коэффициент относительной просадочности i_m с отношением естественной влажности к нижнему пределу пластичности $\frac{w}{w_p}$.

На основании собственных исследований просадочности лессовых пород Ивановым И. П. было подтверждена, выявленная Смирновым В. А. зависимость между естественной влажностью и просадочностью для лессовых пород различных районов стран СНГ.

С этой целью, для выявления зависимости между естественной влажностью и просадочностью был построен график, на котором просадочные породы сконцентрировались в правой нижней части графика, а не просадочные - в левой верхней. На рисунке 12 приведена примерная граница между посадочными и не посадочными породами, соответствующая «критическому посадочному состоянию пород», при котором незначительные изменения пористости или влажность приводит к проявлению просадки или к устойчивости при замачивании.

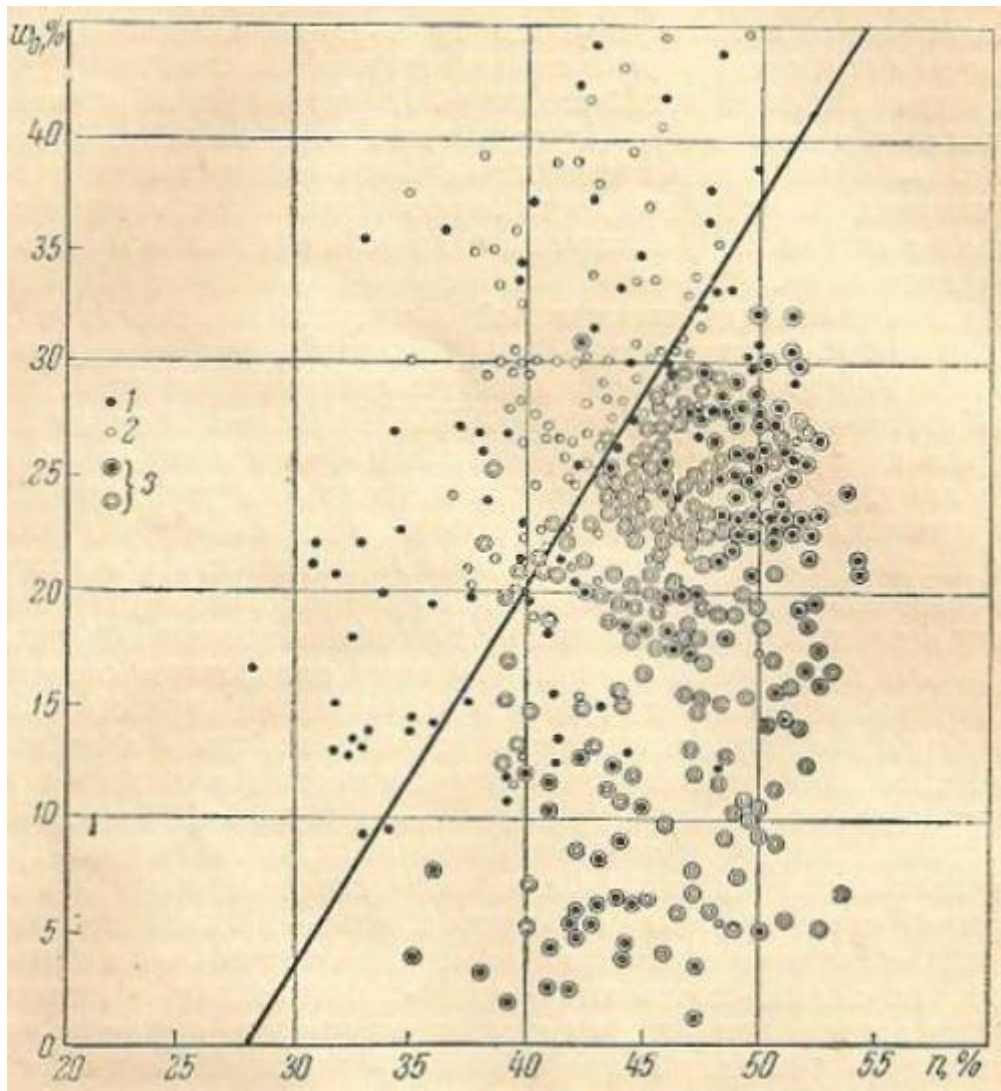


Рисунок 12. График изменения склонности лёссовых пород к просадке в зависимости от естественной объёмной влажности (W_0) и естественной пористости (n): 1 – спорные данные; 2 – проверочные данные; 3 – просадочные разности ($i_m > 0,02$) (Иванов, 1958)

Эта граница была определена следующим уравнением:

$$W_0 = (n - n_0) * \operatorname{tg} \alpha,$$

где W_0 – естественная объёмная влажность лёссовой породы, %;

n – естественная пористость лёссовой породы, %;

n_0 – отрезок по положительному направлению оси абсцисс, составляющая 28%;

α – угол наклона прямой к оси абсцисс, равный 60° ;

$$W_0 = (n - 28) * 1,73.$$

Как можно видеть из графика, породы, удовлетворяющие неравенству $W_0 \leq (n - 28) * 1,73$, занимают правую часть графика, и следовательно, являются посадочными. Породы же, удовлетворяющие неравенству $W_0 > (n - 28) * 1,73$, ложатся слева от граничной прямой, и их следует считать непосадочными. Следовательно,

лессовые породы склонны к просадке при некотором соотношении пористости и влажности. Только в том случае, когда определенный объем пор остается незаполненным водой, следует ожидать проявления просадки в породе. Этот определенный объем пор можно найти по приведенному уравнению. По - видимому, чем больше объем свободных от воды пор, то есть чем выше он от предельного, тем больше должна быть при прочих равных условиях величина просадки.

Используя приведенные данные Иванова И.П., в моей работе был построен график изменения склонности лёссовых пород к просадке в зависимости от естественной объёмной влажности (W_0) и естественной пористости (n).

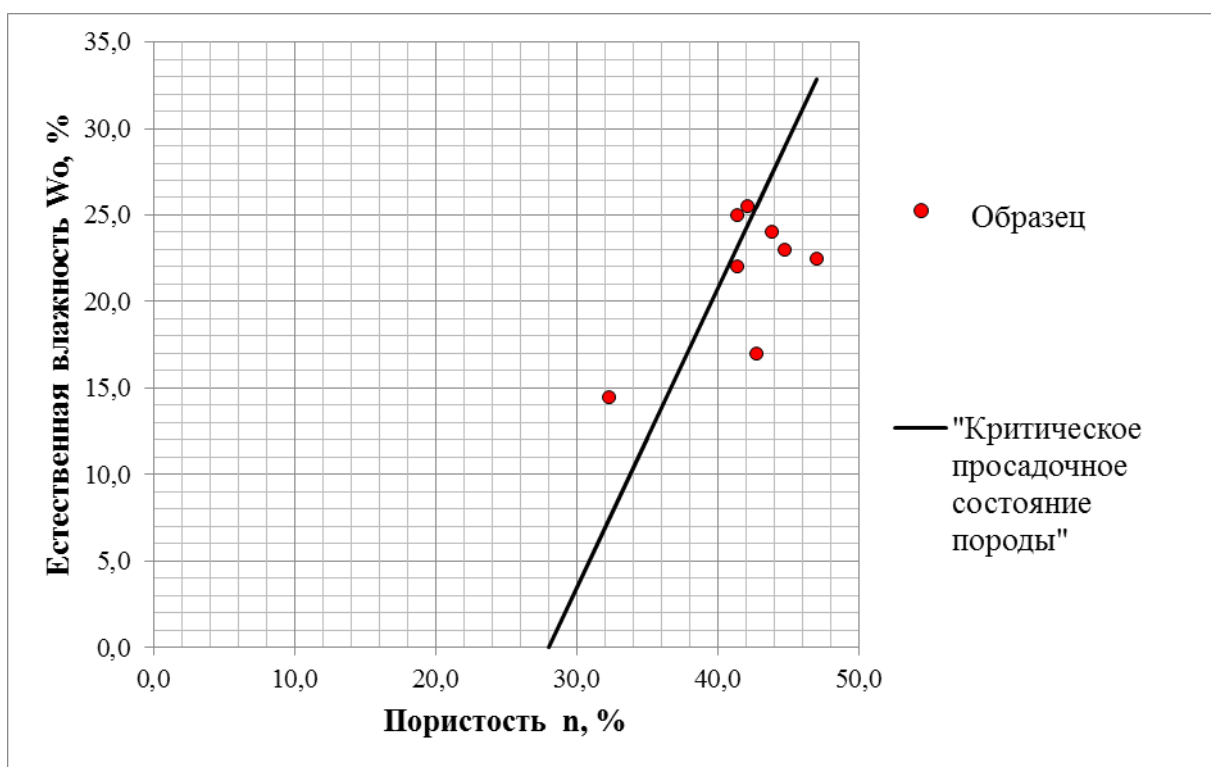


Рисунок 13. График изменения склонности лёссовых пород к просадке в зависимости от естественной объёмной влажности (W_0) и естественной пористости (n) на участке № 1

Сводная таблица просадочности лёссовых грунтов на участке № 1

№ Скв.	Глубина отбора образца	W_0	ρ	ρ_s	n	n_0	a	правая часть	
2	2,0	24,0	1,9	2,7	43,8	28,0	1,73	27,33	Пр
1	2,5	17,0	1,8	2,7	42,7	28,0	1,73	25,43	Пр
3	3,0	23,0	1,9	2,7	44,7	28,0	1,73	28,89	Пр
4	4,0	25,0	2,0	2,7	41,4	28,0	1,73	23,18	НПр
5	5,0	22,5	1,8	2,7	47,0	28,0	1,73	32,87	Пр
6-II	6,5	25,5	2,0	2,7	42,1	28,0	1,73	24,39	НПр
7	8,0	22,0	2,0	2,7	41,4	28,0	1,73	23,18	Пр
8	9,0	14,5	2,1	2,7	32,3	28,0	1,73	7,44	НПр

*Пр – краткое обозначение просадочного грунта;

**НПр – краткое обозначение непросадочного грунта.

На графике отражены результаты исследования.

Для того чтобы показать изменение величины коэффициента относительной просадочности i_m в зависимости от объема «пустых» пор. Производилась дифференциация «просадочной» части приведенного выше графика. Он показал, что просадочными являются образцы из скважин № 1,2,3,5,7, и непросадочные из скважин № 4,6-II,8.

Очень небольшое количество данных не дает возможности дать строгою зависимость этого изменения. Тем не менее на рисунке видно, что увеличение объема пор, не занятых водой, вызывает увеличение просадочности пород. Так при $n-W_0$ 36% i_m колеблется от 0,02, до 0,10, а при свыше $n-W_0$ 36%. следует ожидать в большинстве случаев сильную просадку с i_m больше 0,10.

Выведенной зависимостью нельзя объяснить природу сложного процесса просадочного явления, который зависит, несомненно, от большого количества факторов, и в первую очередь от состава изучаемых пород. Она только может помочь инженерам-геологам давать первые приближенные прогнозы просадочности неизученных лёссовых пород, не прибегая с самого начала изысканий к дорогим лабораторным и полевым опытам, которые иногда подвергаются породы заведомо непросадочными.

Так как на практике пользуются не объёмной, а весовой влажностью, которая определяется непосредственно в инженерно-геологической лаборатории, можно преобразовать выше уравнение.

Таким образом, лёссовые породы, отвечающие неравенству:

$$W_o < (n-28) * \frac{1,73}{\Delta * (1 - 0,01 * n)}$$

где Δ - плотность частиц грунта ρ_s , будут обладать склонностью к просадке и их следует подвергать более точному определению величины просадки. Породы, которые удовлетворяют неравенству:

$$W_o > (n-28) * \frac{1,73}{\Delta * (1 - 0,01 * n)},$$

следует считать непросадочными.

Таблица 8

Сводная таблица просадочности лёссовых грунтов на участке № 2

№ Скв.	Глубина отбора образца	W	ρ	ρ_s	n	n_o	a	правая часть	
17	1,5	21,1	2,07	2,74	37,6	28,0	1,73	16,6	НПр
14	5,5	22,5	1,79	2,72	48,3	28,0	1,73	35,2	Пр
35	6,2	20,1	1,87	2,70	42,2	28,0	1,73	24,6	Пр
44	8,0	18,0	1,93	2,71	39,5	28,0	1,73	19,8	Пр
36	12,9	20,9	1,87	2,73	43,2	28,0	1,73	26,3	Пр
24	14,0	15,9	1,98	2,71	36,9	28,0	1,73	15,4	НПр
31	17,8	19,8	1,87	2,72	40,8	28,0	1,73	22,2	Пр
31-а	19,0	19,4	1,97	2,72	42,3	28,0	1,73	24,7	Пр
36-а	21,9	20,0	1,97	2,77	40,8	28,0	1,73	22,1	Пр
12	4,6	21,5	1,91	2,72	42,3	28,0	1,73	24,7	Пр
14	6,0	21,8	1,77	2,73	46,9	28,0	1,73	32,7	Пр
16	13,3	16,7	1,96	2,72	38,2	28,0	1,73	17,7	Пр
34-а	15,4	23,9	1,84	2,73	45,4	28,0	1,73	30,1	Пр
36-б	17,2	23,1	1,97	2,73	46,5	28,0	1,73	32,0	Пр
36-в	18,9	26,0	1,80	2,74	44,2	28,0	1,73	27,9	Пр
34	27,0	20,0	1,93	2,74	40,2	28,0	1,73	21,0	Пр

*Пр – краткое обозначение просадочного грунта;

**НПр – краткое обозначение непросадочного грунта.

Для участка номер 2, была проделана аналогичная работа (рисунок 14). Анализируя график и расчеты, мы можем наблюдать, что в область, где у нас по идее должны были находиться только непросадочные грунты, попадают просадочные.

Образцы из скважин №14,14-а,36-б попали в правую нижнюю область и являются просадочными. Все остальные образцы попали в верхнюю левую область и должны характеризоваться как непросадочные. Однако, по расчётам, они являются просадочными, кроме образцов из скважин №17,24.

Если говорить о точности данного разделения лёссовых пород на две основные группы, можно, ссылаясь на рисунок 13 и 14, отметить, что из нанесённых 24 анализов в «непросадочную» часть попало 11 анализов просадочных пород.

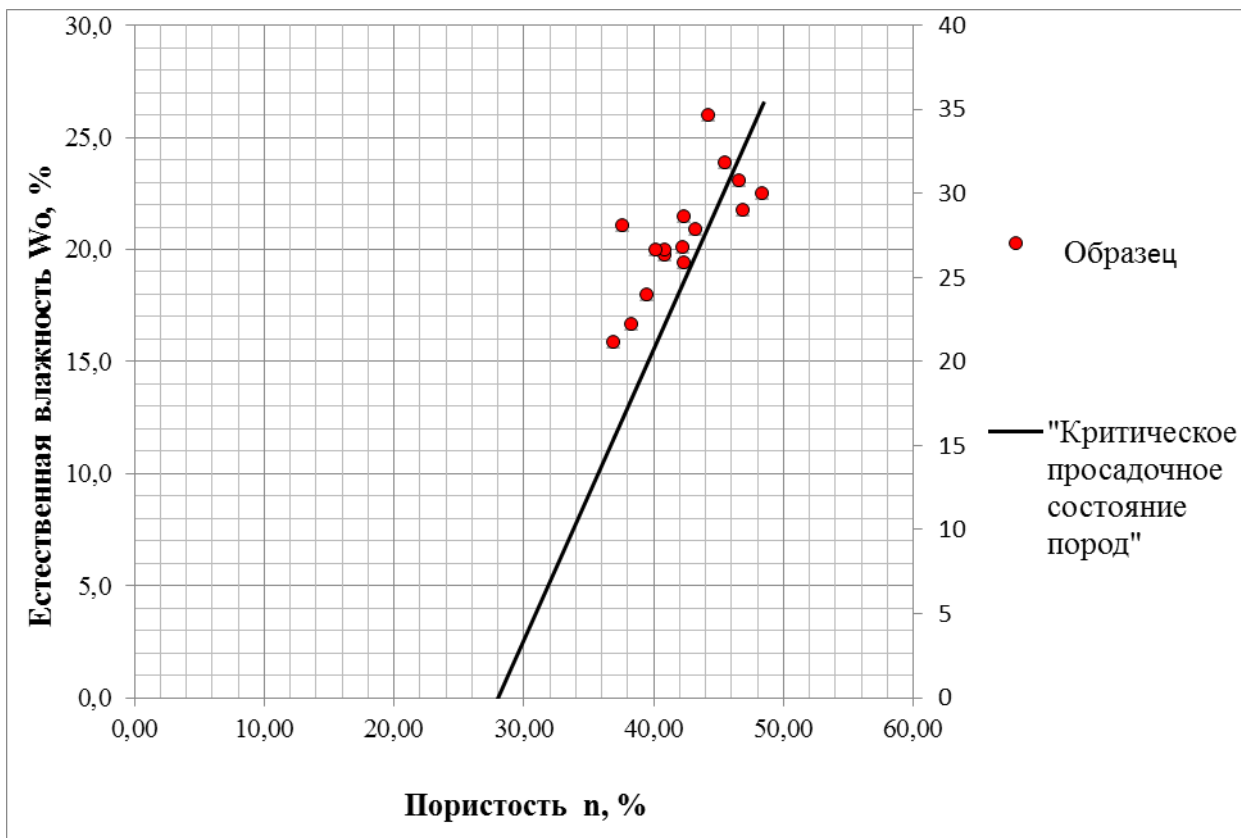


Рисунок 14. График изменения склонности лёссовых пород к просадке в зависимости от естественной объёмной влажности (W_0) и естественной пористости (n) на участке № 2

4.3 Анализ полученных результатов с целью возможности их использования для оценки просадочности лёссовых грунтов

По результатам изучения прямыми методами на первом участке все лёссовые породы были охарактеризованы как просадочные. На втором участке – непросадочные. Однако, при оценке склонности данных грунтов к просадочности по косвенным критериям, были получены весьма спорные результаты. По одним показателям грунты являлись просадочными, а по другим нет. Необходимо учитывать тот факт, что результаты, полученные прямыми методами, являются более достоверными. Но как говорилось уже ранее, косвенные показатели весьма полезны в тех случаях, когда нам нужно изучить малоизвестные территории, так как данные методы менее затратные.

Для того чтобы понять какие грунты склонны к процессу просадочности, нам необходимо проанализировать каждый косвенный показатель. Данный анализ позволит нам понять и дать оценку просадочности грунтам на участке № 1 и № 2.

Показатель просадочности П. На первом участке данный критерий дал верный результат, 7 образцов из 8 – просадочные, что составляет 87,5% и лишь один образец был охарактеризован как непросадочный. На участке номер два 11 образцов были определены как непросадочные, что совпадает с результатами прямых методов. Однако 5 образцов, по данному показателю дали неверный результат, что составляет 31,25%. Таким образом, данный критерий относительно точно определил просадочность грунтов. Поэтому его можно использовать при оценке просадочности данных территорий.

Индекс просадочности I_n . Данный показатель охарактеризовал все образцы на первом участке как просадочные, что полностью совпадает с результатами прямых методов. А вот грунты на участке номер два, дали совершенно другой результат. Все 16 образцов по данному критерию были определены как просадочные, что противоречит результатам, которые были получены прямыми методами. Такой результат, возможно, связан с тем, что грунты на участке 2 могли быть подвержены техногенному загрязнению, что во многих случаях имеет место на различных объектах, и прежде всего, нефтяной и газовой промышленности (Левченко, 2010).

Это могло быть причиной недостоверных данных, полученных прямыми методами на участке 2 (Сергеева, 2008).

И возможно из-за этого дали 100% неверный результат.

Показатель уплотнения K_d В.А. Приклонского. Данный критерий дал абсолютно такой же результат, как и индекс просадочности I_p . То есть все образцы (24 образца) на двух участках были охарактеризованы как просадочные грунты. Но по прямым методам все образцы на втором участке (16 образцов) были определены как непросадочные, что противоречит результатам по данному критерию. Опираясь на классификацию по этому показателю, к просадочным грунтам относятся те, которые удовлетворяют неравенству $e_p > e_L > e$ или $e_L < e$. Из этого следует, что грунты являются просадочными, если $K_d < 0$. Сам же автор, говорит о том, что в данной классификации не учтены другие особенности грунтов, которые непосредственно влияют на просадочность. Из этого можно сделать вывод, что показатель уплотнения K_d В.А. Приклонского неточен. Но на участке номер один данный критерий дал 100% верный результат и совпал с результатами по прямым методам. Этот показатель вполне можно использовать при оценке просадочности грунтов на участке номер один.

Показатель макропористости K_y Н.Я. Денисова. На участке номер один и участке номер два данный критерий все грунты (24 образца) охарактеризовал как непросадочные. Касаемо участка номер два, он довольно точно классифицировал грунты, так как действительно, по результатам прямых методов, грунты на данной территории являются непросадочными. На участке № 1, образцы охарактеризовались как непросадочные (8 из 8), что противоречит результатам прямых методов.

Показатель макропористости K_y Н.Я. Денисова, основывается на отношении коэффициента пористости при влажности на пределе текучести к коэффициенту пористости при естественной влажности грунта. Следовательно, грунт является просадочным, если удовлетворяется следующее неравенство: $e_L < e$. Как видно из таблицы 7, на обоих участках $e_L > e$. А значит все грунты непросадочные.

Таблица 9

Усредненные значения влажности на пределе течения W_L , плотности части ρ_s коэффициента пористости e грунтов на участке №1 и №2

Участок №	e	W_L	ρ_s	e_L
1	0,73	37,13	2,73	1,01
2	0,73	40,4	2,73	1,12

Коэффициент дефицита влажности К. Данный показатель представляет собой, отношение процента содержания влаги, которая находится в порах, к заполняющим их газам. Из этого следует, что если влаги в порах грунта меньше чем воздуха, то грунт является просадочным.

На участке номер один 4 образца из 8 и 13 образцов из 16 на участке номер два, были охарактеризованы как непросадочные. Опираясь на результаты по данному косвенному критерию, можно сказать, что просадочность грунтов на участке номер два была определена достаточно точно. Тогда как результат по участку номер один, является правдой лишь на 50%. В целом, данный критерий можно использовать для определения просадочности грунта.

Коэффициент пористости e , плотность грунта ρ_d и коэффициент водонасыщения S_r (по Крутову В.И.). Разделение грунтов по степени просадочности по данной классификации показало частичное несоответствие с результатами, которые были получены прямыми методами.

Например, на участке номер один, мной были охарактеризованы 5 образцов как непросадочные грунты, 3 образца как слабопросадочные, что совершенно не совпадает с результатами прямых методов.

Хотя на участке номер два 13 образцов охарактеризовались как непросадочные, остальные 3 образца являются слабопросадочными. Что соответствует результатам по прямым методам.

Однако, на данном этапе исследований предложенных территорий, этот критерий не рекомендуется использовать, ввиду того, что он даёт неверные результаты.

Плотность скелета грунта ρ_d и коэффициент пористости e . Лёссовые грунты можно разделить на следующие группы: рыхлые, очень рыхлые и средней плотности, 17 образцов из 24 были отнесены к рыхлым, 7 – грунты средней плотности.

Рыхлые грунты в данном делении являются промежуточной категорией между очень рыхлыми и грунтами средней плотности. Из-за этого просадочность данных грунтов будет находиться в прямой зависимости от их влажности (В.И. Крутов, 1998).

Основываясь на классификации В.И. Крутова, все 24 образца были отнесены к очень влажным или влажным грунтам. Поэтому данные грунты относятся больше в пользу непросадочности.

Проанализировав косвенные показатели, можно сделать следующий вывод. Определение просадочности грунтов по косвенным методам дало надёжные результаты на исследуемых участках лишь по следующим показателям: показатель просадочности П; коэффициент дефицита влажности К. Их вполне можно использовать для

предварительной оценки и прогноза просадочности грунтов, так как совпадают с результатами оценки просадочности прямыми методами.

Такие показатели как: показатель макропористости K_v Н.Я. Денисова, показатель уплотнения K_d В.А. Приклонского, индекс просадочности I_p , не всегда совпадают с результатами, полученными прямыми методами, что может быть связано с такими факторами, как техногенное загрязнение. В этом случае необходимо проверять такую возможность, на основе исследования изменения показателей химического состава подземных вод, а также изменения состава самих грунтов и их физического состояния.

Важно учитывать, что косвенные методы, как было указано выше, следует применять для предварительной оценки просадочности. При решении задач, связанных непосредственно с оценкой взаимодействия лессовых грунтов с инженерными сооружениями – то есть оценкой устойчивости сооружений (расчётами), рекомендуется использовать только результаты, полученные прямыми методами.

Заключение

В данной работе мной были рассмотрены два участка, которые находятся в разных регионах России. Эти территории сложены лёссовыми грунтами. На каждом участке было проанализировано изменение физико-механических свойств грунтов с глубиной и установлены факторы, которые на эти изменения влияют.

На основе полученных данных по результатам применения косвенных критериев и прямых методов, была дана сравнительная оценка просадочности грунтов на исследуемых участках. Были выбраны косвенные критерии просадочности, являющиеся наиболее надёжными при оценке просадочности на исследуемых площадках.

Список литературы

Опубликованные:

1. Абелев Ю.М. Основы проектирования и строительства на просадочных грунтах. М.: Стройиздат, 1979, 271 с.
2. Галай Б.Ф. О гранулометрической классификации лессовых пород // Классификационные критерии разделения лессовых пород. М.: Наука, 1984. С. 23 – 25.
3. Грунтоведение. Под ред. В.Т. Трофимова. 6е изд., перераб. и дополн. (серия «Классический университетский учебник»). М.: Изд-во МГУ, 2005, 1024 с.
4. Денисов Н.Я. О природе просадочных явлений в лёссовидных суглинках. М.: Сов. наука, 1946, 176 с.
5. Иванов И.П. О предварительной оценке просадочности лёссовых пород // Зап. ЛГИ. 1958. Т. 34. №2. С. 214 – 220.
6. Иванов И.П., Тржцинский Ю.Б. Инженерная геодинамика. СПб: Наука, 2001, 416 с.
7. Инженерная геология России. Том 1. Грунты России: Под ред. В.Т. Трофимова, Е.А. Вознесенского, В.А. Королёва. М.: КДУ, 2011, 672 с.
8. Костарев В.П. О соответствии показателей просадочных суглинков Усть-Кишерти косвенным критериям просадочности пылевато-глинистых грунтов Пермского Приуралья // Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в РФ. М.: ОАО ПНИИС, 2007, С. 83 – 86.
9. Крутов В.И. Классификация просадочных лёссовых грунтов. Геоэкология, 1998, С. 55 – 64.
10. Левченко А.П. Особенности взаимодействия оснований и фундаментов на лёссовых просадочных грунтах, в условиях насыщения технологическими и бытовыми сточными водами. // М.: МГОУ; Инновационный НТЦ «Инженер», 2010. Вып. № 1. 558 с.
11. Лысенко М. П. Лёссовые породы. (Состав и инженерно-геологические особенности). Л.: Недра, 1978, 208 с.
12. Лёссовые породы СССР. Инженерно-геологические особенности и проблемы рационального использования, Том 1. Под ред. Е.М. Сергеева, А.К. Ларионова, Н.Н. Комиссаровой. М.: Недра, 1986, 230 с.
13. Рященко Т.Г. Региональное грунтоведение (Восточная Сибирь). Ин-т земной коры СО РАН. Иркутск.: ИЗК СО РАН, 2010, 287 с.

14. Сергеева Т.Д., Кузнецова Т.А. Проблемы изучения инженерно-геологических условий на объектах нефтяной и газовой промышленности. //Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в РФ. Материалы 3 конференции изыскательских организаций. М.: ОАО ПНИИС. 2008 –С.58-60.

Нормативные документы:

15. ГОСТ 20276-2012. Грунты. Методы полевого определения характеристик прочности и деформируемости. (Взамен ГОСТ 20276-99).
16. ГОСТ 20522-2012. Грунты. Методы статистической обработки результатов испытаний. (Взамен ГОСТ 20522-96).
17. СП 22.13330.2011. Свод правил. Основания зданий и сооружений. (Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83*).
18. ГОСТ 23161-2012. Грунты. Метод лабораторного определения характеристик просадочности. (Взамен ГОСТ 23161-78).
19. ГОСТ 25100-2011. Грунты. Классификация. (Взамен ГОСТ 25100-95).

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

Сводная таблица результатов классификаций грунтов по косвенным показателям просадочности для участка 1

№ скв., глубина м.	Коэффициент пористости e и плотность скелета грунта ρ_d	Коэффициент водонасыщения пород S_r		Коэффициент пористости e, плотность скелета грунта ρ_d и коэффициент водонасыщения пород S_r	Показатель просадочности П	Показатель макропористости K_y , Н.Я. Денисова	Показатель уплотнённости K_d В.А.Приклонского	Индекс просадочности I_n	Коэффициент дефицита влажности К
		По ГОСТ 25100-2011	По В.И. Крутову						
1 2,5	рыхлый	$S_r = 0,62$ Влажный (при S_r от 0,5 до 0,8)	$S_r = 0,62$ Влажный (при S_r от 0,5 до 0,7)	Непросадочный	$P = 0,15,$ $I_p = 14,1$ Пр* (при $P < 0,24, I_p$ от 14 до 22)	$K_y = 1,35$ НПр** (непросадочен при $K_y > 1$)	$K_d = -0,36$ Недоуплотненный ($K_d < 0 - Пр*$ грунт)	$I_n = 0,08$ П (просадочен при $I_n < 1$)	$K = 0,66$ П (просадочен при $K < 1,1 - 1,2$)
2 2,0	рыхлый	$S_r = 0,84$ Очень влажный (при $S_r > 0,7$)	$S_r = 0,84$ Влажный (при S_r от 0,5 до 0,7)	Непросадочный	$P = 0,16,$ $I_p = 16,5$ Пр* (при $P < 0,24, I_p$ от 14 до 22)	$K_y = 1,38$ НПр** (непросадочен при $K_y > 1$)	$K_d = -0,35$ Недоуплотненный ($K_d < 0 - п Пр*$ грунт)	$I_n = 0,2$ П (просадочен при $I_n < 1$)	$K = 1,21$ НП (просадочен при $K < 1,1 - 1,2$)
3 3,0	рыхлый	$S_r = 0,77$ Очень влажный (при $S_r > 0,7$)	$S_r = 0,77$ Влажный (при S_r от 0,5 до 0,7)	Слабопросадочный	$P = 0,13,$ $I_p = 15,8$ Пр* (при $P < 0,24, I_p$ от 14 до 22)	$K_y = 1,28$ НПр** (непросадочен при $K_y > 1$)	$K_d = -0,39$ Недоуплотненный ($K_d < 0 - Пр*$ грунт)	$I_n = 0,16$ П (просадочен при $I_n < 1$)	$K = 1,06$ П (просадочен при $K < 1,1 - 1,2$)
4 4,0	рыхлый	$S_r = 0,97$ Очень влажный (при $S_r > 0,7$)	$S_r = 0,97$ Влажный (при S_r от 0,5 до 0,7)	Слабопросадочный	$P = 0,19,$ $I_p = 16,0$ Пр* (при $P < 0,24, I_p$ от 14 до 22)	$K_y = 1,46$ НПр** (непросадочен при $K_y > 1$)	$K_d = -0,28$ Недоуплотненный ($K_d < 0 - Пр*$ грунт)	$I_n = 0,27$ П (просадочен при $I_n < 1$)	$K = 1,52$ НП (просадочен при $K < 1,1 - 1,2$)
5 5,0	рыхлый	$S_r = 0,82$ Очень влажный (при $S_r > 0,7$)	$S_r = 0,82$ Влажный (при S_r от 0,5 до 0,7)	Слабопросадочный	$P = 0,07,$ $I_p = 15,7$ НПр (при $P < 0,24, I_p$ от 14 до 22)	$K_y = 1,15$ НПр (непросадочен при $K_y > 1$)	$K_d = -0,45$ Недоуплотненный ($K_d < 0 - Пр*$ грунт)	$I_n = 0,12$ П (просадочен при $I_n < 1$)	$K = 0,93$ П (просадочен при $K < 1,1 - 1,2$)

Сводная таблица результатов классификаций грунтов по косвенным показателям просадочности для участка 1 (продолжение)

№ скв., глубина м.	Коэффициент пористости e и плотность скелета грунта ρ_d	Коэффициент водонасыщения пород S_r		Коэффициент пористости e , плотность скелета грунта ρ_d и коэффициент водонасыщения пород S_r	Показатель просадочности Π	Показатель макропористости K_y Н.Я. Денисова	Показатель уплотнённости K_d В.А.Приклонского	Индекс просадочности I_{Π}	Коэффициент дефицита влажности K
		По ГОСТ 25100-2011	По В.И. Крутову						
6 6,5	рыхлый	$S_r = 0,96$ Очень влажный (при $S_r > 0,7$)	$S_r = 0,96$ Влажный (при S_r от 0,5 до 0,7)	Непросадочный	$\Pi = 0,31$, $I_p = 21,0$ Пр (при $\Pi < 0,24$, I_p от 14 до 22)	$K_y = 1,73$ НПр (непросадочен при $K_y > 1$)	$K_d = -0,26$ Недоуплотненный ($K_d < 0 - \text{Пр}^*$ грунт)	$I_{\Pi} = 0,31$ П (просадочен при $I_{\Pi} < 1$)	$K = 1,54$ НП (просадочен при $K < 1,1 - 1,2$)
7 8,0	рыхлый	$S_r = 0,96$ Очень влажный (при $S_r > 0,7$)	$S_r = 0,82$ Влажный (при S_r от 0,5 до 0,7)	Непросадочный	$\Pi = 0,31$, $I_p = 15,5$ Пр (при $\Pi < 0,24$, I_p от 14 до 22)	$K_y = 1,4$ НПр (непросадочен при $K_y > 1$)	$K_d = -0,28$ Недоуплотненный ($K_d < 0 - \text{Пр}^*$ грунт)	$I_{\Pi} = 0,16$ П (просадочен при $I_{\Pi} < 1$)	$K = 1,13$ НП (просадочен при $K < 1,1 - 1,2$)
8 9,0	средней плотности	$S_r = 0,96$ Очень влажный (при $S_r > 0,7$)	$S_r = 0,82$ Влажный (при S_r от 0,5 до 0,7)	Непросадочный	$\Pi = 0,31$, $I_p = 10,7$ Пр (при $\Pi < 0,24$, I_p от 14 до 22)	$K_y = 1,5$ НПр (непросадочен при $K_y > 1$)	$K_d = -0,1$ Недоуплотненный ($K_d < 0 - \text{Пр}^*$ грунт)	$I_{\Pi} = 0,15$ П (просадочен при $I_{\Pi} < 1$)	$K = 0,82$ П (просадочен при $K < 1,1 - 1,2$)

Приложение 2

Сводная таблица результатов классификаций грунтов по косвенным показателям просадочности для участка 2

№ скв., глубина м.	Коэффициент пористости e и плотность скелета грунта ρ_d	Коэффициент водонасыщения пород S_r		Коэффициент пористости e , плотность скелета грунта ρ_d и коэффициент водонасыщения пород S_r	Показатель просадочности Π	Показатель макропористост и K_y Н.Я. Денисова	Показатель уплотнённости K_d В.А.Приклонского	Индекс просадочности I_{Π}	Коэффициент дефицита влажности K
		По ГОСТ 25100-2011	По В.И. Крутову						
11 8,0	средней плотности	$S_r = 0,74$ Влажный (при S_r от 0,5 до 0,8)	$S_r = 0,74$ Очень влажный (при $S_r > 0,7$)	Непросадочный	$\Pi = 0,26$, $I_p = 16,6$ НПр** (при $\Pi < 0,24$, I_p от 14 до 22)	$K_y = 1,65$ НПр** (непросадочен при $K_y > 1$)	$K_d = -0,24$ Недоуплотненный ($K_d < 0 - \text{Пр}^*$ грунт)	$I_{\Pi} = 0,15$ П (просадочен при $I_{\Pi} < 1$)	$K = 0,84$ П (просадочен при $K < 1,1 - 1,2$)
14 25,5	рыхлый	$S_r = 0,71$ Влажный (при S_r от 0,5 до 0,8)	$S_r = 0,71$ Очень влажный (при $S_r > 0,7$)	Слабопросадочный	$\Pi = 0,13$, $I_p = 16,7$ Пр* (при $\Pi < 0,24$, I_p от 14 до 22)	$K_y = 1,28$ НПр** (непросадочен при $K_y > 1$)	$K_d = -0,43$ Недоуплотненный ($K_d < 0 - \text{Пр}^*$ грунт)	$I_{\Pi} = 0,13$ П (просадочен при $I_{\Pi} < 1$)	$K = 0,94$ П (просадочен при $K < 1,1 - 1,2$)
17 1,5	средней плотности	$S_r = 0,96$ Очень влажный (при $S_r > 0,8$)	$S_r = 0,96$ Очень влажный (при $S_r > 0,7$)	Непросадочный	$\Pi = 0,26$, $I_p = 13,5$ НПр** (при $\Pi < 0,24$, I_p от 14 до 22)	$K_y = 1,66$ НПр** (непросадочен при $K_y > 1$)	$K_d = -0,23$ Недоуплотненный ($K_d < 0 - \text{Пр}^*$ грунт)	$I_{\Pi} = 0,27$ П (просадочен при $I_{\Pi} < 1$)	$K = 1,28$ НП (просадочен при $K < 1,1 - 1,2$)
24 14,0	средней плотности	$S_r = 0,73$ Влажный (при S_r от 0,5 до 0,8)	$S_r = 0,73$ Очень влажный (при $S_r > 0,7$)	Непросадочный	$\Pi = 0,28$, $I_p = 16,4$ НПр** (при $\Pi < 0,24$, I_p от 14 до 22)	$K_y = 1,76$ НПр** (непросадочен при $K_y > 1$)	$K_d = -0,14$ Недоуплотненный ($K_d < 0 - \text{Пр}^*$ грунт)	$I_{\Pi} = 0,14$ П (просадочен при $I_{\Pi} < 1$)	$K = 0,76$ П (просадочен при $K < 1,1 - 1,2$)
31 17,8	средней плотности	$S_r = 0,78$ Влажный (при S_r от 0,5 до 0,8)	$S_r = 0,78$ Очень влажный (при $S_r > 0,7$)	Непросадочный	$\Pi = 0,24$, $I_p = 16,8$ НПр (при $\Pi < 0,24$, I_p от 14 до 22)	$K_y = 1,59$ НПр (непросадочен при $K_y > 1$)	$K_d = -0,27$ Недоуплотненный ($K_d < 0 - \text{Пр}^*$ грунт)	$I_{\Pi} = 0,17$ П (просадочен при $I_{\Pi} < 1$)	$K = 0,94$ П (просадочен при $K < 1,1 - 1,2$)

Сводная таблица результатов классификаций грунтов по косвенным показателям просадочности для участка 2 (продолжение 1)

№ скв., глубина м.	Коэффициент пористости e и плотность скелета грунта ρ_d	Коэффициент водонасыщения пород S_r		Коэффициент пористости e , плотность скелета грунта ρ_d и коэффициент водонасыщения пород S_r	Показатель просадочности Π	Показатель макропористости K_y Н.Я. Денисова	Показатель уплотнённости K_d В.А.Приклонского	Индекс просадочности I_{Π}	Коэффициент дефицита влажности K
		По ГОСТ 25100-2011	По В.И. Крутову						
31-а 19,0	рыхлый	$S_r = 0,72$ Влажный (при S_r от 0,5 до 0,8)	$S_r = 0,72$ Очень влажный (при $S_r > 0,7$)	Непросадочный	$\Pi = 0,20,$ $I_p = 16,4$ Пр (при $\Pi < 0,24,$ I_p от 14 до 22)	$K_y = 1,46$ НПр (непросадочен при $K_y > 1$)	$K_d = -0,32$ Недоуплотненный ($K_d < 0 - \text{Пр}^*$ грунт)	$I_{\Pi} = 0,13$ П (просадочен при $I_{\Pi} < 1$)	$K = 0,85$ П (просадочен при $K < 1,1 - 1,2$)
35 6,2	рыхлый	$S_r = 0,74$ Влажный (при S_r от 0,5 до 0,8)	$S_r = 0,74$ Очень влажный (при $S_r > 0,7$)	Непросадочный	$\Pi = 0,22,$ $I_p = 15,9$ Пр* (при $\Pi < 0,24,$ I_p от 14 до 22)	$K_y = 1,52$ НПр** (непросадочен при $K_y > 1$)	$K_d = -0,34$ Недоуплотненный ($K_d < 0 - \text{Пр}^*$ грунт)	$I_{\Pi} = 0,15$ П (просадочен при $I_{\Pi} < 1$)	$K = 0,91$ П (просадочен при $K < 1,1 - 1,2$)
36 12,9	рыхлый	$S_r = 0,75$ Очень влажный (при $S_r > 0,7$)	$S_r = 0,75$ Очень влажный (при $S_r > 0,7$)	Непросадочный	$\Pi = 0,24,$ $I_p = 14,4$ НПр** (при $\Pi < 0,24,$ I_p от 14 до 22)	$K_y = 1,56$ НПр** (непросадочен при $K_y > 1$)	$K_d = -0,44$ Недоуплотненный ($K_d < 0 - \text{Пр}^*$ грунт)	$I_{\Pi} = 0,15$ П (просадочен при $I_{\Pi} < 1$)	$K = 0,94$ П (просадочен при $K < 1,1 - 1,2$)
36-а 21,9	средней плотности	$S_r = 0,81$ Очень влажный (при $S_r > 0,8$)	$S_r = 0,81$ Очень влажный (при $S_r > 0,7$)	Непросадочный	$\Pi = 0,15,$ $I_p = 15,2$ Пр* (при $\Pi < 0,24,$ I_p от 14 до 22)	$K_y = 1,37$ НПр** (непросадочен при $K_y > 1$)	$K_d = -0,25$ Недоуплотненный ($K_d < 0 - \text{Пр}^*$ грунт)	$I_{\Pi} = 0,17$ П (просадочен при $I_{\Pi} < 1$)	$K = 0,96$ П (просадочен при $K < 1,1 - 1,2$)
12 4,6	рыхлый	$S_r = 0,80$ Очень влажный (при $S_r > 0,8$)	$S_r = 0,80$ Очень влажный (при $S_r > 0,7$)	Непросадочный	$\Pi = 0,21,$ $I_p = 18,7$ Пр* (при $\Pi < 0,24,$ I_p от 14 до 22)	$K_y = 1,49$ НПр** (непросадочен при $K_y > 1$)	$K_d = -0,25$ Недоуплотненный ($K_d < 0 - \text{Пр}^*$ грунт)	$I_{\Pi} = 0,18$ П (просадочен при $I_{\Pi} < 1$)	$K = 1,04$ П (просадочен при $K < 1,1 - 1,2$)

Сводная таблица результатов классификаций грунтов по косвенным показателям просадочности для участка 2 (продолжение 2)

№ скв., глубина м.	Коэффициент пористости e и плотность скелета грунта ρ_d	Коэффициент водонасыщения пород S_r		Коэффициент пористости e , плотность скелета грунта ρ_d и коэффициент водонасыщения пород S_r	Показатель просадочности Π	Показатель макропористости K_y Н.Я. Денисова	Показатель уплотнённости K_d В.А.Приклонского	Индекс просадочности I_{Π}	Коэффициент дефицита влажности K
		По ГОСТ 25100-2011	По В.И. Крутову						
14-а 6,0	рыхлый	$S_r = 0,67$ Влажный (при S_r от 0,5 до 0,8)	$S_r = 0,67$ Влажный (при S_r от 0,5 до 0,7)	Слабопросадочный	$\Pi = 0,13,$ $I_p = 17,1$ НПр (при $\Pi < 0,24, I_p$ от 14 до 22)	$K_y = 1,28$ НПр (непросадочен при $K_y > 1$)	$K_d = -0,45$ Недоуплотненный ($K_d < 0 - \text{Пр}^*$ грунт)	$I_{\Pi} = 0,11$ П (просадочен при $I_{\Pi} < 1$)	$K = 0,87$ П (просадочен при $K < 1,1 - 1,2$)
16 13,3	средней плотности	$S_r = 0,73$ Влажный (при S_r от 0,5 до 0,8)	$S_r = 0,73$ Очень влажный (при $S_r > 0,7$)	Непросадочный	$\Pi = 0,25,$ $I_p = 15,3$ НПр** (при $\Pi < 0,24, I_p$ от 14 до 22)	$K_y = 1,66$ НПр (непросадочен при $K_y > 1$)	$K_d = -0,22$ Недоуплотненный ($K_d < 0 - \text{Пр}^*$ грунт)	$I_{\Pi} = 0,14$ П (просадочен при $I_{\Pi} < 1$)	$K = 0,78$ П (просадочен при $K < 1,1 - 1,2$)
34 15,4	рыхлый	$S_r = 0,78$ Влажный (при S_r от 0,5 до 0,8)	$S_r = 0,78$ Очень влажный (при $S_r > 0,7$)	Непросадочный	$\Pi = 0,20,$ $I_p = 19,4$ Пр* (при $\Pi < 0,24, I_p$ от 14 до 22)	$K_y = 1,44$ НПр** (непросадочен при $K_y > 1$)	$K_d = -0,37$ Недоуплотненный ($K_d < 0 - \text{Пр}^*$ грунт)	$I_{\Pi} = 0,17$ П (просадочен при $I_{\Pi} < 1$)	$K = 1,11$ НП (просадочен при $K < 1,1 - 1,2$)
34-а 27,0	рыхлый	$S_r = 0,82$ Очень влажный (при $S_r > 0,8$)	$S_r = 0,82$ Очень влажный (при $S_r > 0,7$)	Непросадочный	$\Pi = 0,24,$ $I_p = 18,5$ НПр** (при $\Pi < 0,24, I_p$ от 14 до 22)	$K_y = 1,61$ НПр** (непросадочен при $K_y > 1$)	$K_d = -0,19$ Недоуплотненный ($K_d < 0 - \text{Пр}^*$ грунт)	$I_{\Pi} = 0,19$ П (просадочен при $I_{\Pi} < 1$)	$K = 0,99$ П (просадочен при $K < 1,1 - 1,2$)
36-б 17,2	рыхлый	$S_r = 0,73$ Влажный (при S_r от 0,5 до 0,8)	$S_r = 0,73$ Очень влажный (при $S_r > 0,7$)	Слабопросадочный	$\Pi = 0,22,$ $I_p = 20,9$ Пр* (при $\Pi < 0,24, I_p$ от 14 до 22)	$K_y = 1,47$ НПр** (непросадочен при $K_y > 1$)	$K_d = -0,39$ Недоуплотненный ($K_d < 0 - \text{Пр}^*$ грунт)	$I_{\Pi} = 0,13$ П (просадочен при $I_{\Pi} < 1$)	$K = 0,99$ П (просадочен при $K < 1,1 - 1,2$)

Сводная таблица результатов классификаций грунтов по косвенным показателям просадочности для участка 2 (продолжение 3)

№ скв., глубина м.	Коэффициент пористости e и плотность скелета грунта ρ_d	Коэффициент водонасыщения пород S_r		Коэффициент пористости e , плотность скелета грунта ρ_d и коэффициент водонасыщения пород S_r	Показатель просадочности Π	Показатель макропористости K_y Н.Я. Денисова	Показатель уплотнённости K_d В.А.Приклонского	Индекс просадочности I_{Π}	Коэффициент дефицита влаги K
		По ГОСТ 25100-2011	По В.И. Крутову						
36-в 18,9	рыхлый	$S_r = 0,90$ Очень влажный (при $S_r > 0,8$)	$S_r = 0,90$ Очень влажный (при $S_r > 0,7$)	Непросадочный	$\Pi = 0,23$, $I_p = 18,9$ Пр* (при $\Pi < 0,24$, I_p от 14 до 22)	$K_y = 1,54$ НПр** (непросадочен при $K_y > 1$)	$K_d = -0,35$ Недоуплотненный ($K_d < 0$ – Пр* грунт)	$I_{\Pi} = 0,23$ П (просадочен при $I_{\Pi} < 1$)	$K = 1,43$ НП (просадочен при $K < 1,1 - 1,2$)

***Пр** – краткое обозначение просадочного грунта

****НПр** – краткое обозначение непросадочного грунта