

УДК 624.131.23

**ЛЁССОВЫЕ ПРОСАДОЧНЫЕ ГРУНТЫ:
РАСПРОСТРАНЕНИЕ, ВНЕШНИЕ ПРИЗНАКИ И ТИПЫ ПРОСАДКИ**



**LOESS SUBSIDENCE SOILS:
DISTRIBUTION, EXTERNAL SIGNS AND TYPES OF SUBSIDENCE**

Стефанов Р.Е.

АО «Газпром газораспределение Тамбов»
r.stefanov@internet.ru

Аннотация. В статье описаны лёссовые просадочные грунты – их распространение, внешние признаки, состав и строение грунтов, а также типы просадки. Описаны региональные особенности лёссовых пород Западной Сибири. Приведены направления исследований по разработке методики создания уплотнённого лёссового основания. Показано, что деформируемость грунта в процессе передачи компрессионной нагрузки обуславливается как сближением структурных элементов между собой, так и их разрушением.

Ключевые слова: лёссовые просадочные грунты и их распространение; внешние признаки лёссовых просадочных грунтов; состав и строение лёссовых просадочных грунтов; относительная деформация просадочности; начальная просадочная влажность; начальное просадочное давление; методы устранения просадочности лёссовых грунтов.

Stefanov R.E.

JSC «Gazprom Gas Distribution Tambov»
r.stefanov@internet.ru

Annotation. The article describes loess subsidence soils – their distribution, external signs, composition and structure of soils, as well as types of subsidence. The regional features of loess rocks in Western Siberia are described. The directions of research on the development of methods for creating a compacted loess base are given. It has been shown that the deformability of soil during the transfer of compression load is caused by both the approach of structural elements to each other and their destruction.

Keywords: loess subsidence soils and their distribution; external signs of loess subsidence soils; composition and structure of loess subsidence soils; relative subsidence strain; initial subsidence moisture content; initial subsidence pressure; methods for eliminating subsidence of loess soils.

Введение
Среди специфических грунтов особую категорию составляют лёссовые просадочные грунты. Вот выноска из свода правил по инженерно-геологическим изысканиям при строительстве:

К просадочным грунтам в соответствии с ГОСТ 25100-95 следует относить пылеватоглинистые разновидности дисперсных осадочных минеральных грунтов (чаще всего лёссовые грунты), дающие при замачивании при постоянной внешней нагрузке и (или) нагрузке от собственного веса грунта дополнительные деформации – просадки, происходящие в результате уплотнения грунта вследствие изменения его структуры. К просадочным относятся грунты с величиной относительной деформации просадочности ε (доли ед.) $\geq 0,01$.

Отсюда следует вывод, что изучение лёссовых просадочных грунтов представляет собой важную задачу в связи с их распространённостью в южных районах Российской Федерации, где они участвуют в строении толщ лёссовых пород, покрывающих обширные пространства. Мощность лёссовых толщ изменяется от нескольких метров в северной части зоны их распространения до 50–80 м, а местами и более в её южной части.

Распространение

Лёссовые грунты имеют широкое распространение в мире, особенно в Европе и Азии, занимая площадь около 13 млн км². Почти сплошным покровом лёссовые породы лежат на большей части территории юга европейской части России (Нижний Дон, Предкавказье, Заволжье и др.), а также на юге Западной Сибири и в ряде других степных районов (рис. 1).

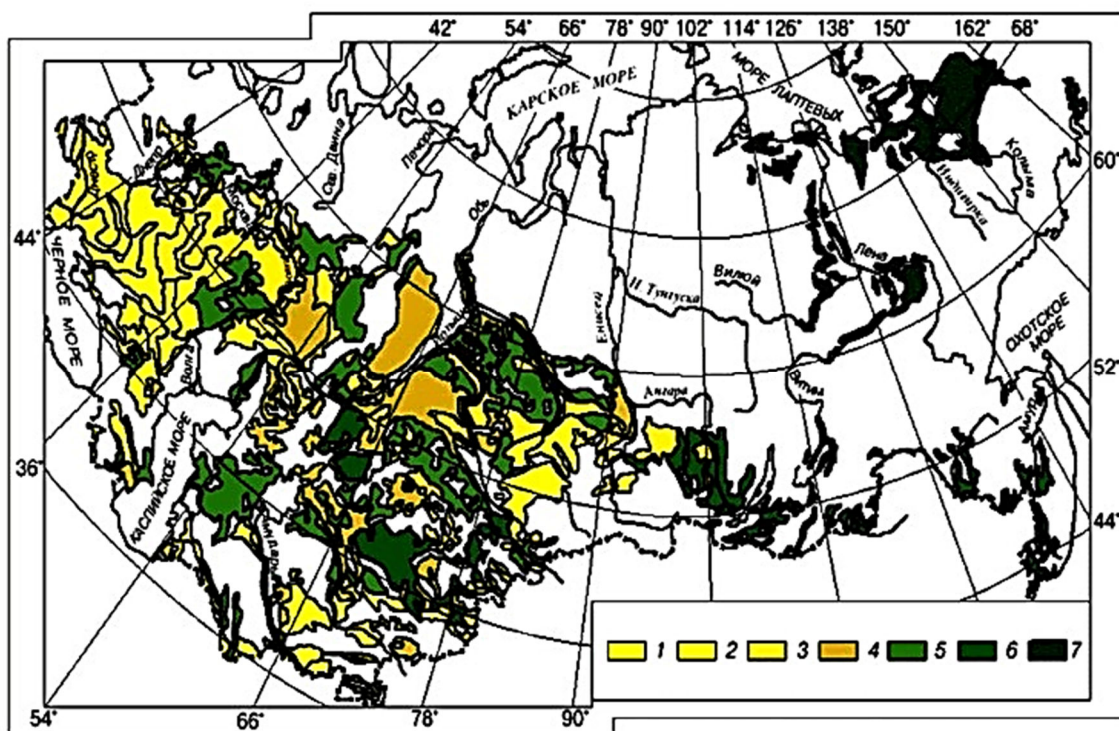


Рисунок 1 – Схема распространения лёссовых грунтов на территории Российской Федерации

Значительные площади заняты ими в восточном Закавказье, в Молдове, Восточной Европе, в Китае, Средней Азии, Монголии и во многих других районах мира.

Лёссовые отложения покрывают сплошным платом обширные плоские водоразделы, их склоны, поверхность высоких террас. В зоне влияния речных долин и морского побережья они прорезаны многочисленными балками и оврагами. Последние имеют резкие формы, особенно в своей верховой части: узкое дно и высокие обрывистые склоны. Высота обрывов достигает 5–6 м, иногда более. На поверхности водоразделов развиты просадочные блюдца и поды. Размер блюдец в плане изменяется от нескольких метров до первых десятков метров, глубина – от долей метра до 1–2 метров. Поды представлены обширными понижениями шириной в сотни метров или километры с глубиной, не превышающей первых метров. Дно подов сложено непросадочными тяжёлыми суглинками или глинами.

Условия залегания лёссовых пород достаточно однообразны. Независимо от гипсометрического положения отдельных положительных форм рельефа, они покрывают плоские водоразделы, их склоны, поверхность высоких террас и т.д.

Внешние признаки

Внешними признаками, отличающими макropористые лёссовые грунты, являются следующие:

1. Видимая невооружённым глазом пористость (макропористость), обусловленная наличием тонких, более или менее вертикальных каналцев иногда с остатками растений. Канальцы, пронизывающие всю толщу лёссовидных грунтов, покрыты изнутри налётами углекислых солей.

2. Столбчатая отдельность. Это свойство лёссовидных грунтов проявляется особенно ярко на открытых местах, подвергающихся действию атмосферных осадков. В искусственных выемках и свежих разрезах отдельностей не наблюдается.

3. Быстрое размокание в воде и большая водопроницаемость. Так, коэффициент водопроницаемости (фильтрации) лёсса для образца ненарушенной структуры в 100 раз больше коэффициента водопроницаемости для перемятого, лишённого макропор образца того же грунта.

4. Наличие твёрдых мергелистых включений. Трубочатые пустоты лёссовых грунтов в большинстве случаев покрыты тонким слоем извести, кроме того, отдельные

известковые и мергелистые включения самой разнообразной формы находятся в лёссовых грунтах в довольно значительном количестве. При опробовании этих грунтов 3 %-ным раствором соляной кислоты наблюдаются бурное вскипание и быстрое прекращение выделения пузырьков газа.

5. Характерное распределение влажности по глубине с наличием на некотором уровне так называемого «мёртвого горизонта» с меньшей по сравнению с вышележащими и нижележащими слоями влажностью. В мёртвом горизонте наблюдается максимальное содержание солей. Ниже мёртвого горизонта влажность возрастает постепенно, достигая величины максимальной влагоёмкости. Отметим также, что, как правило, в толще лёссовых пород наблюдаются только два горизонта грунтовых вод: верховодка и нижний горизонт грунтовых вод.

6. Характерный состав. По гранулометрическому составу лёссовидные грунты характеризуются преобладанием пылеватых фракций (частиц размером от 0,05 до 0,005 мм обычно более 50 %) при незначительном содержании глинистых частиц (от 4 до 20 %). Как правило, лёссовидные грунты отличаются значительной однородностью гранулометрического состава, причём коэффициент неоднородности часто бывает не более 5.

Состав и строение грунтов

Для просадочных лёссовых грунтов обычно характерны:

- высокая пылеватость (содержание частиц размером 0,05–0,005 мм более 50 % при количестве частиц размером менее 0,005 мм, как правило, не более 10–15 %);
- низкие значения числа пластичности (менее 12);
- низкая плотность скелета грунта (преимущественно менее 1,5 г/см³);
- повышенная пористость (более 45 %);
- невысокая природная влажность (как правило, менее границы раскатывания);
- засоленность;
- светлая окраска (от палевого до охристого цвета);
- способность в маловлажном состоянии держать вертикальные откосы;
- цикличность строения толщ.

Главная отличительная особенность лёссов – наличие макропор размером 1–3 мм, различимых невооружённым глазом. Макропоры имеют форму извилистых вертикальных канальцев.

Мощные толщи лёссовых пород имеют циклическое строение: несколько горизонтов лёссов переслаиваются с погребёнными почвами и непросадочными лёссовыми грунтами (лёссовидными суглинками). Последние, в отличие от лёссов, имеют более тёмный бурый или красновато-бурый цвет и нередко отчётливую слоистость. Они более глинисты, характеризуются относительно низкой пористостью (до 40 %) и значительно более высокой плотностью (1,8–1,9 г/см³). Число горизонтов лёссов непостоянно (в южных районах территории Российской Федерации в разрезе присутствует от 3 до 6 горизонтов лёссов разной мощности). Как правило, просадочность уменьшается сверху вниз по разрезу.

Лёссы обладают высокой для глинистых грунтов водопроницаемостью и резкой анизотропией по этому свойству.

Коэффициент фильтрации в вертикальном направлении измеряется несколькими м/сут., в горизонтальном – десятками или сотнями м/сут. Это приводит к тому, что при инфильтрации воды с поверхности образуются купола грунтовых вод, медленно растекающиеся в стороны. В пределах городов, где имеются многочисленные источники замачивания (утечки из коммуникаций, интенсивный полив водой скверов, садов, парков) в толще лёссовых грунтов формируется техногенный горизонт грунтовых вод, быстро повышающий свой уровень (до 0,5–1,0 м в год), что способствует интенсивному развитию просадочных явлений. В районах, где лёссы обогащены гипсом, формирующиеся грунтовые воды агрессивны по отношению к бетону на портландцементе.

Просадочные грунты следует характеризовать:

- относительной деформацией просадочности ε – относительным сжатием грунтов при заданном давлении после их замачивания;
- начальной просадочной влажностью ω – минимальной влажностью, при которой проявляются просадочные свойства грунтов;

• начальным просадочным давлением p – минимальным давлением, при котором проявляются просадочные свойства грунтов при их замачивании.

При инженерно-геологических изысканиях под свайные фундаменты с опиранием свай на непросадочные грунты (сваи-стойки) и при соответствующей записи в техническом задании допускается не определять указанные специфические свойства просадочных грунтов.

В таблице 1 приведены значения модуля деформации лёссовидных суглинков в диапазоне нормативных давлений 0,1–0,3 МПа.

Таблица 1 – Значения модуля деформации лёссовидных суглинков в диапазоне нормативных давлений 0,1–0,3 МПа (по Я.Д. Гильману, 1991)

Степень влажности S_r	Модуль деформации E , МПа, при коэффициенте пористости m , равном				
	0,56–0,65	0,66–0,75	0,76–0,85	0,86–0,95	0,96–1,05
0,3	50	44	38	30	22
0,4	35	30	25	20	14
0,5	25	21	17	13	8
0,6	18	15	12	9	6
0,7	14	12	9	7	5
0,8	12	10	7	6	4
0,9	10	8	6	5	3
1,0	8	7	5	4	2

Начальное просадочное давление p – это давление, при котором относительная просадочность равна 0,01, т.е. при котором грунт считается просадочным. Если провести серию компрессионных испытаний лёссового грунта с замачиванием образцов при различных нагрузках, то нетрудно получить график зависимости относительной просадочности от давления.

Типы просадки

Выделение участков с различными типами грунтовых условий по просадочности в районах распространения просадочных грунтов следует осуществлять в соответствии с требованиями СНиП 2.02.01-83 в зависимости от величины просадки грунтов от собственного веса при их замачивании:

I тип – грунтовые условия, в которых возможна в основном просадка грунтов от внешней нагрузки, а просадка грунтов от собственного веса отсутствует или не превышает 5 см;

II тип – грунтовые условия, в которых помимо просадки грунтов от внешней нагрузки возможна их просадка от собственного веса и величина её превышает 5 см.

Методы устранения просадочности лёссовых грунтов

В связи с широким распространением лёссовых пород на территории проблема борьбы с просадочностью этих пород в основаниях зданий и инженерных сооружений всегда была актуальной. Проблема заключается в том, что при промачивании лёсса происходит просадка и резкое уменьшение прочности основания. При этом наблюдается потеря устойчивости основания, что зачастую приводит к полному или частичному разрушению зданий и сооружений. Для устранения просадочных свойств лёссовых оснований применяются различные методы. Ниже приведены основные из них, имеющие свои достоинства и недостатки. Наиболее распространённым методом на первом этапе борьбы с просадочностью лёссовых оснований является метод механического уплотнения лёссовых грунтов тяжёлыми трамбовками, которые многократно (до 10–16 раз) сбрасываются на уплотняемый участок грунта с высоты 4–8 м. Данный метод позволяет уплотнить толщу лёссового грунта на глубину до 3,5 м. Недостатком данного метода является влияние динамических воздействий, вызванных трамбованием, на близко расположенные здания и сооружения.

Глубинное уплотнение грунтовыми набивными сваями применяют, если необходимо ликвидировать просадочные свойства лёссовых грунтов на глубину более 10 м. И в этом случае при пробивке скважин для устройства свай возникают динамические колебания в грунтах основания.

Ликвидировать просадочные свойства возможно методом предварительного замачивания лёссового массива. При этом происходит спровоцированная просадка грунта, после чего он уплотняется, теряет просадочность и переходит в стабильное состояние. При применении данного метода необходим значительный комплекс мероприятий для исключения замачивания оснований.

Одним из ранних способов борьбы с просадочностью являлся метод термического закрепления лёссовых грунтов, при котором через грунт с помощью специальных приспособлений пропускался раскалённый воздух или газы при температуре 300–800 °С. Под действием высокой температуры происходило оплавление и спекание минералов на контактах между отдельными частицами и агрегатами, и формировались прочные фазовые контакты кристаллизационного типа, устойчивые по отношению к воздействию воды. В результате существенно повышалась прочность лёссового грунта, и он становился непросадочным. Минусом данного метода являлось значительное химическое «загрязнение» закрепляемых пород, и поэтому в настоящее время он не применяется.

Одним из наиболее эффективных в настоящее время методов устранения просадочности является метод силикатизации лёссовых грунтов. Растворы химических веществ вводят в грунт при помощи инъекторов. Погружают инъекторы посредством забивки, осуществляя её заходками, несколько превышающими длину перфорированной их части, обычно равную 0,5–1,5 м. На глубине каждой заходки производят нагнетание закрепляющих веществ, используя насосы, специально изготовляемые для химического закрепления грунтов. Радиус распространения нагнетаемых веществ в грунте колеблется в пределах 0,4–1,0 м, а глубина погружения инъекторов может достигать 15–20 м и более. К недостаткам данного метода можно отнести его высокую стоимость и сложность контроля сплошности закреплённого массива.

Лёссовые просадочные грунты Западной Сибири

Анализируя инженерно-геологические условия лёссовых пород Западной Сибири, можно выделить следующие региональные особенности:

1. Мощность лёссовых просадочных грунтов изменяется в пределах от 3–4 м до 10–12 м, т.е. она незначительная. Наибольшей мощности эти породы достигают на территории Приобского и Обь-Чумышского плато, Обь-Чумышской аллювиальной равнины. Для Кулундинской низменности и Ненинской равнины мощность просадочных лёссовых пород не превышает 3–4 м, в предгорных районах – 5–6 м. Наиболее распространёнными грунтами лёссовых пород Верхнего Приобья являются суглинки и реже супеси.

2. По просадочности исследуемые лёссовые породы относятся к I типу и лишь в отдельных случаях локально встречаются лёссовые породы II типа. Это имеет место в юго-восточной части озёрно-аллювиальной Обь-Чумышской равнины и Приобского плато.

3. Гранулометрический состав лёссовых пород юга Западной Сибири характеризуется неоднородностью по вертикали и по площади, наличием линз и прослоек песка.

4. В пределах Верхнего Приобья широко распространены слои погребённых почв мощностью до 2 м, которые можно рассматривать как специфический горизонт грунтов, обладающих сравнительно надёжными строительными свойствами.

В последние годы возникли новые проблемы по эксплуатации построенных сооружений на лёссовых просадочных грунтах. Наиболее значительная из них – подтопление. Для сооружений на лёссовых просадочных грунтах это имеет особое значение. Процесс подтопления вызывает резкое снижение прочностных и деформационных характеристик, при этом возникает дополнительная просадка, деформации дорожных покрытий и т.д. К сожалению, аварийное состояние сооружений на лёссовых грунтах возникает не только за счёт подтопления территорий. Существующие методы устройства оснований и фундаментов страдают определёнными недостатками. Уплотнение грунтов тяжёлыми трамбовками является сезонным видом работ. Выполненное осенне-зимнее уплотнение лёссовых пород зачастую отличается невысоким качеством и приводит к появлению недопустимых деформаций, что часто оказывается невозможным и диктует необходимость принятия других решений.

С 1991 года проводятся исследования по разработке методики создания уплотнённого лёссового основания. Уплотнённое основание создаётся механическим трамбованием с использованием трамбовок различной массы.

Для экспериментальных исследований выбрано несколько опытных площадок размером 9 × 9 м и 12 × 12 м, ровных, со спокойным рельефом. Лёссовые породы, выбранные нами для исследования, являются покровными отложениями Верхнего Приобья. Эти породы залегают на глубину до 8–12 м. Для них характерна слабоустойчивая к замачиванию микроструктура, в водонасыщенном состоянии деформируемость этих пород возрастает в 2–5 раз, а у подстилающих пород – в 2–3 раза.

В геологическом отношении выбранные площадки, расположенные в непосредственной близости друг от друга, сложены лёссовыми суглинками твёрдыми I типа по просадочности с толщиной 6–8 м, с наиболее характерными свойствами грунтов юга Западной Сибири, глубже по разрезу – крупнозернистые и средней крупности пески. Грунтовые воды в пределах выработок (скв. до 20 м) не обнаружены.

Первое уплотнение грунта проведено на площадке в августе-сентябре 1991 года. Уплотнение проводилось обычной трамбовкой весом 3,2 кН. Трамбовка монтировалась на базе обычного экскаватора системы с драглайном. Методика трамбования классическая – 10–12 ударов по неувлажнённому основанию с радиальным перемещением стрелы крана на 45° в каждую сторону, с двукратным циклом и перекрытием последующей на 0,9 диаметра трамбовки. На уплотнённом таким образом грунте проведены испытания со штампом-фундаментом размером 1000 × 1000 × 500 мм. Штамп-фундамент выполнен железобетонным с соответствующим армированием, как и обычный жёсткий фундамент. Нагрузка на штамп создавалась металлическими блоками общей массой 47 тонн.

Анализ результатов показал, что уплотнение грунтов обычной трамбовкой весом 3,2 тонн необходимого эффекта не даёт, грунт уплотняется на глубину не более 0,5 м. Для получения большего эффекта уплотнение грунта производилось тяжёлой трамбовкой массой 180 кН. Тяжёлая трамбовка конусообразной формы, заканчивающаяся металлической квадратной плитой 1000 × 1000 мм, сбрасывалась с 7–8 м, двигаясь по металлическому направляющему монорельсу.

Уплотнение грунта производилось в 5 проходок. В зависимости от влажности и степени уплотнённости требуемого основания варьировалось количество сбрасываний трамбовки от 5 до 25 ударов по одному следу. В результате этого после каждой проходки поверхность котлована понижалась на 25–45 см. Перед каждой следующей проходкой производилось снятие разрыхлённого грунта бульдозером.

В результате трамбования площадки тяжёлой трамбовкой отметка дна котлована понизилась на 1,4–1,5 м. Мощность трамбуемого слоя составила 5,0–5,5 м, считая от установившейся поверхности дна котлована.

Особое внимание в полевых экспериментах уделено определению напряжений в грунтовом основании, которое осуществлялось с помощью датчиков давления (месс доз) конструкции Д.С. Баранова.

Напряжения непосредственно под подошвой штампа замерялись контактными месс дозами.

В результате экспериментальных исследований построены графики осадок и эпюры нормальных напряжений, возникающих в грунтовом основании.

Полученные результаты дали возможность оценить характер формирования напряжённого состояния основания опытных штампов. Так, проанализировано изменение осевых вертикальных напряжений в массиве грунта при увеличении нагрузки на штамп. Вертикальные осевые напряжения под штампом убывают с глубиной. Наиболее значительные затухания происходят в верхнем, более уплотнённом, слое – до глубины 1 м вертикальные осевые напряжения уменьшаются на 40–60 %, причём основное падение напряжений происходит до глубины 1,5–2,0 м.

График осадки штампа-фундамента на уплотнённом основании представляет собой практически прямую линию – это свидетельствует о том, что в результате уплотнения лёссового грунта получено линейно-деформированное основание.

После проведения опытного уплотнения лёссового основания тяжёлой трамбовкой весом 100 кН отобраны образцы грунта для проведения лабораторных исследований.

В результате уплотнения значительно повысились такие характеристики грунта как плотность сухого грунта и модуль общей деформации. По сравнению с начальной ($1,44 \text{ г/см}^3$) плотность сухого грунта возросла на 35 % (до $1,95 \text{ г/см}^3$) на глубине 0,5–1,0 м, на 10 % ($1,6 \text{ г/см}^3$) на глубине 5 м. На самой поверхности (до 0,5 м) плотность несколько ниже, чем на глубине 1,0 м, из-за произошедшего в результате трамбования расслоения грунта верхнего слоя. Но всё равно по сравнению с начальной плотностью достигнуто значительное её повышение ($1,85\text{--}1,90 \text{ г/см}^3$ против $1,44 \text{ г/см}^3$).

В верхних слоях уплотнённого основания значение модуля общей деформации увеличивается в 2,5–3,0 раза при естественной влажности, равной 7–8 %. На нижней границе уплотнённой зоны (5,5 м) модуль общей деформации возрастает в 1,5–2,0 раза, чем тот же показатель грунта в естественном состоянии до уплотнения.

При водонасыщении модуль общей деформации уплотнённого грунта меняется незначительно – в верхних слоях на 1 %, а в нижнем слое – в 1,5 раза, тогда как модуль деформации неуплотнённого грунта уменьшается в 3–5 раз.

На основании проведённых исследований можно сделать вывод о том, что уплотнение грунтов тяжёлыми трамбовками позволяет создать прочное, устойчивое к водонасыщению, грунтовое основание. Это даёт возможность предложить замену свайных фундаментов на фундаменты мелкого заложения на уплотнённом лёссовом основании. Экономическое сравнение вариантов в рамках одного сооружения на уровне расхода материалов, несомненно, в пользу варианта фундаментов мелкого заложения.

С 1991 года и по настоящее время проводятся исследования изменения микроструктуры лёссовых пород (на примере лёссовых грунтов Приобского плато) под влиянием различных механических воздействий. В ходе проведения экспериментов оценивались в лабораторных условиях микроструктурные изменения грунта под влиянием компрессионного уплотнения и сопротивления сдвигу при естественной влажности и в состоянии полного водонасыщения грунта. Кроме того, выполнялись микроструктурные исследования лёссового грунта, уплотнённого обычными и тяжёлыми трамбовками, а также под воздействием штампа-фундамента.

Подготовка образцов грунта для электронно-микроскопических исследований выполняется на приборе ВУП-5 методом вакуумной морозной сушки. Просмотр образцов и получение РЭМ-изображений микроструктуры выполняется на растровом электронном микроскопе при увеличениях от 350 до 5000 раз.

Проведённые микроструктурные исследования грунта под влиянием компрессионного уплотнения позволяют констатировать, что микроструктура под влиянием компрессионного сжатия претерпевает большие изменения. Общая пористость снизилась с 48 до 40 %. Исчезли крупные межзерновые и межмикроагрегатные поры, их размер уменьшился по сравнению с исходным образцом с 35 до 20 мкм. Преобладают по количеству тонкие внутримикроагрегатные микропоры изометричной и щелеобразной формы в среднем шириной до 0,2 мкм. Это подтверждается увеличением общего периметра пор в уплотнённом образце на 20 %, что говорит об увеличении числа мелких внутримикроагрегатных пор. Значительно уменьшились размеры всех категорий пор, и появилась тонкая микропористость. Преимущественно угловатая форма минеральных зёрен свидетельствует об интенсивном дроблении твёрдых компонентов структуры и общем уплотнении грунта. Это объясняется возникновением больших напряжений при сжатии на контактах между минеральными зёрнами, приводящих к механическому дроблению и раскалыванию твёрдых структурных элементов. Тип структуры грунта после компрессии не изменился и остался скелетным.

Главный вывод выполненных работ – деформируемость грунта в процессе передачи компрессионной нагрузки обуславливается как сближением структурных элементов между собой, так и их разрушением.

Изменение микроструктуры грунта под воздействием динамического уплотнения проводилось на образцах лёссового грунта, отобранных с экспериментальной площад-

ки после уплотнения тяжёлой трамбовкой весом 100 кН. Грунт экспериментальной площадки имеет физико-механические характеристики, характерные для лёссовых суглинков юга Западной Сибири с I типом просадочности.

Микроструктура грунта, уплотнённого тяжёлой трамбовкой повышенного веса, резко меняется. До глубины 3 м микроструктура грунта приобретает признаки скелетно-матричной структуры, характеризующейся более высокой плотностью по сравнению с природной скелетной структурой. Исчезает крупная пористость, а преобладающие мелкие внутриагрегатные поры приобретают щелевидную форму с шириной раскрытия 0,5 мкм. Наблюдается ориентация структурных элементов в плоскости, перпендикулярной направлению действия ударной нагрузки.

Обнаружилось совершенно новое явление – дробление глобул, агрегатов и их расплющивание. Увеличивается количество мелких элементов как результат разрушения первичного материала. С увеличением глубины (более 3 м) микроструктура грунта вновь приобретает признаки природной скелетной со значительным уменьшением плотности. По сравнению с природной структурой видно, что глубже 3 м каких-либо значительных её изменений не происходит.

Основные выводы микроструктурных исследований грунта под воздействием уплотнения трамбовками повышенного веса (100 кН):

1. Уплотнение лёссового грунта тяжёлыми трамбовками приводит к коренному изменению его микроструктуры. Под влиянием динамического уплотнения идёт интенсивное разрушение глобул и агрегатов, их расплющивание, перемещение и сближение основных элементов лёссового грунта – песчано-пылеватых частиц и глинистого материала. Формируется новая скелетно-матричная структура, отличающаяся от природной степени уплотнения, минимальной и относительной однородной пористостью, более плотной упаковкой элементарных частиц. Изменения в микроструктуре с глубиной становятся менее заметны и внизу уплотнённого слоя структура грунта имеет незначительные отличия от природной.

2. Микроструктурные исследования свидетельствуют о том, что при трамбовании тяжёлыми трамбовками в лёссовом грунте развиваются 2 процесса: разрушение сложившихся структурных связей и формирование новых. В результате происходит устранение просадочных свойств лёссового основания и увеличение его прочностных и деформационных характеристик. Это позволяет рассматривать устройство фундаментов зданий и сооружений на лёссовом уплотнённом основании как вариант замены дорогостоящих, например, свайных фундаментов.

Учёт деформационной анизотропии лёссовых грунтов в расчётах основания является одним из важных вопросов, т.к. её степень и характер в лёссовых грунтах проявляется особенно отчётливо. Поставленную задачу можно сформулировать как задачу о совершенствовании методов расчёта лёссовых грунтовых оснований по предельным состояниям и прогнозировании осадок и просадок жёстких фундаментов с учётом анизотропных свойств лёссовых грунтов.

Анализ проведённых экспериментальных исследований подтвердил существование и наличие деформационной анизотропии лёссовых грунтовых образцов. Экспериментально установлено, что показатель, оценивающий деформационную анизотропию исследованных грунтов, в среднем равнялся 1,97.

Полученные результаты расчётно-теоретических исследований напряжённо-деформированного состояния лёссовых анизотропных оснований, которые проводились на ЭВМ методом конечных элементов с применением методики математического планирования эксперимента, показали, что в характерных зонах лёссового основания с изменением показателя, оценивающего деформационную анизотропию, происходит существенное изменение горизонтальных и касательных напряжений, что отражается на степени приближения напряжённого состояния этих зон к предельному по прочности, влияет на величину расчётного сопротивления грунта и, следовательно, на размеры подошвы фундамента.

Существующие модели осадки грунта носят, в основном, эмпирический характер и, в связи с этим не отражают в явной форме изменения структуры грунта при его нагружении. Учёт в математических моделях структурных изменений грунта позволяет резко повысить уровень их интерпретируемости и достоверности.

Разработан вариант имитационной модели, учитывающей структурно-текстурные особенности лёссовых грунтов в условиях сплошного распространения нагрузки. На первых стадиях нагрузки происходит интенсивное разрушение оболочки частиц, увеличивается количество раздробленных частиц. При этом сокращается объём пор, приходящихся на одну фракцию. На второй стадии нагрузки дробление частиц замедляется, происходит формирование новой микроструктуры, характеризующейся «слипанием» частиц между собой, их агрегирование, что обуславливает дальнейшее уменьшение объёма пор.

Экспериментальные данные по изменению микроструктуры совместно с использованием функции пористости (компрессионных кривых) позволили моделировать осадки грунта в рамках имитационной модели. На этой основе составлен алгоритм модели: осадка лёссового грунта определяется в предположении постоянства площади основания образца грунта. Рассчитанные по предложенной модели осадки удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными.

Проведённые исследования позволили составить для лёссовых грунтов Западной Сибири таблицу нормативных и расчётных деформационных и прочностных характеристик лёссовых грунтов, которая применяется проектировщиками при проектировании оснований зданий и сооружений.

После статистического обобщения усреднённых физико-механических, прочностных и деформационных характеристик лёссовых просадочных супесей составлена таблица их изменений. Проведённые исследования лёссовых грунтов (супесей) в основаниях длительно эксплуатируемых сооружений на юге Западной Сибири в условиях естественной влажности позволили получить эмпирические зависимости с высокими коэффициентами корреляции, что доказывает статистическую связь, близкую к функциональной.

На основании выполненных исследований сделаны следующие выводы:

1. Срок эксплуатации сооружений коренным образом влияет на процесс дальнейшего формирования структуры лёссового грунта. До 15 лет эксплуатации сооружений происходит интенсивное разрушение агрегатов, уменьшение общей пористости, сближение структурных элементов с общей ориентацией за счёт процессов уплотнения. После 20 лет происходит формирование новой более прочной структуры, подтверждённое фундаментальными исследованиями микроструктуры, прочности индивидуальных контактов и процессов разрушения агрегатов. Выявлено, что до 20 лет эксплуатации сооружений тип и класс структуры лёссового грунта не изменяются (скелетный, зернисто-пленчатый), с формированием новой микроструктуры изменяется её тип (матричный), но класс остаётся тем же.

2. Проведённые исследования позволили установить увеличение прочностных и снижение деформационных характеристик в основаниях длительно эксплуатируемых сооружений. При этом просадочные грунты оснований естественной влажности становятся непросадочными лишь по достижению определённого срока эксплуатации (более 15 лет). Синерезис (процесс старения) является основной причиной формирования новой структуры лёссового грунта за счёт уменьшения толщины сульфатных оболочек под действием молекулярных сил притяжения между частицами при 20 годах эксплуатации. С дальнейшим увеличением сроков эксплуатации сооружений никаких существенных изменений не происходит.

3. Для лёссовых грунтов оснований (супесей) установленные региональные зависимости изменения прочностных и деформационных характеристик от сроков эксплуатации сооружений позволяют значительно (до 40 %) увеличить нагрузку на существующие фундаменты без их усиления и реконструкции.

4. Зависимости изменения характеристик лёссовых грунтов оснований рекомендуются проектным организациям для предварительных, а также окончательных расчётов фундаментов сооружений до II класса включительно.

Технический отчёт (состав)

При проведении инженерно-геологических изысканий в районах распространения просадочных грунтов следует устанавливать и отражать в техническом отчёте:

- распространение и приуроченность просадочных грунтов к определённым геоморфологическим элементам и формам рельефа;
- наличие внешних признаков проявления просадочности грунтов (просадочные блюдца, поды, ложбины и пр.);

- мощность толщи просадочных грунтов и её изменения по площади;
- цикличность строения толщи просадочных грунтов (чередование горизонтов лёссовых пород и погребённых почв, периодичность изменений свойств грунтов по глубине и т.п.);
- особенности структуры (макропористость, пылеватость, агрегированность и пр.) и текстуры (слоистость, трещиноватость, наличие конкреций, скоплений гипса и пр.), интенсивность вскипания от 10 %-ной HCl;
- специфические характеристики просадочных грунтов (относительная деформация просадочности, начальное просадочное давление, начальная просадочная влажность);
- гранулометрический состав (с различными схемами подготовки к анализу);
- деформационные и прочностные характеристики грунтов при полном водонасыщении и при природной влажности;
- изменения показателей свойств по простирацию и глубине просадочной толщи;
- величины просадок от собственного веса (включая послепросадочные деформации) и тип грунтовых условий по просадочности, границы распространения участков с различным типом грунтовых условий по просадочности;
- наличие и характер возможных источников замачивания лёссовой толщи;
- аварийные ситуации, ремонтные или восстановительные работы, связанные с развитием просадочных явлений;
- применявшиеся типы и конструкции фундаментов и сооружений, их техническое состояние, наличие и характер деформаций, вызванных просадочными явлениями;
- применявшиеся при строительстве в районе работ методы полного или частичного устранения просадочности грунтов (противофильтрационные мероприятия, применение тяжёлых трамбовок, искусственное закрепление грунтов, предварительное замачивание и др.) с оценкой их эффективности;
- положение и параметры экранирующих покрытий;
- расположение и состояние сети водонесущих коммуникаций (водопровод, канализация, теплотрассы, ливневые водостоки), очистных сооружений, существующая система их эксплуатации и борьбы с утечками.

По результатам изысканий должны быть даны рекомендации по учёту основных особенностей просадочных грунтов (просадочного процесса) при освоении территории и проектировании объектов строительства.

Литература

1. Критерий оценки длительной устойчивости откосов на основе анализа процесса образования и развития областей пластических деформаций / А.Н. Богомолов [и др.] // Актуальные проблемы геотехники: сборник статей, посвящённый 60-летию профессора А.Н. Богомолова. – Волгоград : Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет, 2014. – С. 41–52.
2. Отыскание областей пластических деформаций в основании заглубленного ленточного фундамента в рамках приближённого решения упругопластической задачи / А.Н. Богомолов [и др.] // Актуальные проблемы геотехники: сборник статей, посвящённый 60-летию профессора А. Н. Богомолова. – Волгоград : Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет, 2014. – С. 52–60.
3. Значения коэффициента бокового давления грунтов в предельном состоянии / А.Н. Богомолов [и др.] // Актуальные проблемы геотехники: сборник статей, посвящённый 60-летию профессора А.Н. Богомолова. – Волгоград : Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет, 2014. – С. 66–73.
4. Богомолов А.Н. Рекомендации по назначению коэффициентов запаса для грунтовых откосов и оснований при определении их устойчивости / А.Н. Богомолов [и др.] // Актуальные проблемы геотехники: сборник статей, посвящённый 60-летию профессора А.Н. Богомолова. – Волгоград : Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет, 2014. – С. 90–97.
5. Денисенко В.В. Исследование природы сжимаемости глинистых грунтов / В.В. Денисенко, П.А. Ляшенко // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). – 2013. – № 3. – С. 65–68.
6. Макаренко Н.А. Реконструкция свайных фундаментов путем введения дополнительных бурильно-инъекционных свай // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). – 2021. – № 4. – С. 131–135.

7. Пантюшина Е.В. Лёссовые грунты и инженерные методы устранения их просадочных свойств // Ползуновский вестник. – 2011. – № 1. – С. 127–130.
8. Работинская Т.И. Расчётное моделирование сезонного изменения температурных полей в мёрзлом грунте, окружающем теплоизолированный газопровод / Т.И. Работинская, И.В. Шишкин, А.С. Кузьбожев // Булатовские чтения. – 2020. – Т. 4. – С. 139–142.
9. Стефанов Р.Е. Анализ состояния магистрального газопровода и моделирование системы «газопровод – массив грунта» // Технические и технологические системы: материалы XIII Международной научной конференции «ТТС-22» (22–24 ноября 2023 года, Краснодар). – Краснодар : ООО «Издательский Дом – Юг», 2023. – С. 315–323.
10. Стефанов Р.Е. Практическое значение глинистых грунтов для инженерно-геологической оценки и анализ процессов их набухания // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). – 2023. – № 4. – С. 195–205.
11. Стефанов Р.Е. Классификация песчаного и глинистого грунта // Булатовские чтения. – 2024.
12. Цымбалов А.А. Выявление слабых волновых полей в возбудимых грунтовых средах // Булатовские чтения. – 2019. – Т. 2. – С. 213–217.

References

1. Bogomolov A.N. A criterion for assessing the long-term stability of slopes based on the analysis of the process of formation and development of areas of plastic deformation / A.N. Bogomolov [et al.] // Current problems of geotechnics: a collection of articles dedicated to the 60th anniversary of Professor A.N. Bogomolov. – Volgograd : Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering, 2014. – P. 41–52.
2. Bogomolov A.N. Finding areas of plastic deformation at the base of a buried strip foundation within the framework of an approximate solution of an elastoplastic problem / A.N. Bogomolov [et al.] // Current problems of geotechnics: a collection of articles dedicated to the 60th anniversary of Professor A.N. Bogomolov. – Volgograd : Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering, 2014. – P. 52–60.
3. Bogomolov A.N. Values of the coefficient of lateral soil pressure in the limit state / A.N. Bogomolov [et al.] // Current problems of geotechnics: a collection of articles dedicated to the 60th anniversary of Professor A.N. Bogomolov. – Volgograd : Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering, 2014. – P. 66–73.
4. Bogomolov A.N. Recommendations for assigning safety factors for soil slopes and foundations when determining their stability / A.N. Bogomolov [et al.] // Current problems of geotechnics: a collection of articles dedicated to the 60th anniversary of Professor A.N. Bogomolov. – Volgograd : Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering, 2014. – P. 90–97.
5. Denisenko V.V. Investigate the nature of the compressibility of clay soils / V.V. Denisenko, P.A. Ljashenko // Science. Engineering. Technology (polytechnical bulletin). – 2013. – № 3. – P. 65–68.
6. Makarenko N.A. Reconstruction of pile foundations by introducing additional drilling-injection piles // Science. Engineering. Technology (polytechnical bulletin). – 2021. – № 4. – P. 131–135.
7. Pantyushina E.V. Loess soils and engineering methods for eliminating their subsidence properties // Polzunovsky Bulletin. – 2011. – № 1. – P. 127–130.
8. Rabotinskaya T.I. Numerical modeling of seasonal changes in temperature fields in frozen soil surrounding a thermally insulated gas pipeline / T.I. Rabotinskaya, I.V. Shishkin, A.S. Kuzbozhev // Readings of A.I. Bulatov. – 2020. – Vol. 4. – P. 139–142.
9. Stefanov R.E. Analysis of the state of the main gas pipeline and modeling of the «gas pipeline – soil mass» system // Technical and technological systems: materials of the XIII International Scientific Conference «TTS-22» (November 22–24, 2023, Krasnodar). – Krasnodar : LLC «Publishing House – South», 2023. – P. 315–323.
10. Stefanov R.E. Practical significance of clayey soils for engineering-geological assessment and analysis of their swelling processes // Science. Engineering. Technology (polytechnical bulletin). – 2023. – № 4. – P. 195–205.
11. Stefanov R.E. Classification of sandy and clayey soil // Readings of A.I. Bulatov. – 2024.
12. Tsymbalov A.A. Identification of weak wave fields in excitable groundwater environments // Readings of A.I. Bulatov. – 2019. – Vol. 2. – P. 213–217.