

## **ВЗАИМОСВЯЗЬ МИКРОСТРУКТУРНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ, СТРУКТУРНОЙ ПРОЧНОСТИ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЛЕССОВЫХ ГРУНТОВ**

Е.И. Вяткина, И.В. Карелина, М.А.Осипова

*Приводятся количественные изменения микроструктуры просадочного грунта. Прослеживается динамика изменения ее основных структурных элементов под влиянием тяжелой трамбовки. Показана взаимосвязь структурной прочности и деформационных характеристик грунтов основания.*

*Ключевые слова: грунт, трамбовка, микроструктура, частица, количественный анализ, структурная прочность, физико-механические характеристики.*

Все возрастающие темпы строительства, освоение новых территорий, реконструкция зданий и сооружений, возведение объектов повышенной этажности, сложной конфигурации в плане с разнообразными видами техногенных нагрузок на грунты основания, приводят к нарушению природного равновесия и образованию новой экосистемы, которая в дальнейшем положительно или отрицательно влияют на окружающую среду. Надежное прогнозирование изменений геологической среды под влиянием техногенных нагрузок возможно только на основании результатов комплексных исследований грунтов и, в первую очередь, их прочностных и деформационных свойств, характерных для определенного вида грунтов.

Одной из особенностей лессовых грунтов Приобского Плато юга Западно-Сибирской плиты, является преобладание на указанной территории I типа грунтовых условий по просадочности, что диктует необходимость изучения их структурно-текстурных особенностей с учетом специфики региона.

Многие ученые, внесшие большой вклад в исследование структур грунтов: К.Терцаги, А.Казагранде, М.М.Филатов, В.И.Осипов, В.В.Охотин, И.В.Попов, Е.М.Сергеев, А.К.Ларионов, отмечают важность комплексного изучения структуры для научного обоснования прогноза прочности и деформационного поведения глинистых пород, а так же изменение их свойств под воздействием различных факторов. Однако, до настоящего времени остаются не решенными вопросы взаимосвязи микроструктурных особенностей лессовых грунтов, их структурной прочности и физико-механических свойств.

С сентября 1991 г. на кафедре «Основания, фундаменты, инженерная геология и геодезия» АлтГТУ проводились эксперименталь-

ные микроструктурные исследования уплотненного лессового просадочного грунта трамбовками массой 3,2 и 7 тонн. Образцы грунта отбирались с экспериментальной площадки, расположенной в юго-западной части г.Барнаула в квартале 2001. Размер опытной площадки составил 9×9 метров. В геоморфологическом отношении район расположен на Приобском плато с превышением дневной поверхности над урезом левобережья р.Оби от 50 до 60 м. Грунтовые воды в районе экспериментальной площадки в пределах выработок глубиной до 20 м не обнаружены. Основанием зданий и сооружений в пределах этой территории являются суглинки и супеси. Суглинки относятся к группам I типа по просадочности. При замачивании под давлением, равным природному, просадка их практически близка к нулю; при замачивании под нагрузкой 0,3 МПа суглинки проявляют просадочные свойства.

Подготовка поверхности образцов для микроструктурных исследований выполнялась способом изготовления аншлифов. Далее подготовка образцов грунта выполнялась в вакуумном универсальном посту ВУП-5 методом мгновенного замораживания с последующей их сушкой путем вакуумного сублимирования. В качестве электропроводного покрытия на образцы грунта вакуумным термическим осаждением наносилось серебро, а для улучшения электропроводности контакта исследуемой поверхности со смотровым столиком боковые поверхности образца промазывались электропроводным клеем.

Далее выполнялись снимки поверхности образцов грунта растровым электронным микроскопом TESLABS300 с последующим сканированием и оцифровкой. В связи с тем, что при одном фиксированном увеличении РЭМ-изображения невозможно охватить весь диапазон структурных элементов глинистой

## ВЗАИМОСВЯЗЬ МИКРОСТРУКТУРНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ, СТРУКТУРНОЙ ПРОЧНОСТИ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЛЕССОВЫХ ГРУНТОВ

породы как полидисперсной системы, РЭМ-фотографии выполнялись с увеличением от 50 до 3000 раз, т.е. перекрывающие весь диапазон встреченных размеров элементов грунта. Для исследования микроструктуры лессового грунта опытной площадки в природном состоянии отбирались образцы до глубины 6 м через каждый метр (рисунок 1).



Рисунок 1 – Микроструктура лессового грунта в естественном состоянии,  $\times 350$

На первом этапе эксперимента, после уплотнения площадки трамбовкой массой 3,2 т, отбирались образцы грунта до глубины 7 м для определения физико-механических характеристик уплотненного основания и микроструктурных исследований.

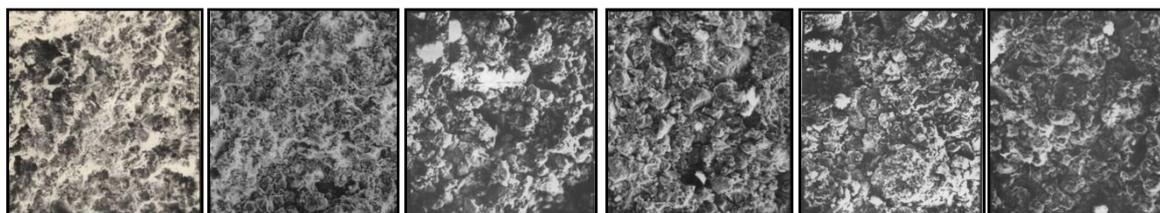
По внешнему осмотру микрофотографий (рисунок 2 а, б) структура уплотненного грунта претерпела изменения, по сравнению с природной, только в образцах с поверхности и с глубины 0,5 м. На снимках с этих горизонтов четко различима зернисто-пленчатая структура скелетно-матричного типа. Уменьшилась общая пористость, исчезли крупные межагрегатные поры, преобладают изометричные поры размером 5-10 мкм. Отмечается уменьшение размеров твердых структурных элементов до 10–25 мкм за счет их механического разрушения. Произошло перераспределение глинистого материала: глинистые «рубашки» глобул частично разрушены и отмечается наличие почти сплошной глинистой массы (матрицы), в которой содержатся бес-

порядочно расположенные пылеватые и песчаные зерна. Все это говорит о получении более однородной и плотной микроструктуры скелетно-матричного типа по сравнению с природной. Изменение показателя плотности сухого грунта и коэффициента пористости подтверждают эффективность уплотнения только до глубины 0,5 м. Если грунт естественного сложения с поверхности имел значения  $\rho_d = 1,41 \text{ г/см}^3$  и  $e = 0,922$ , то после трамбования  $\rho_d = 1,65 \text{ г/см}^3$  и  $e = 0,624$ .

На снимках образцов уплотненного грунта с глубины от 1 до 3 м (рисунок 2, в–е) видно, что в строении грунта нет существенных изменений по сравнению с РЭМ-изображением образца природного сложения (рисунок 1). Тип структуры – скелетный, класс – зернисто-пленчатый. Твердые структурные элементы представлены округлыми глинисто-пылеватыми агрегатами и песчано-пылеватыми зёрнами диаметром от 10 до 50 мкм. Контакты между частицами точечные через глинистые связки. Глинистый материал расположен на поверхности глобул и в местах контактов зерен и микроагрегатов. Отсутствуют признаки разрушения природной структуры грунта.

Поровое пространство, как и в природном грунте, представлено крупными межмикроагрегатными порами, размер которых определяется размером зерен и агрегатов. Показатели плотности сухого грунта ( $\rho_d$ ) и коэффициентов пористости ( $e$ ) с глубины от 1 до 3 м имеют значения близкие к грунту в естественном залегании.

Трамбование лессовых просадочных грунтов выполняется прежде всего для устранения их склонности к просадочным деформациям. Относительная просадочность грунта природного сложения и уплотненного трамбовкой массой 3,2 т равны соответственно 0,095 и 0,089, что говорит о невозможности устранения просадочных свойств грунта с применением трамбовок такой массы.



а)  $\times 350$       б)  $\times 350$       в)  $\times 350$       г)  $\times 350$       д)  $\times 350$       е)  $\times 350$

Рисунок 2 – Микроструктура лессового грунта после уплотнения трамбовкой массой 3,2 тонн на различной глубине: а) с поверхности площадки; б) глубина 0,5 м; в) глубина 1,0 м; г) глубина 1,5 м; д) глубина 2,0 м; е) глубина 3,0 м

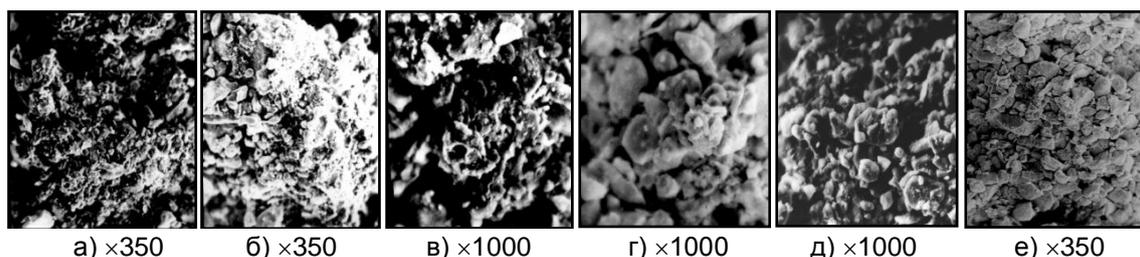


Рисунок 3 – Микроструктура лессового грунта после уплотнения трамбовкой массой 7 тонн на различной глубине: а) глубина 1,0 м; б) глубина 2,0 м; в) глубина 3,0 м; г) глубина 4,0 м; д) глубина 5,0 м; е) глубина 6,0 м

Следовательно, все вышесказанное позволяет сделать вывод, что уплотнение лессового основания трамбовкой 3,2 т сказалось на микроструктурных и прочностных особенностях грунта только на поверхности площадки и глубине 0,5 м и подтверждает малую эффективность уплотнения лессового грунта трамбовками такого веса.

На втором этапе эксперимента, после уплотнения площадки тяжелой трамбовкой массой 7 т, отбирались образцы грунта через каждый метр до глубины 6 м. Выполнялось определение физико-механических характеристик и микроструктурных особенностей грунта на каждом горизонте (рисунок 3), при этом микроструктура образцов грунта описывалась качественно и проводился количественный анализ РЭМ-изображений с помощью разработанной на кафедре «Основания, фундаменты, инженерная геология и геодезия» программы «Promik».

В результате компьютерного анализа по программе «Promik» были получены данные морфометрических и геометрических характеристик лессового просадочного грунта по двум группам: порового пространства и частиц (твердых составляющих структуру грунта: глобул, микроагрегатов, зерен и т.п.) в виде гистограмм распределения и роз ориентации. Все результаты были сведены в таблицы данных микроструктурной обработки РЭМ-изображений, по которым были построены графики зависимости средней площади элементов и вероятности максимальной ориентации от глубины.

#### Результаты обработки РЭМ-изображения грунта по частицам.

По результатам компьютерного анализа частиц лессового грунта можно проследить изменение структуры грунта, в зависимости от глубины уплотняемой толщи, от матричного (1–2 м) до скелетного (4–6 м) типа (рисунок 3). Так, на глубине до 2 метров воздействие динамических импульсов при уплотнении трамбовкой массой 7 т привело к дроблению частиц на более мелкие элементы – глобулы,

агрегаты, – с диаметром 0,4÷3 мкм. Их число среди общего количества составляет определяющее положение. На РЭМ-изображениях (рисунок 3, а, б) хорошо визуально наблюдается некоторое расплющивание отдельных глобул и агрегатов лессового грунта. В образцах встречаются и довольно крупные частицы с диаметром 20÷30 мкм, но их число не велико. По суммарным площадям на этих глубинах лидируют элементы с диаметром 16÷25 мкм. По результатам количественного анализа очертания частиц на глубине 1–2 м имеют довольно изрезанную неправильную форму, что является результатом частичного разрушения элементов структуры грунта под воздействием динамического уплотнения. На это же указывает наблюдаемая слабая ориентация частиц –  $P_{\max \text{ оп.}} = 0,130 \div 0,321$  при низком содержании не ориентируемых элементов – 0÷12 %.

На глубине 3 м отмечается постепенное уменьшение влияния уплотнения на структурные характеристики лессового просадочного грунта с глубиной. Поверхность элементов остается такой же изрезанной, но форма их становится все более близкой к округлости. Это подтверждается снижением величин  $P_{\max \text{ оп.}} = 0,145 \div 0,151$  и устойчивостью показателя процентного содержания не ориентируемых элементов – 9%. Все это позволяет оценить микроструктуру уплотненного грунта на глубине 3 м как скелетно-матричную.

С увеличением глубины грунта с 4 до 6 м структура грунта все более приближается к природному сложению. Сказывается постепенное прекращение влияния трамбовки массой 7 т на дробление твердых составляющих элементов лессового грунта. Вследствие этого структуру грунта на глубине 4–6 м можно отнести к скелетному типу (по В.И. Осипову) [1].

В целом исследуемые образцы грунта можно охарактеризовать как слабо ориентируемые, хотя по снижению показателя максимальной ориентации частиц можно гово-

ритель об изменении структуры грунта от более уплотненной толщи – менее 1 м, до постепенного прекращения влияния динамики ударов трамбовки – до 6 м и закономерно более.

#### **Результаты обработки РЭМ-изображения грунта по порам.**

Изменение структуры лессового просадочного грунта от матричного (глубина 1–2 м) до скелетного (4–6 м) типов с переходным этапом на глубине 3 метра так же хорошо прослеживается при количественном анализе порового пространства образцов.

До глубины 3 м средний диаметр пор не превышает в целом 3,5 мкм. Среди общего количества элементов число мелких пор велико – даже по доле суммарных площадей они занимают лидирующее положение. Это объясняется тем, что грунт приобрел более плотную структуру.

Начиная с глубины 3 м, элементы порового пространства начинают постепенно увеличиваться в размерах. Эти изменения хорошо прослеживаются на графике зависимости средней площади пор от глубины взятия образцов грунта, уплотненного трамбовкой массой 7 т. Вероятность максимальной ориентации пор резко снижается почти до глубины 3 м, а далее наблюдается постепенное уменьшение этого показателя. Все это говорит о постепенном прекращении влияния уплотнения трамбовкой массой 7 т с глубины 3 м. При этом микроструктура лессового грунта на глубине 3 м может рассматриваться как переходный этап между двумя наблюдаемыми структурами: матричной и скелетной.

Исследования лессового грунта на микроуровне были продолжены с 2007 г. по настоящее время изучением **структурной прочности лессовых супесей и суглинков и ее изменение в зависимости от физико-механических свойств грунтов.**

Анализируя более 400 компрессионных кривых, полученных в ходе лабораторных исследований образцов ненарушенной структуры лессового грунта, были построены усредненные компрессионные кривые для грунтов оснований экспериментальных площадок. Сопоставляя усредненные графики компрессионных кривых между собой отчетливо видно, что все кривые имеют идентичное очертание и две ярко выраженных точки перегиба.

Обработка полученных графиков проводилась методом математического моделирования. Для определения точек перегиба были получены функции уравнений регрессии усредненных компрессионных кривых. Компрессионные кривые описывались аппроксимирующей зависимостью при величине дос-

товерности аппроксимации близкой к единице. Уравнения регрессии были дважды продифференцированы и приравнены к 0, после чего были получены 2 корня решений этих дифференцированных уравнений, которые и являются точками перегиба усредненных компрессионных кривых. Первый корень соответствует первой точке перегиба – величине  $p_{str}$  – структурной прочности лессовых грунтов оснований, а второй – значению давления, при котором наступает стабилизация компрессионных кривых, т.е. с увеличением давления  $p$  коэффициент пористости  $e$  практически не изменяется.

По показателю текучести исследуемые грунты можно подразделить на:

- суглинки твердые; суглинки полутвердые; суглинки тугопластичные;
- супеси твердые; супеси пластичные.

Несомненное влияние на структурную прочность лессовых грунтов оказывает показатель текучести. Он отражает влияние на структурную прочность исследуемых пород не только влажности грунта в естественном состоянии, но и таких производных физических характеристик как влажности на границе раскатывания и текучести, числа пластичности. Коэффициент пористости исследуемых пород изменяется в довольно широких пределах: в суглинках от 0,50 до 0,84, в супесях от 0,44 до 0,91. Как известно при инженерно-геологической оценке глинистых пород большое значение имеет пористость, т.к. она характеризует их естественную уплотненность и склонность к деформациям.

На основании выполненных исследований были построены графики зависимости структурной прочности лессовых суглинков и супесей от плотности, коэффициента пористости, удельного сцепления и угла внутреннего трения при различных показателях текучести.

**По результатам исследований для изученных грунтов** установлена тесная связь между структурной прочностью и такими характеристиками как коэффициент пористости, удельное сцепление и угол внутреннего трения. Здесь коэффициенты корреляции близки к 1, что свидетельствует о возможности использования значений коэффициента пористости, удельного сцепления и угла внутреннего трения для определения структурной прочности лессовых суглинков и супесей.

Структурная прочность лессовых супесей и суглинков в зависимости от коэффициента пористости увеличивается при уменьшении показателя текучести, а структурная прочность лессовых твердых супесей меньше структурной прочности лессовых твердых суглинков

при одинаковом коэффициенте пористости.

Существующие нормативы дают противоречивые рекомендации относительно условия определения нижней границы сжимаемой толщи грунта при расчете осадок фундаментов, что позволяет утверждать о необходимости более глубокого изучения проблемы расчетов деформаций фундаментов и определения прочностных и деформационных характеристик грунтов. Одним из перспективных направлений в данной проблеме является учет структурной прочности грунтов основания.

При расчете деформаций оснований по существующей методике – методу элементарного послойного суммирования – определение нижней границы сжимаемой толщи является весьма условным: нижняя граница сжимаемой толщи основания принимается на глубине, где выполняется условие  $\sigma_{zp} \leq 0,2\sigma_{zg}$  при модуле общей деформации  $E \leq 5$  МПа (здесь  $\sigma_{zp}$  – дополнительное вертикальное напряжение на глубине  $z$  по вертикали, проходящей через центр подошвы фундамента;  $\sigma_{zg}$  – вертикальное напряжение от собственного веса грунта). Однако, еще в 1956 г. Н.А. Цытовичем было предложено определять границу сжимаемой толщи грунта с учетом структурной прочности грунта, поэтому большое значение для практики имеет нахождение зависимости между физико-механическими характеристиками и величиной структурной прочности  $p_{str}$  грунтового основания, а также ее использование в деформационных расчетах с учетом региональных особенностей. По Н.А. Цытовичу, нижняя граница сжимаемой толщи грунтового основания определяется из условия равенства значения напряжения от дополнительной нагрузки  $\sigma_{zp}$  и величины структурной прочности  $p_{str}$ . Применение этого метода позволяет более точно определить зависимость между нагрузками, передаваемыми на основания зданий и сооружений и величиной деформации данных оснований. В этом случае расчетная модель достаточно полно отражает реальные свойства грунтов и явления, происходящие в грунтовых основаниях при воздействии внешних нагрузок.

На основе проведенных исследований лессового грунта Верхнего Приобья (на примере г. Барнаула) можно сделать следующие **выводы**:

1. Под влиянием уплотнения лессового грунта трамбовкой массой 3,2 т не происходит принципиального изменения структуры грунта глубже 0,5 м и не достигается уплотненной зоны необходимой мощности. Проведенные микроструктурные исследова-

ния и данные по плотности, пористости грунта и модуля деформации подтверждают малую эффективность уплотнения лессового грунта трамбовками массой 3,2 т.

2. Уплотнение лессового грунта тяжелыми трамбовками массой 7 т приводит к коренному изменению его микроструктуры. Под действием динамической нагрузки происходит максимальное сближение элементарных частиц грунта, сопровождающееся процессом частичного и полного разрушения агрегатов и микроагрегатов. В результате максимального уплотнения формируется новая матричная структура, отличающаяся от природной минимальной и относительно однородной пористостью массы взаимно заклинившихся частиц, получивших наиболее плотную упаковку и увеличение числа контактов между ними. Это приводит к устраниванию просадочных свойств лессового основания и повышению его прочностных и деформационных характеристик.

3. Исследование уплотненного грунта на микроструктурном уровне позволило проследить динамику изменения основных структурных элементов лессового грунта – песчано-пылеватых частиц, глинистого материала и пористости на различных горизонтах уплотненной толщи.

4. Полученная взаимосвязь структурной прочности и деформационных характеристик грунтов основания при расчете сжимаемой зоны грунта позволяет более полно отразить реальные свойства грунтов и явления, происходящие в грунтовых основаниях при воздействии внешних нагрузок.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Осипов, В. И. Микроструктура глинистых пород / В. И. Осипов, В. Н. Соколов, Н. А. Румянцев; под ред. Е. М. Сергеева. – М. : Недра, 1989. – 211 с.

2. ГОСТ 12248-2010. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости. – М. : Стандартинформ, 2012.

**Вяткина Е.И.** – к.г.-м.н., доцент, Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова.

**Карелина И.В.** – к.т.н., доцент, Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова.

**Осипова М.А.** – к.г.-м.н., доцент, Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, e-mail: stf-ofigig@mail.ru.