

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ ХАРАКТЕРИСТИК МИКРОСТРУКТУРЫ ЛЕССОВОГО ПРОСАДОЧНОГО ГРУНТА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Е.И. Вяткина

Одними из наиболее структурно чувствительных свойств глинистых грунтов являются компрессионное уплотнение и сопротивление грунтов сдвигу. Являясь доступными и освоенными в лабораторных условиях, компрессионные и сдвиговые испытания позволяют не только получить деформационные и прочностные характеристики грунта при неоднократном повторении опыта, но и проследить динамику микроструктурных изменений породы при различных нагрузках и влажностях.

Микроструктурные характеристики грунта и их изменение под влиянием механических воздействий исследовались с применением растрового электронного микроскопа и автоматизированного анализа РЭМ-изображений.

Исследования выполнялись на образцах лессового просадочного суглинка верхней краснодубровской подсвиты г. Барнаула (Q_3krd_3). Суглинки желто-бурого цвета, макропористые, пылеватые, 1 типа по просадочности.

Исходное микростроение грунта характеризуется однородной структурой с рыхлым равномерно пористым "скелетом" (рисунок 1, а). Сложена зернами и глинисто-пылеватыми агрегатами с максимальным размером до 250 мкм. Преобладают глобулы со средним диаметром 20-50 мкм. Расположение глинистого материала, в основном, на поверхности зерен и в местах контактов агрегатов в виде глинистых связей.

I. Изменение микроструктурных характеристик грунта при компрессионном уплотнении.

Для получения микроструктурных характеристик образцы грунта после компрессионного уплотнения исследовались в двух направлениях - параллельно и перпендикулярно приложенной нагрузке после передачи давления 0,1, 0,2 и 0,3 МПа.

Общая пористость грунта составляет 48,5%, а поровое пространство на 85% состоит из межзернистых и межмикроагрегатно-зернистых микропор изометричной формы: крупные со средним диаметром 36,4 мкм, мелкие - диаметром 4,8 мкм, макропоры со

средним диаметром от 100 до 479 мкм. Наиболее многочисленная категория пор - межультрамикроагрегатные диаметром от 0,08 до 0,1 мкм. Ориентация структурных элементов отсутствует.

Все это, в целом, позволяет отнести микроструктуру лессового грунта природного сложения к скелетному типу (по В.И. Осипову).

Микроструктура лессового грунта естественной влажности.

Микроструктура лессового грунта естественной влажности после уплотнения нагрузкой 0,1 МПа (рисунок 1, б) однородная; основным типом твердых структурных элементов, как и в грунте естественного сложения, являются зерна и глинисто-пылеватые агрегаты (глобулы) круглой формы средним размером 10-45 мкм.

Общая пористость грунта в плоскости, перпендикулярной приложению нагрузки, снизилась до 42,9% (таблица 1), а основная часть порового пространства, по-прежнему, представлена крупными порами, максимальный диаметр которых снизился до 386 мкм. Отмечается увеличение числа ультрамикропор и тонких микропор.

В плоскости, параллельной направлению компрессионного давления, также отмечается уменьшение морфометрических показателей элементов микроструктуры грунта по сравнению с исходным образцом и несущественное отличие от аналогичных показателей в плоскости, перпендикулярной нагрузке (таблица 1). С уменьшением среднего периметра пор увеличивается общий периметр в обеих взаимно перпендикулярных плоскостях.

При компрессионной нагрузке 0,2 МПа (рисунок 1, в) общая пористость грунта снизилась до 41,7% в направлении, перпендикулярно нагрузке, и до 41,2% в направлении, параллельном нагрузке.

Произошло уменьшение числа агрегатов и зерен размеров крупно- и мелкопесчаной фракции и одновременное увеличение содержания частиц более мелких фракций (таблица 2). Это говорит о происходящем процессе разрушения крупных агрегатов.

Основными твердыми структурными ком-

понентами грунта по-прежнему являются агрегаты округлой формы и зерна, размер которых колеблется от 8 до 40 мкм. Глинистые частицы располагаются в виде пленок на первичных зернах и в составе глинисто-пылеватых агрегатов, тонкопылеватый и

глинистый материал встречается в виде отдельных скоплений чешуйчатой и изометричной формы размером 3-5 мкм. Выявлено уменьшение размеров всех категорий пор.

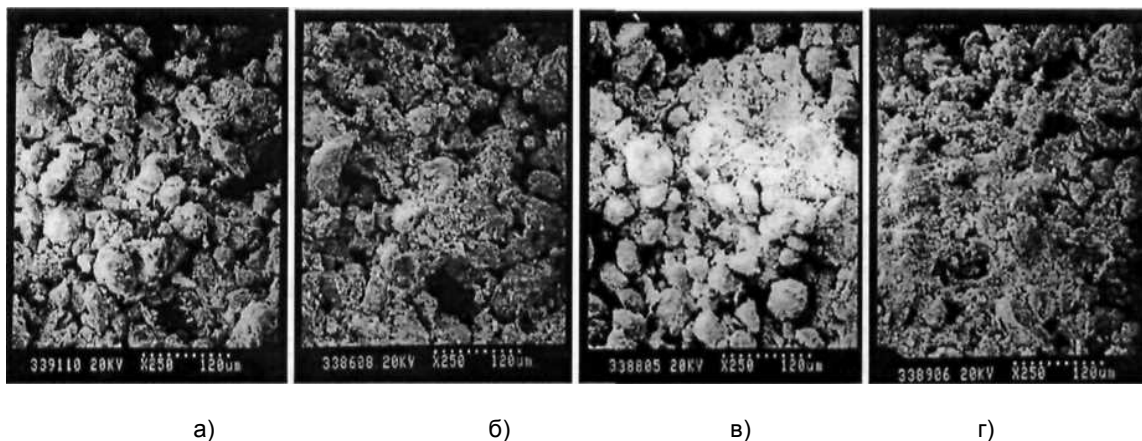


Рис. 1. РЭМ-фотографии лессового грунта, увеличение снимков $\times 250$: а) в естественном состоянии (эталонный образец); б) после компрессионного уплотнения при давлении $P = 0,1$ МПа; в) при компрессионном уплотнении при давлении $P = 0,2$ МПа; г) при компрессионном уплотнении при давлении $P = 0,3$ МПа

Таблица 1
Результаты количественного анализа пористости микроструктуры лессового грунта по РЭМ-изображениям

Наименование показателя	Природное сложение	После компрессионного уплотнения при давлении:					
		$P = 0,1$ МПа		$P = 0,2$ МПа		$P = 0,3$ МПа	
		\perp	//	\perp	//	\perp	//
грунт естественной влажности							
Пористость, %	48,51	42,99	42,29	41,79	41,24	40,89	40,48
Общая площадь пор, мкм^2	1093490	995367	966913	953111	944036	959398	933969
Общий периметр пор, 10^6 мкм	5,54646	5,38821	5,74413	6,03925	5,92043	6,6401	5,93965
Средний диаметр пор, мкм	0,340	0,295	0,298	0,273	0,258	0,192	0,228
Средняя площадь пор, мкм^2	0,767	0,448	0,410	0,384	0,338	0,326	0,329
Средний периметр пор, мкм	2,497	2,431	2,092	2,101	1,900	1,836	1,621
Коэффициент анизотропии, %	3,1	0,9	4,4	5,7	6,5	5,3	7,3
водонасыщенный грунт							
Пористость, %	48,51	40,98	40,06	40,79	39,56	39,52	38,58
Общая площадь пор, мкм^2	1093490	894407	825211	850309	794677	817364	783900
Общий периметр пор, 10^6 мкм	5,54646	4,95329	4,18102	4,45398	3,58432	4,1221	2,51728
Средний диаметр пор, мкм	0,340	0,199	0,199	0,187	0,191	0,207	0,189
Средняя площадь пор, мкм^2	0,767	0,192	0,218	0,158	0,222	0,168	0,200
Средний периметр пор, мкм	2,497	1,536	1,446	1,454	1,351	1,402	1,254
Коэффициент анизотропии, %	3,1	1,9	5,1	4,4	6,2	4,2	7,1

Примечание. \perp , // - микроструктурные данные определены по сечению, соответственно перпендикулярному и параллельному направлению приложения нагрузки.

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ ХАРАКТЕРИСТИК МИКРОСТРУКТУРЫ ЛЕССОВОГО ПРОСАДОЧНОГО ГРУНТА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

После повышения нагрузки до 0,3 МПа (рисунок 1, г) микроструктура лессового грунта сложена зернами и микроагрегатами размером от 7 до 30 мкм. Крупные зерна покрыты пленкой из глинистых частиц, тогда как мелкие зерна имеют угловатую и плохоокатанную форму. Значительно увеличилось количество тонкопылеватого и глинистого материала.

Общая пористость грунта снизилась до 40% (таблица 1). Поровое пространство на 85% сложено мелкими и крупными межзернистыми и межмикроагрегатными микропорами и макропорами изометричной формы с максимальным диаметром 217-428 мкм. Преобладают по количеству ультрамикропоры и межмикроагрегатные микропоры изометричной и щелевидной формы с шириной раскрытия от 0,2 до 0,6 мкм.

Произошло уменьшение средней площади, среднего диаметра и среднего периметра пор (таблица 1) с одновременным ростом общего периметра пор до $6,640 \times 10^6$ мкм, что говорит об увеличении числа мелких пор по сравнению с природной структурой.

Существенное уменьшение размеров всех категорий пор и значительное увеличение тонкой микропористости наряду с преимущественно угловатой формой минеральных зерен говорит об интенсивном разрушении твердых компонентов структуры вследствие больших напряжений при сжатии на контактах между минеральными зернами, приводящих к механическому дроблению зерен и агрегатов.

Микроструктурные данные хорошо согласуются с изменением физико-механических показателей и гранулометрического состава уплотненного грунта. По сравнению с грунтом в естественном состоянии компрессионно уплотненный грунт имеет более высокие значения плотности сухого грунта и коэффициента пористости: $\rho_d = 1,373 \text{ г/см}^3$ и $e = 0,973$ - для неуплотненного грунта и $\rho_d = 1,478 \text{ г/см}^3$ и $e = 0,827$ - для грунта, уплотненного при $P = 0,3 \text{ МПа}$.

При компрессионном уплотнении в глинистых грунтах происходит переориентация структурных элементов перпендикулярно направлению действия нагрузки (таблица 3), с увеличением давления происходит постепенное возрастание коэффициента анизотропии пор грунта (K_a) в плоскости, параллельной направлению приложения нагрузки от 3,1% (у эталонного образца) до 7,3% (в образце, уплотненном при нагрузке 0,3 МПа). На микроструктурных снимках грунта при меньшем

давлении (0,1-0,2 МПа) ориентация структурных компонентов практически отсутствует.

Изложенные выше данные позволяют говорить о переходе структуры лессового грунта, уплотненного при давлении 0,3 МПа, от скелетной к структуре скелетно-матричного типа.

Микроструктура лессового водонасыщенного грунта.

При замачивании лессового грунта под давлением $P = 0,1 \text{ МПа}$ в структуре грунта происходят заметные изменения. Как видно из РЭМ-фотографий (рисунок 2, а), основным типом структурных элементов, как и в эталонном образце, являются глинисто-пылеватые агрегаты и первичные зерна, покрытые глинистыми частицами, с максимальным размером до 250 мкм, средний размер 15-50 мкм. Однако, очертания этих структурных элементов теряют первоначальную четкость, становятся расплывчатыми. Появляются отдельные скопления глинистого материала, заполняющего межмикроагрегатные поры, который является продуктом разрушения неводостойких глинисто-пылеватых агрегатов и глинистых оболочек первичных минеральных частиц.

Как следует из микроструктурных снимков и результатов автоматизированного анализа пористости (таблица 1), общая пористость грунта снизилась до 40%. Основная часть порового пространства представлена крупным и мелкими межмикроагрегатными порами максимальным диаметром 228,8 мкм, средний диаметр пор составляет 0,19 мкм. Для грунта естественного сложения эти показатели равны соответственно 479 и 0,34 мкм. Размеры внутриагрегатных ультрамикропор и тонких микропор изменились незначительно в сравнении с исходным образцом, но их число возросло в 4 раза. Отмечается уменьшение общей площади пор с 1093490 кв. мкм до 825211 кв. мкм ; аналогичное происходит с общим периметром пор - снижается с $5,546 \times 10^6$ до $4,181 \times 10^6$ мкм.

По внешнему осмотру РЭМ-фотографий микроструктуры грунта, замоченного под давлением $P = 0,2 \text{ МПа}$ (рисунок 2, б) видно, что структура сложена микроагрегатами и первичными зернами со средними размерами 10-40 мкм и максимальным размером до 200 мкм. Наблюдается дальнейшее "размокание" под давлением неводостойких агрегатов и частичное разрушение первичных песчано-пылеватых зерен, что подтверждается уменьшением процентного содержания данных структурных элементов по результатам

гранулометрического и микроагрегатного анализов (таблица 2).

На снимках значительно увеличилась площадь участков, занятая сплошной глинистой массой, в которой видны включения минеральных зерен. Глинистое вещество агрегировано, контактирование микроагрегатов идет по типу базис-скол и скол-скол. По характеру структурных связей преобладают контакты коагуляционного и переходного типа. Наблюдается незначительное увеличение ориентации структурных элементов в плоскости, параллельной направлению приложения нагрузки ($K_a = 6,2\%$).

По данным количественного анализа поровое пространство в основном складывается мелкими и крупными межмикроагрегатными и межзерновыми микропорами изометричной и анизометричной формы с максимальным диаметром 153 мкм. Преобладают по количеству тонкие внутримикроагрегатные микропоры анизометричной формы в среднем шириной 0,7 мкм. Общая пористость грунта снизилась до 40%.

Структуру грунта при данной нагрузке уплотнения можно отнести к переходному типу - скелетно-матричному - от разрушающейся скелетной к формирующейся более плотной матричной микроструктуре.

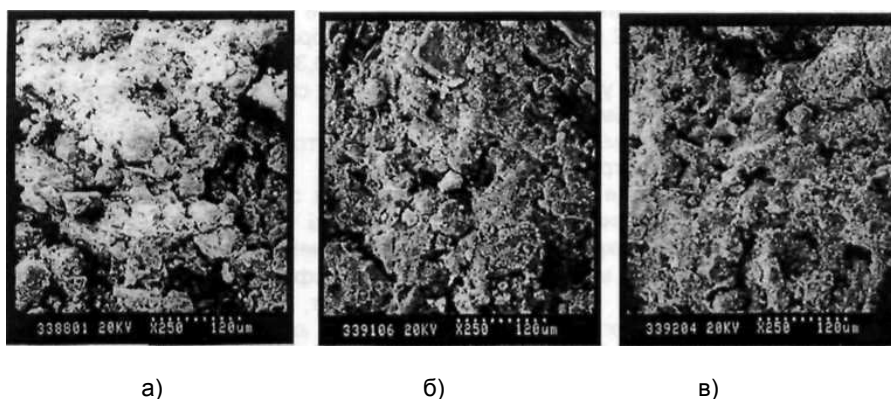


Рис. 2. РЭМ-фотографии лессового грунта после компрессионного уплотнения и замачивания, увеличение снимков x250: а) при давлении 0,1 МПа; б) при давлении 0,2 МПа; в) при давлении 0,3 МПа

Таблица 2
Результаты гранулометрического анализа и коэффициенты микроагрегативности лессового просадочного суглинка после компрессионного уплотнения

Характеристика грунта	Вид анализа	Содержание частиц (%) диаметром (мм)					
		1-0,25	0,25-0,05	0,05-0,01	0,01-0,005	0,005-0,001	<0,001
Лессовый суглинок, природное сложение	гран.	1,6	30,4	41,3	6,8	10,2	9,7
	микр.	8,4	57,9	27,9	2,1	2,8	0,9
Лессовый суглинок после компрессионного уплотнения, P = 0,1 МПа	гран.	1,0	26,2	41,5	10,8	7,6	12,9
	микр.	7,8	51,8	29,4	2,8	5,9	2,3
То же, P = 0,2 МПа	гран.	0,9	23,1	44,9	9,7	10,3	11,3
	микр.	6,5	41,1	30,0	5,0	7,8	3,6
То же, P = 0,3 МПа	гран.	0,9	21,4	44,3	9,5	11,9	12,4
	микр.	5,2	45,0	31,2	5,5	8,3	4,8
Лессовый суглинок после компрессионного уплотнения и замачивания, P = 0,1 МПа	гран.	1,0	24,5	41,5	9,0	9,8	14,2
	микр.	8,1	48,1	29,6	4,9	4,8	4,5
То же, P = 0,2 МПа	гран.	0,8	19,9	40,4	9,8	13,2	15,9
	микр.	6,3	42,7	29,8	6,3	8,3	6,6
То же, P = 0,3 МПа	гран.	0,7	15,5	42,1	11,1	14,1	16,5
	микр.	4,0	35,6	32,0	8,5	10,8	9,1

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ ХАРАКТЕРИСТИК МИКРОСТРУКТУРЫ ЛЕССОВОГО ПРОСАДОЧНОГО ГРУНТА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

При замачивании лессового просадочного грунта под давлением 0,3 МПа в ходе компрессии происходит резкое изменение микроструктуры образца по сравнению с природной структурой (рисунок 2, в). В результате замачивания под нагрузкой грунт как бы "оплывает" и представляет собой сплошную тонкодисперсную массу (матрицу), сложенную изометричными по форме мелкими глинисто-пылеватыми агрегатами и беспорядочно расположенными пылеватыми и песчаными зёрнами размером 5-15 мкм. Отмечается наличие отдельных более крупных зёрен округлой формы размером до 30-40 мкм, тогда как

мелкие зёрна имеют угловатую и плохощанную форму. Микроагрегаты имеют сложное строение и состоят из ультрамикроагрегатов глинистых частиц, контактирующих по типу базис-базис и базис-скол. Ультрамикроагрегаты изометричной и анизометричной формы сложены глинистыми частицами, контактирующими базальными плоскостями. Толщина ультрамикроагрегатов изменяется от 0,5 до 1 мкм, а их длина составляет 2-3 мкм. По типу контактов преобладают структурные связи коагуляционного и переходного типа.

Таблица 3

Изменение коэффициента анизотропии (K_a) и коэффициента формы пор (K_f) лессового грунта под влиянием компрессионного уплотнения

Наименование показателя	Грунт в естествен. состоянии	После компрессионного уплотнения при давлении:					
		P = 0,1 МПа		P = 0,2 МПа		P = 0,3 МПа	
		⊥	//	⊥	//	⊥	//
грунт естественной влажности							
Коэффициент анизотропии пор K_a , %	3,1	0,9	4,4	5,7	6,5	5,3	7,3
Коэффициент формы пор K_f , %:							
минимальный	0,195	0,176	0,171	0,135	0,152	0,191	0,127
максимальный	0,935	0,947	0,931	0,904	0,902	0,917	0,866
среднее значение	0,582	0,539	0,545	0,525	0,546	0,509	0,478
водонасыщенный грунт							
Коэффициент анизотропии пор K_a , %	3,1	1,9	5,1	4,4	6,2	4,2	7,1
Коэффициент формы пор K_f , %:							
минимальный	0,195	0,164	0,153	0,165	0,164	0,134	0,174
максимальный	0,935	0,917	0,939	0,922	0,945	0,942	0,889
среднее значение	0,582	0,502	0,464	0,541	0,472	0,484	0,460

Примечание. ⊥, // - микроструктурные данные определены по сечению, соответственно перпендикулярному и параллельному направлению приложения компрессионной нагрузки.

Количественный анализ РЭМ-изображений показал, что поровое пространство грунта сформировано мелкими и крупными межмикроагрегатными порами, на долю которых приходится до 98% общей измеренной пористости, которая составляет 39%. Мелкие поры имеют изометричную и анизометричную форму со средним диаметром 5 мкм. Они преобладают среди межмикроагрегатных пор. Реже встречаются крупные изометричные микропоры со средним эквивалентным диаметром 30 мкм. Максимальный размер макропор снизился до 159-282 мкм.

Наиболее многочисленными в структуре межчастичными анизометричными ультрамикропорами с эквивалентным диаметром 0,06-0,08 мкм и площадью 0,003-0,005 кв. мкм.

Все выше сказанное иллюстрирует коренные изменения, происходящие в лессовом грунте при замачивании под давлением и, как результат, переход скелетной микроструктуры в более плотную и однородную матричную (по В.И. Осипову).

По данным гранулометрического анализа (таблица 2) и расчетам содержания структурных элементов, хорошо прослеживается

постепенное уменьшение количества агрегатов по мере возрастания компрессионного давления. Так, в неуплотненном грунте общее количество агрегатов составляет 34,3%, в том числе размеров крупно- и мелкопылеватой фракции соответственно 6,8% и 27,5%.

После замачивания при давлении $P = 0,3$ МПа общее количество агрегатов уменьшилось в 1,5 раза и составляет 21,4%, в том числе размеров крупно- и мелкопылеватой фракции соответственно 2,3% и 19,1%. Снижение агрегативности грунта по мере увеличения компрессионной нагрузки приводит к понижению процента мелкоглинистых частиц, входящих в состав агрегатов (с 90% у эталонного образца до 45% у грунта, уплотненного при 0,3 МПа) с одновременным ростом степени их свободы соответственно с 9% до 55%.

Все это свидетельствует о том, что замачивание лессового грунта под давлением приводит к существенному изменению структуры грунта.

Изменение коэффициента анизотропии (K_a) и коэффициента формы пор (K_f) (таблица 3) показывает, что при замачивании грунта под нагрузкой, как и при уплотнении грунта естественной влажности, форма пор по мере увеличения нагрузки постепенно трансформируется в анизометричную в плоскости, параллельной направлению прикладываемой нагрузки.

Коэффициент анизотропии увеличивается с 3,1% до 7,1% с одновременным уменьшением значений коэффициента формы, что показывает процесс формирования анизометричных эллипсоидных и щелевидных пор. Очевидно, это происходит в результате поворота частиц грунта в положение, перпендикулярное давлению.

Данные по изменению микроструктурных характеристик лессового грунта при его замачивании под нагрузкой напрямую связаны с изменениями его физико-механических показателей. Отмеченное по результатам количественного анализа снижение общей пористости и размеров всех категорий пор грунта, а также переход скелетной структуры в более плотную матричную являются причиной изменения таких показателей как плотность сухого грунта и коэффициент пористости. По сравнению с грунтом в естественном состоянии уплотненный водонасыщенный грунт имеет более высокие значения плотности сухого грунта и коэффициента пористости: $\rho_d = 1,373$ г/см³ и $e = 0,973$ - для грунта природного сложения и $\rho_d = 1,543$ г/см³ и $e = 0,743$ -

для уплотненного водонасыщенного грунта.

В целом проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Под воздействием компрессионного уплотнения микроструктура лессового грунта претерпевает значительные изменения. Происходит снижение общей пористости грунта за счет уменьшения размеров межагрегатных и внутриагрегатных пор. Одновременно идет увеличение числа ультрамикropор и тонких микropор. Это является следствием частичного разрушения основных твердых структурных элементов грунта - агрегатов и глобул за счет больших напряжений, возникающих на их контактах при сжатии грунта без возможности бокового расширения. Увеличение плотности лессового грунта в процессе передачи компрессионной нагрузки происходит не только вследствие сближения частиц при их перекомпоновке, но и в результате их разрушения.

Все отмеченные микроструктурные изменения в лессовом грунте позволяют говорить о переходе исходной скелетной микроструктуры грунта под действием компрессионного уплотнения (при $P = 0,3$ МПа) в более плотную и тонкодисперсную микроструктуру скелетно-матричного типа (по В.И. Осипову).

2. Замачивание лессового просадочного грунта под давлением $P = 0,3$ МПа приводит к коренному изменению его микроструктуры. Под действием компрессионной нагрузки и увлажнения происходит одновременно процесс распада неводостойких структурных связей и агрегатов грунта и механического разрушения твердых структурных элементов на более мелкие.

Замачивание лессового грунта, находящегося в напряженном состоянии, приводит к формированию новой, более однородной, плотной и мелкодисперсной матричной микроструктуры.

3. Анализ геометрических параметров микроструктуры образцов, компрессионно уплотненных при естественной влажности и в состоянии полного водонасыщения, по двум взаимно перпендикулярным направлениям показал постепенную трансформацию (хотя и не интенсивную) пор изометричной формы в анизометричные эллипсообразные и вытянутые. Этот процесс обусловлен частичной переориентацией твердых элементов грунта в направлении, перпендикулярном приложению вертикальной нагрузки. Особенно отчетливо это наблюдается при больших степенях нагрузки ($P = 0,3$ МПа) в грунте естественно влажности, о чем говорит рост степени пре-

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ ХАРАКТЕРИСТИК МИКРОСТРУКТУРЫ ЛЕССОВОГО ПРОСАДОЧНОГО ГРУНТА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

имущественной ориентации пор и части грунта (K_a) по мере увеличения компрессионной нагрузки от 0,1 до 0,3 МПа.

II. Изменение микроструктурных характеристик грунта при плоскостном срезе.

Результаты исследований различных авторов убедительно показывают, что при сдвиговых деформациях в глинистых грунтах происходят существенные структурно-текстурные изменения, которые с одной стороны иллюстрируют процессы, происходящие в грунте, а с другой - объясняют на микроструктурном уровне причины того или иного деформационного поведения глинистого грунта. Кроме того, разнообразие лессовых грунтов требует изучения их прочностных и деформационных свойств с учетом специфических региональных особенностей.

Анализ изменения микроструктуры грунта при консолидированном сдвиге при естественной влажности и в состоянии полного водонасыщения выполнялся для изучения влияния величины нормального давления (σ) и нагрузки при предварительном уплотнении (P) на структурные изменения в лессовом грунте при сдвиговых деформациях.

Микроструктурный анализ выполнялся на образцах, отобранных в стадии прогрессирующего скольжения при нормальном давлении 0,1, 0,2 и 0,3 МПа и предварительном уплотнении грунта нагрузками, действующими при сдвиге.

Образцы для микроструктурных исследований отбирались из краевой и центральной частей колец в плоскости сдвига и вне ее. Изменение дисперсности грунта в зоне сдвига определялось гранулометрическим анализом.

РЭМ-изображения грунта естественной влажности и водонасыщенного в плоскости сдвига при нормальном давлении 0,1-0,3 МПа приведены на рисунках 3 и 4. При небольших увеличениях ($\times 50$) выполнялся обзорный визуальный анализ структуры образца. Из полученных данных видно, что при различных нагрузках уплотнения и последующем сдвиговом деформировании в образцах отсутствует отчетливо выраженная плоскость сдвига. Однако, при больших увеличениях ($\times 300$) наблюдаются локальные трещины, полости и частицы грунта, ориентированные параллельно или под углом к направлению сдвигающей нагрузки.

Анализ структуры порового пространства (таблица 4) показал, что в районе плоско-

сти сдвига произошло увеличение общей пористости до 3% по сравнению с общей пористостью образца, причем величина этого показателя уменьшается с возрастанием нормальной нагрузки и равна для грунта естественной влажности при $\sigma = 0,1$ МПа - 45,3%, $\sigma = 0,2$ МПа - 44,7% и $\sigma = 0,3$ МПа - 43,5%; для водонасыщенного грунта соответственно 44,3%, 42,6% и 41,9%.

При анализе отдельных морфометрических показателей пористости (общего и среднего периметра пор, среднего диаметра и средней площади пор) также отмечается тенденция их уменьшения с возрастанием нормальной нагрузки и увеличение их по сравнению с аналогичными показателями вне зоны сдвига. Следует отметить, что при сдвиге водонасыщенного грунта отмечается увеличение максимальных диаметров пор с одновременным ростом числа крупных микропор ($d = 10-100$ мкм) и макропор ($d > 100$ мкм). Очевидно, это можно объяснить тем, что с увеличением величины предварительного уплотнения и нормального давления при сдвиге микроструктурная перестройка грунта захватывает тем меньший объем, чем плотнее и прочнее испытываемый образец, т.е. чем выше давление.

Диаметр ультрамикропор и тонких микропор в зоне сдвига изменился очень незначительно, однако их количество возрастает почти в 2 раза.

Данные гранулометрического и микроагрегатного анализов грунта из зоны сдвига (таблица 5) показывают, что под действием сдвигающего усилия происходит разрушение твердых структурных элементов. Так, содержание крупных агрегатов ($d > 250$ мкм) в образцах естественной влажности по данным микроагрегатного анализа при всех нормальных нагрузках уменьшилось в 3-5 раз по сравнению с их количеством до начала сдвига, а у водонасыщенного грунта в 4-10 раз.

Результаты гранулометрического анализа показывают, что дисперсность первичных песчаных и пылеватых зерен практически не изменилась по сравнению с эталонными образцами. Это объясняется значительной устойчивостью этих компонентов грунта к механическому разрушению по сравнению с менее прочными агрегатами.

Происходящая при сдвиге переориентация структурных элементов грунта иллюстрируется увеличением коэффициентов анизотропии пор (K_a) и данными по распределению пор по форме в районе зоны сдвига (K_f) (таблица 6). С возрастанием величины нормаль-

ного давления K_a объем пор анизометричной формы также увеличивается. Это объясняется тем, что с ростом плотности образцов при повышении уплотняющей нагрузки увеличивается связность грунта и сопротивление его сдвигу. Это, в свою очередь, влияет на степень переориентации элементов грунтовой

системы относительно направления сдвига. Наибольшую переориентацию испытывают частицы в более плотном грунте и при наибольшем значении сдвигающего усилия, где максимальное время воздействия сдвигающего напряжения на твердые элементы структуры грунта.

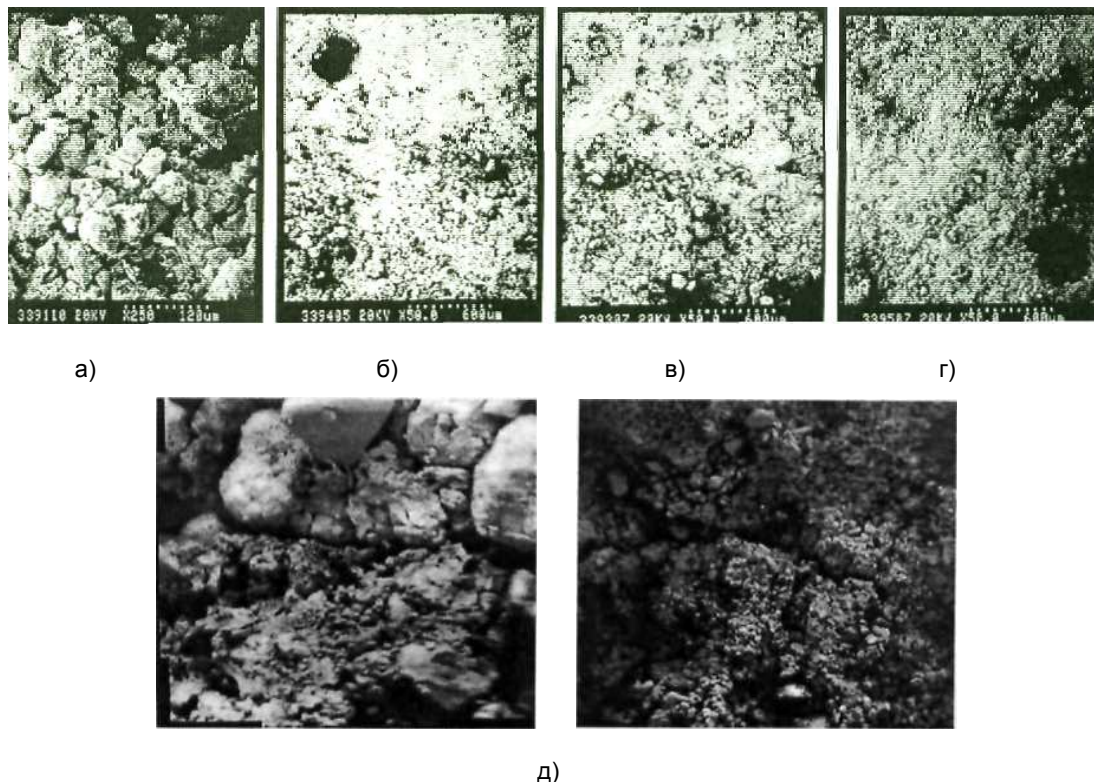


Рис. 3. РЭМ-фотографии лессового грунта, увеличение снимков $\times 50$: а) естественного сложения (эталонный образец); б) естественной влажности при консолидированном сдвиге при нормальной давлении 0,1 МПа; в) то же при нормальном давлении 0,2 МПа; г) то же при нормальном давлении 0,3 МПа; д) локальные микротрещины и разрывы, увеличение снимков $\times 3000$

Таблица 4

Результаты количественного анализа пористости лессового грунта при консолидированном сдвиге

Наименование показателя	Природное сложение	После консолидированного сдвига при нормальном давлении					
		грунт естественной влажности			водонасыщенный грунт		
		0,1 МПа	0,2 МПа	0,3 МПа	0,1 МПа	0,2 МПа	0,3 МПа
Пористость, %	48,51	45,3	44,7	43,5	44,3	42,6	41,9
Общая площадь пор, кв. мкм	1093490	977548	975090	963226	903719	898141	870869
Общий периметр пор, 10^6 мкм	5,546	6,394	6,005	5,909	5,102	5,812	4,938
Средний диаметр пор, мкм	0,340	0,199	0,187	0,190	0,255	0,195	0,178
Средняя площадь пор, кв. мкм	0,767	0,345	0,311	0,212	0,250	0,180	0,177
Средний периметр пор, мкм	2,497	2,473	2,382	2,347	1,506	1,468	1,312
Коэффициент анизотропии пор K_a , %	3,1	9,3	11,0	17,6	8,9	10,6	11,5

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ ХАРАКТЕРИСТИК МИКРОСТРУКТУРЫ ЛЕССОВОГО ПРОСАДОЧНОГО ГРУНТА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

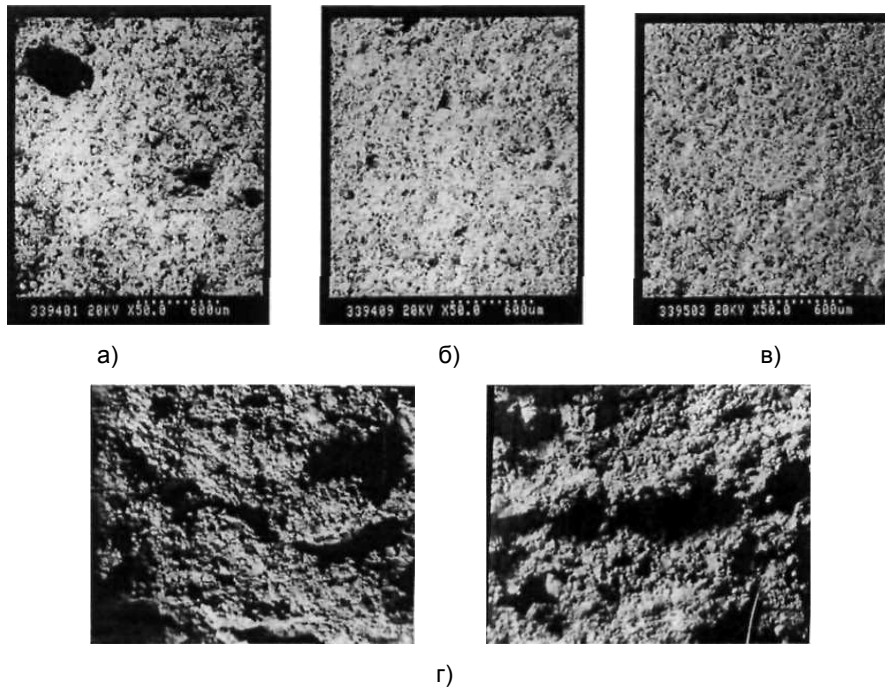


Рис. 4. РЭМ-фотографии лессового водонасыщенного грунта при консолидированном сдвиге, увеличение снимков х50: а) при нормальном давлении 0,1 МПа; б) при нормальном давлении 0,2 МПа; в) при нормальном давлении 0,3 МПа; г) локальные микротрещины и разрывы, увеличение снимков х3000

Результаты гранулометрического анализа и коэффициенты микроагрегативности лессового грунта после консолидированного сдвига

Таблица 5

Характеристика грунта	Вид анализа	Содержание частиц (%) диаметром (мм)						Коэффициенты микроагрегативности					
		1-0,25	0,25-0,05	0,05-0,01	0,01-0,005	0,005-0,001	менее 0,001	$K^{кп}$	$K^{мп}$	$K^{кпл}$	$K^{мпл}$	$K^{кг}$	$K^{мг}$
грунт естественной влажности													
Лессовый суглинок после консолидированного сдвига при $\sigma = 0,1$ МПа	гран. микр.	1,5 3,9	30,2 56,7	42,3 34,5	5,8 2,1	9,2 1,9	10,5 0,9	-2,4	-26,5	8,3	3,7	7,3	9,6
То же, $\sigma = 0,2$ МПа	гран. микр.	1,5 3,5	29,8 55,3	36,6 35,7	6,7 2,1	13,0 2,4	12,4 1,0	-2,0	-25,5	0,9	4,6	10,6	11,4
То же, $\sigma = 0,3$ МПа	гран. микр.	1,4 2,3	28,9 53,9	35,5 35,2	7,1 2,8	14,0 3,6	13,1 2,2	-0,9	-25,0	0,3	4,3	10,4	10,9
водонасыщенный грунт													
Лессовый суглинок после консолидированного сдвига при $\sigma = 0,1$ МПа	гран. микр.	1,6 3,2	25,1 51,5	44,6 37,9	6,2 3,5	10,6 2,8	11,9 1,1	-1,6	-26,4	6,7	2,7	7,8	10,8
То же, $\sigma = 0,2$ МПа	гран. микр.	1,1 2,6	25,5 49,9	38,9 36,1	10,2 3,7	11,8 4,5	12,5 3,2	-0,5	-24,4	2,8	6,5	7,3	11,3
То же, $\sigma = 0,3$ МПа	гран. микр.	0,8 1,3	23,9 47,5	37,6 36,3	11,0 4,9	12,1 5,3	14,6 4,7	-0,5	-23,6	1,3	6,1	6,8	9,9

Примечание. Коэффициенты агрегативности рассчитаны по содержанию соответствующих фракций: $K^{кп}$ и $K^{мп}$ - крупно- и мелкопесчаной; $K^{кпл}$ и $K^{мпл}$ - крупно- и мелкопылеватой; $K^{кг}$ и $K^{мг}$ - крупно- и мелкоглинистой.

Таблица 6

Изменение коэффициента анизотропии (K_a) и коэффициента формы пор (K_f) лессового грунта при консолидированном сдвиге

Наименование показателей	После консолидированного сдвига при вертикальном давлении σ					
	грунт естественной влажности			водонасыщенный грунт		
	0,1 МПа	0,2 МПа	0,3 МПа	0,1 МПа	0,2 МПа	0,3 МПа
Коэффициент анизотропии пор K_a , %	9,3	11,0	17,6	8,9	10,6	11,6
Коэффициент формы пор K_f , %:						
минимальный	0,180	0,156	0,000	0,138	0,121	0,139
максимальный	0,952	0,945	0,971	0,915	0,902	0,977
средний	0,531	0,568	0,505	0,504	0,505	0,431

Следует отметить, что абсолютные величины коэффициента анизотропии при сдвиге водонасыщенного грунта меньше, чем у грунта естественной влажности. Возможно, это объясняется утолщением гидратных пленок вокруг частиц водонасыщенного грунта и повышенной влажностью в зоне сдвига, что позволяет твердым структурным элементам "скользить" под действием сдвигающей нагрузки с меньшим углом разворота в плоскости сдвига, чем в образцах естественной влажности.

Анализ данных о распределении пор по фактору формы показывает, что с увеличением плотности образцов возрастает число пор анизометричной формы не зависимо от степени влажности грунта. Это еще раз подтверждает, что с увеличением плотности грунта и величины сдвигающей нагрузки возрастает объем структурных элементов, ориентированных в плоскости сдвига.

В целом проведенные исследования по-

зволяют сделать следующие выводы.

Изменение дисперсности грунта в районе зоны сдвига показывает, что под действием сдвигающей нагрузки происходит разрушение глинисто-пылеватых агрегатов, а содержание первичных песчаных и пылеватых зерен практически не меняется. С возрастанием величины предварительного уплотнения и нормальной нагрузки на образцы при сдвиге коэффициент анизотропии (K_a) и объем пор анизометричной формы увеличиваются. Наибольшая степень переориентации элементов отмечается в более плотных образцах грунта и наибольшем значении t .

Абсолютные величины K_a при срезе водонасыщенного грунта меньше, чем в образцах естественной влажности. Следовательно, утолщение гидратных пленок вокруг частиц водонасыщенного грунта позволяет твердым структурным элементам "скользить" под действием сдвигающей нагрузки с меньшим углом поворота в направлении действия t .