

МОДЕЛЬ ДЕФОРМАЦИИ МИКРОСТРУКТУРЫ ГРУНТА

П. А. Ляшенко – к. т. н., доцент

Кубанский государственный аграрный университет

Предложена модель деформации глинистого грунта, опирающаяся на данные одноосного сжатия. Испытание проводилось при постоянной скорости деформации и непрерывной регистрации реакции образца. Обнаружено циклическое изменение реакции, параметры которого положены в основу модели деформации. Морфологическая модель деформации позволила рассчитать размеры наиболее крупных пор, их шаг и шаг наиболее крупных зерен, число микроагрегатов глинистых частиц.

The uniaxial compression is described as the application to the microstructure soil investigation. The testing results of loam soil samples illustrate the method. The conception of deformation has been suggested based on the cyclic changing of reaction speed. The morphology model of microstructure has been given the possibility of the numerical evaluation of some model parameters such as dimension of largest pores, step of them and step of largest mineral corns and microaggregate, number of microaggregates.

Введение

Информацию о морфологии микроструктуры дают микроскопические исследования. С помощью электронного микроскопа в 1939 году Дж. Т. Розенквист установил, что глинистые частицы имеют форму протяженных пластин или листочков [1]. Многие из них объединены в микроагрегаты, обладающие большей прочностью, чем грунт в макрообъеме. Отдельные частицы и микроагрегаты разделены микропорами. Внутри микроагрегатов расстояния между частицами меньше микропор и названы ультрамикропорами [2].

"Р. Пуш (1970) обнаружил, что относительно беспорядочно расположенные частицы грунта между микроагрегатами после сдвиговых деформаций превращаются в домены с параллельным расположением частиц" [1].

"Изменение микроструктуры грунта в процессе деформирования заключается в распаде агрегатов грунта, смещении и перекомпоновке частиц, их переориентации и в развитии дефектов структуры – разрывов и нарушений связей в каркасе грунта и образовании микротрещин..." [3].

"Глинистым минералам свойственно группироваться в отдельные агрегаты до 10 мкм и блоки 50–60 мкм с упорядоченным строением внутри. В связи с этим, почти всегда отмечается слабая преимущественная ориентация частиц" [4].

Ориентация некоторых частиц изменяется под действием внешней нагрузки, причем наибольшее сопротивление оказывают частицы, наклоненные под углом 50° к поверхности максимальных касательных напряжений $t_{\max} = const$ [5].

График функции взаимодействия глинистых частиц имеет два минимума, как было установлено Shaw T. et al (1950), и это объясняет клеящие свойства (связность) глинистого грунта, дальнюю и ближнюю агрегацию и способность его сопротивляться отрыву и сдвигу [2, 6].

Ни одна из существующих моделей деформации не объясняет одновременно феномены сплошной среды и микроструктурные изменения в грунтовом теле при нагружении. По наблюдениям на границах грунтового тела можно оценить его свойства упругости, пластичности, ползучести, сжимаемости, скачкообразного изменения скорости деформации (или скорости изменения силовой реакции при заданной скорости деформации), сопротивление нагрузке частично разрушенного грунтового тела. Причем некоторые из них находятся в противоречии между собой, например, упру-

гость и сжимаемость, упругость и сопротивление тела с трещинами, сжимаемость и скачкообразное изменение скорости деформации. При уплотнении грунта после некоторого предела наступает уменьшение прочности [7].

Микроструктурные исследования дают информацию о переориентации частиц вблизи поверхности разрушения, о закрытии крупных пор, об образовании микроагрегатов частиц, о возникновении трещин отрыва в зоне сдвига, о влиянии первоначальной ориентации частиц на сопротивление грунта сдвигу. Эти явления должны быть связаны с наблюдаемыми изменениями на границах грунтового тела, на что впервые было обращено внимание Г.И. Тер-Степаняном [8], [9], и связывалось им со скачкообразным деформированием микроструктуры.

Испытания грунтов при разных схемах нагружения показали, что при постоянной скорости деформации изменение реакции грунтового тела происходит скачкообразно, а при постоянной скорости нагружения или при неизменной нагрузке скачкообразно изменяется деформация [10]. То и другое суть отражение механизма дискретной перестройки микроструктуры грунта.

В настоящей статье предлагается формализация этого механизма в виде модели деформации.

1. Проведение испытания с постоянной скоростью деформации образца грунта

Испытание образцов суглинка, сформованных при разных значениях плотности (табл. 1), на одноосное сжатие производилось с постоянной скоростью перемещения торца образца и непрерывным измерением этого перемещения и граничной реакции $p(e)$, $e = s/h$ (рис. 1).

Таблица 1 – Физические свойства образцов грунта

Номер образца	Давление формования, P_o , кПа	Влажность, W	Плотность скелета, ρ_d , г/см ³	Коэффициент пористости, e
АС-1	124	0,127	1,33	1,030
АС-5	248	0,112	1,42	0,901
АС-2	397	0,114	1,51	0,788
АС-9	595	0,101	1,65	0,636
АС-3	794	0,128	1,69	0,598
АС-8	992	0,107	1,76	0,534
АС-4	1241	0,128	1,78	0,517
АС-6	1488	0,082	1,82	0,483
АС-7	1488	0,102	1,87	0,444

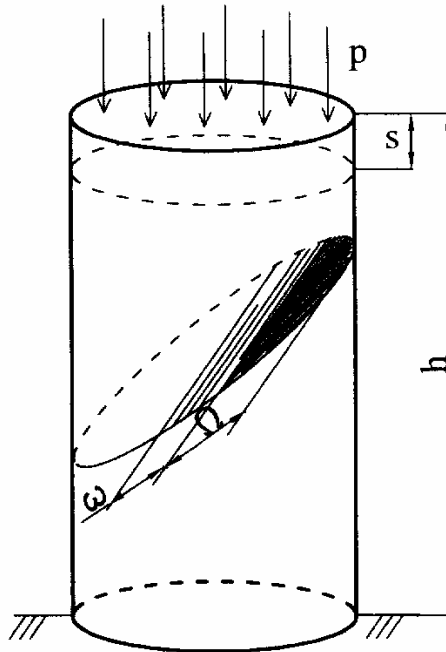


Рисунок 1 - Разрушение образца почвы при одноосном сжатии развивается по наклонной поверхности скольжения Ω , которая увеличивается в каждом цикле реакции p на величину ω

Увеличение перемещения (деформации) вызывает рост силовой реакции до разрушения образца (рис. 2).

Начальный участок кривой " $p(e) - e$ " является относительно гладким, но при заметном искривлении диаграммы хорошо виден ее немонотонный характер. Мелкие искривления вырастают на том участке испытаний, когда на поверхности образца появляются видимые трещины, которые затем сливаются в одну быстро растущую трещину. Когда длина трещины становится сравнимой с высотой образца, реакция его, в целом, перестает увеличиваться, и образец разрушается кривой сдвиговой трещиной на две части. Эта сдвиговая трещина развивается по поверхности скольжения Ω , наклоненной к оси действия сжимающей силы под углом $p/4 - j/2$ [1]. По значению разрушающего напряжения оценивается прочность грунта.

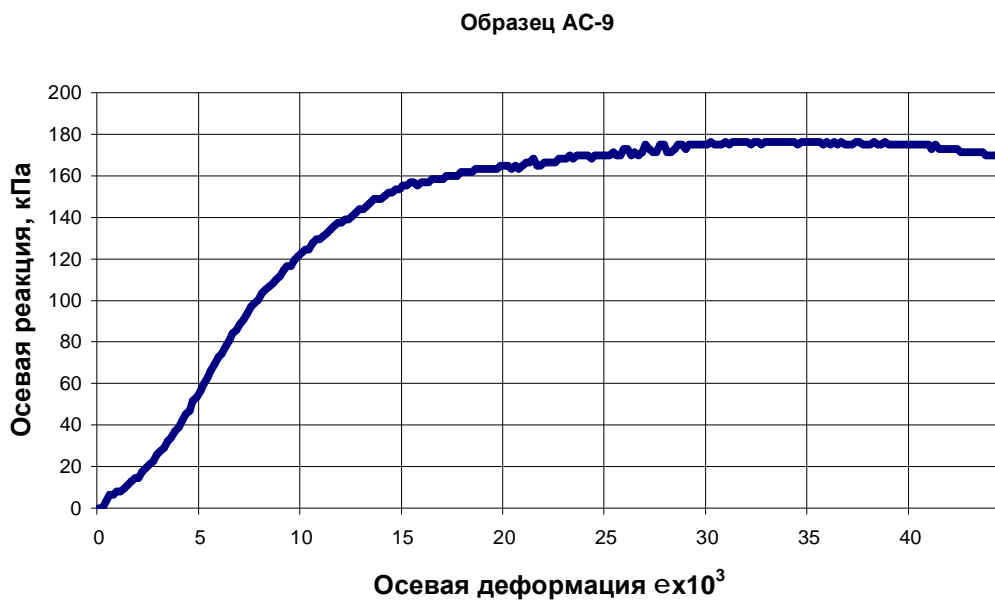


Рисунок 2 – Изменение реакции образца грунта при одноосном сжатии с постоянной скоростью деформации

Представление результатов в форме скорости изменения реакции позволяет увидеть циклический характер ее зависимости от деформации (рис. 3). Скорость изменения реакции образца в функции осевой деформации $E(e)$ рассчитывается по формуле:

$$E(e) = dp / de, \quad (1)$$

где P – реакция испытательной машины, e – относительная деформация сжатия: $e = V_e dt$, где V_e – постоянная скорость перемещения пуансона испытательной машины, t – время с начала сжатия.

Цикличность изменения реакции проявляется в изменении значений $E(e)$, повторяющихся с некоторым шагом Δe , который назовем длиной цикла:

$$\Delta e = \Delta e_e + \Delta e_r, \quad (2)$$

где Δe_e – длина восходящей ветви цикла, Δe_r – длина нисходящей ветви.

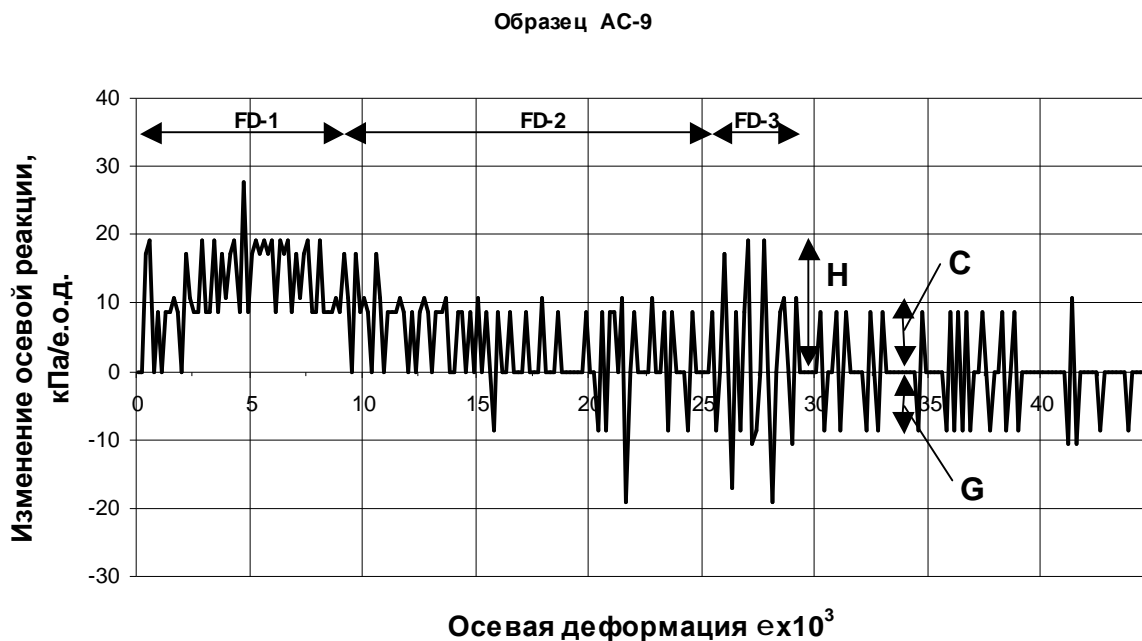


Рисунок 3 – Изменение скорости реакции образца грунта при одноосном сжатии с постоянной скоростью деформации. На

рисунке выделены фазы деформации:

FD – 1, FD – 2, FD – 3

Это изменение вызвано изменением реакции пробы, которое свидетельствует о неравномерном, циклическом, сопротивлении грунта внешней нагрузке: на восходящей ветви цикла сопротивление возрастает со скоростью E_e , на нисходящей – падает со скоростью E_r .

Как видно из рисунка 3, цикличность проявляется во всем диапазоне деформаций до разрушения пробы грунта, но в разных частях диапазона – по-разному. Можно выделить 1-ю фазу деформаций FD-1, в течение которой значения $E(e)$, изменяясь циклически, в целом снижаются, но при этом практически все значения $E(e) > 0$. Вторая фаза FD-2 характеризуется тем, что значения $E(e)$ стабилизируются в том смысле, что изменяются от нуля до некоторого, почти одного и того же, значения $E_{e.m}(e) > 0$.

Третья фаза FD-3 резко отличается от первых двух большей амплитудой значений $E(e)$ обоих знаков. FD-3 – это фаза разрушения пробы грунта, видимого невооруженным глазом, благодаря трещинам отрыва.

Наблюдения за деформацией образца при одноосном сжатии показывают, что местные разрушения начинаются вблизи торцевой грани, нагруженной пуансоном испытательной машины, затем одна трещина пересекает образец в средней части. Отсюда ясно, что формирование Ω происходит постепенно с ростом нагрузки и сопровождается колебаниями значений реакции пробы. Эти колебания имеют вид "рядовых" циклов и вид "больших" циклов, на протяжении которых амплитудные значения "рядовых" циклов изменяются также циклически.

2. Концепция сопротивления микроструктуры грунта одноосному сжатию

Противоречие между двумя основными подходами к описанию деформаций грунтового тела в том, что оценка деформаций и прочности обычно производится с помощью феноменологических характеристик, значения которых зависят от вида испытания грунта, а параметры микроструктуры, определяющие деформации и прочность независимо от вида испытания, учитываются на основе корреляций.

Новый подход к оценке деформации и прочности грунта состоит в том, что феноменологические характеристики относятся к конечному числу элементов микроструктуры и связаны со свойствами элементов соотношениями, определенными для каждого наблюдаемого на границах тела цикла деформации.

Часть упругих и все неупругие деформации грунтового тела определяются перемещениями и поворотами конечного числа элементов микроструктуры на одной или нескольких поверхностях разрушения, приращение которых происходит скачкообразно, по мере увеличения нагрузки. Все элементы микроструктуры на одном приращении поверхности разрушения имеют одно значение каждой характеристики, как феноменологической, так и микроструктурной, и одинаково сопротивляются деформации в одном цикле. Иными словами, участок приращения поверхности разрушения в одном цикле деформации играет роль домена, однородного внутри по своим физическим свойствам.

3. Экспериментальная основа концепции

Графики изменения скорости реакции и скорости деформации образцов указывают на дискретный характер деформации грунта под нагрузкой: сопротивление деформации увеличивается и уменьшается циклически

при малой длине цикла. На графиках одноосного сжатия (рис. 4) наблюдаются три типа циклов. Первый отражает изменение скорости монотонно возрастающей реакции образца, причем на отрезке Δe_e скорость возрастания больше, чем на отрезке Δe_r . Он характерен для фазы деформации FD-1. Второй тип отличается от первого тем, что на отрезке Δe_r реакция остается постоянной, что является признаком FD-2. В FD-3 преобладает третий тип циклов, отражающих возрастание реакции на Δe_e и уменьшение на Δe_r .

Восходящая ветвь цикла на отрезках Δe_e описывает возрастание сопротивления. Нисходящая на отрезках Δe_r – постоянное или убывающее сопротивление.

В FD-1 и FD-2 упругая реакция полностью не исчезает на нисходящей ветви цикла, следовательно, упругая деформация на Δe_e сменяется частично или полностью неупругой на Δe_r . В FD-1 нисходящая ветвь цикла может отражать упруго-пластично-вязкую деформацию, в FD-2 – пластично-вязкую.

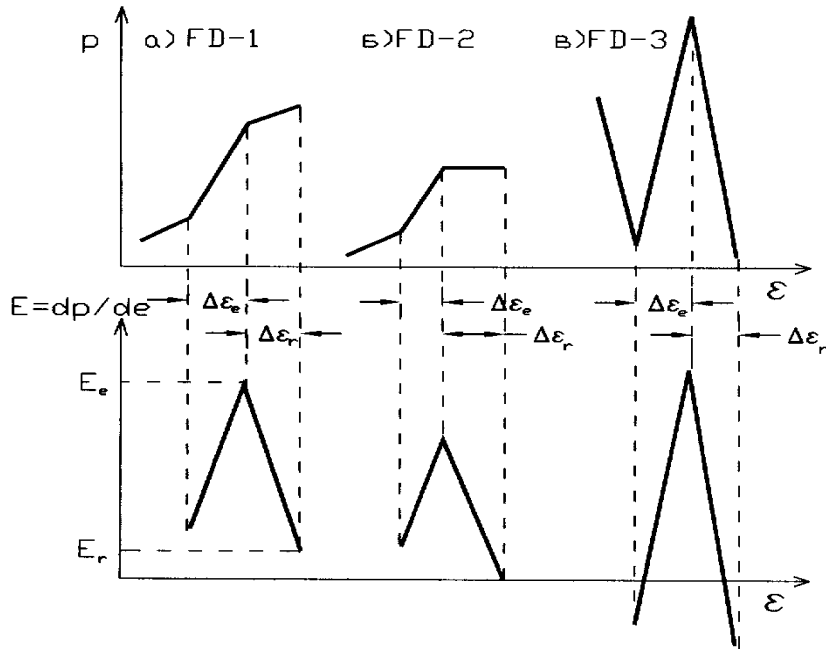


Рисунок 4 – Формы циклов изменения реакции образца и ее скорости: а) FD-1; б) FD-2 и в) FD-3

Очевидно, что поверхность сдвига проходит между микроагрегатами глинистых частиц – в зазоре, который обладает свойствами упругости, пластичности и вязкости. Придать эти свойства ему могут неагрегированные глинистые частицы, взаимодействие которых с микроагрегатами осуществляется силами, имеющими потенциальную энергию в виде функции расстояния с двумя минимумами (потенциальными "ямами") и потенциальным "барьером" между ними. Эти *контактирующие частицы* имеют возможность поворота в поле сил взаимодействия.

Тогда упругое сопротивление сдвигу будут оказывать та *контактирующая частица*, для которой большее расстояние до микроагрегата будет порядка координаты 2-ой потенциальной "ямы" – h_2 (рис. 5а). При сближении до расстояния b и переходе через потенциальный барьер (рис. 5б) *контактирующая частица* "падает" в 1-ую потенциальную "яму" (на

расстояние h_1 от ближнего микроагрегата), и ее сопротивление уменьшается, а смежные микроагрегаты получают возможность сдвига при повороте *контактирующей частицы* и дальнейшего скольжения при вязком сопротивлении жидкости в зазоре (рис. 5в).

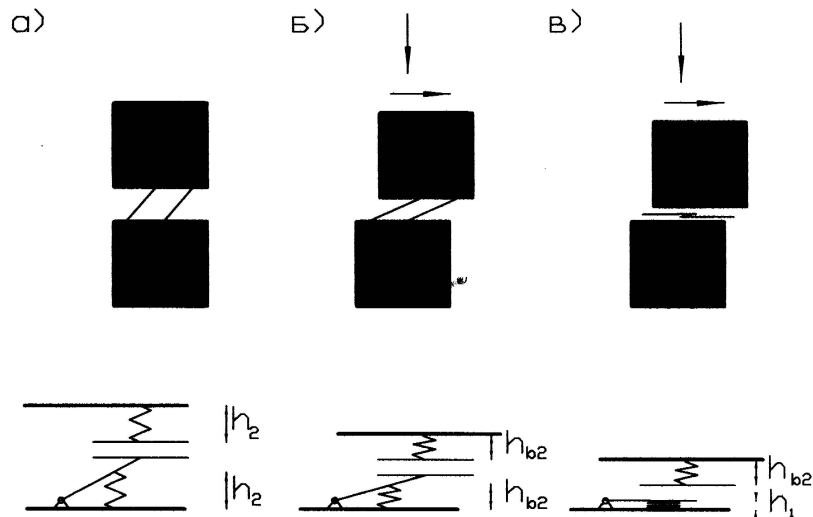


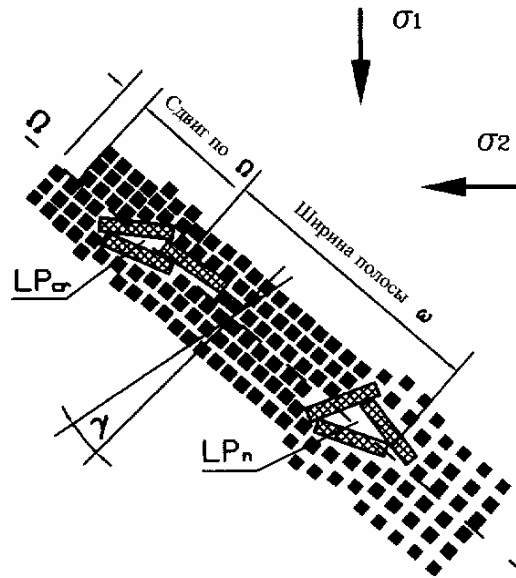
Рисунок 5 - Смежные микроагрегаты удерживаются в состоянии дальней агрегации глинистыми частицами (а), которые упруго сопротивляются сближению микроагрегатов (б) и сливаются с одним из них после преодоления энергетического барьера (в)

Скользящие микроагрегаты передают сдвигающее усилие следующим по направлению движения, их сдвиг и продолжение зазора с его свойствами упруго-пластично-вязкого сопротивления. Формируется поверхность скольжения Ω в грунтовом теле, как нарастающий зазор между микроагрегатами, в котором происходит поворот *контактирующих частиц*.

4. Учет неоднородности микроструктуры грунта

Существование цикличности реакции свидетельствует о смене механизма сопротивления микроструктуры в каждом цикле с начала испытания до разрушения образца. Очевидно, что неупругая деформация происходит лишь в ограниченной части образца, поскольку он сохраняет свою форму, и длина циклов ограничена.

Предположим, что рубежами смены циклов являются природные неоднородности грунта – *наиболее крупные поры*, образованные крупными частицами (зернами неглинистых минералов) без цементационных связей, и *наиболее крупные частицы* (зерна неглинистых минералов), находящиеся в однородной массе глинистых частиц и их микроагрегатов и попавшие на поверхность разрушения $t_{\max} = t_{\lim}$. Если при увеличении внешней нагрузки несколько наиболее крупных пор одновременно попали на фронт поверхности скольжения Ω , то происходит их одновременное разрушение, которое приводит к сдвигу примыкающих к Ω слоев микроагрегатов, что фиксируется на границе тела как перемещение Δs_r и изменение реакции пробы на Δp_r . Дальнейшее увеличение внешней нагрузки приводит к росту напряжений в окрестностях группы наиболее крупных пор, образующих новый фронт поверхности Ω , на котором касательные напряжения достигнут предельного значения, и который отстоит от первого на расстоянии, равном среднему расстоянию между наиболее крупными порами (рис. 6). При этом перемещение граничной поверхности на Δs_e сопровождается увеличением реакции образца на Δp_e .



■ микроагрегаты ▨ песчаные и пылеватые зерна

Рисунок 6 – Микроструктура грунта разрушается вдоль поверхности скольжения, которая пересекает наиболее крупные поры и слои микроагрегатов между ними: LP_n – наиболее крупная пора; LP_σ – то же, после разрушения (закрытия).
Остальное поле рисунка должно быть заполнено микроагрегатами и минеральными зёрнами

Поверхность скольжения увеличивается скачком на величину W – полосу шириной, равной расстоянию между **наиболее крупными порами** M_3 (рис. 7). Каждый скачок воспринимается прибором как перемещение на Ds_r на нисходящей ветви цикла деформации. Если полоса W ограничена **наиболее крупными зёрнами**, то в очередном цикле деформации резко возрастают значения Δp_e на восходящей ветви (торможение слоя микроагрегатов) и Δp_r на нисходящей ветви – при разгрузке напряжений на

фронте Ω при образовании трещины отрыва за наиболее крупными зернами.

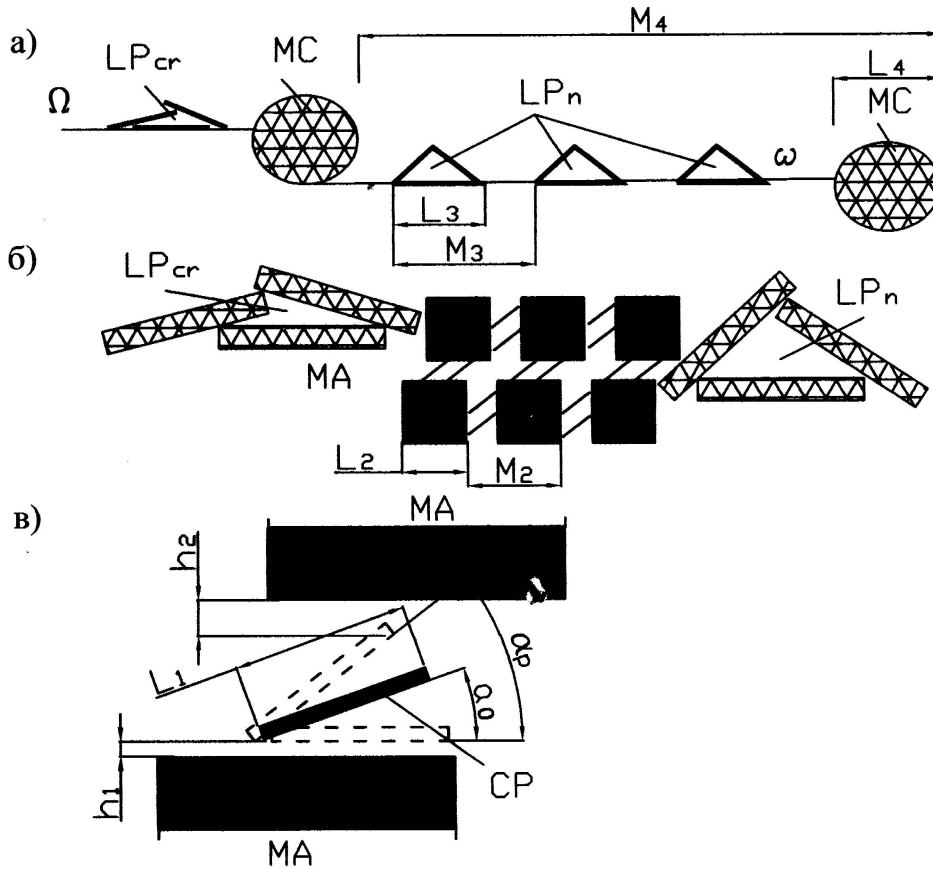


Рисунок 7 – Морфологические характеристики модели деформации на поверхности скольжения на участке: а) между зернами неглинистых минералов MC ; б) между наиболее крупными порами LP ; в) в микропоре между микроагрегатами MA

5. Основные постулаты модели деформации

Предлагаемая концепция деформации состоит из следующих положений:

1) деформация микроструктуры грунта дискретна, она проявляется в виде трещины сдвига, проходящей за один цикл деформации через группу наиболее крупных пор на расстояние, равное их среднему шагу; при этом по-

верхность скольжения Ω увеличивается на участок W , имеющий форму полосы с невогнутым фронтом;

2) цикл деформации включает в себя упругое сжатие слоев микроагрегатов, примыкающих к поверхности Ω и их упругий сдвиг вдоль нее, затем упруго-пластический сдвиг на W и вязкое скольжение по Ω в целом. Упруго-пластический сдвиг и разрушение наиболее крупных пор происходят с уменьшением объема образца и проявляются как сжатие грунта.

Придание сдвиговой трещине упругих, пластических и вязких свойств требует введения промежуточного элемента – *неагрегированной глинистой частицы* в сдвиговой трещине между слоями микроагрегатов, которая находится одновременно в состоянии как ближней, так и дальней агрегации и обеспечивает как упругое, так и неупругое сопротивление микроструктуры. Назовем ее *контактирующей частицей* (СР).

Деформации невозможны без участия неагрегированных контактирующих глинистых частиц, находящихся в промежутке между смежными микроагрегатами и их слоями. Без их участия скольжение слоев микроагрегатов будет встречать только вязкое трение воды, что характерно для текучих грунтов и глинистых суспензий. Поэтому модель деформации должна включать неагрегированные глинистые частицы, осуществляющие контакт между смежными микроагрегатами и их слоями – *контактирующие частицы*;

3) упругий сдвиг на величину W происходит при сопротивлении контактирующих частиц повороту в поле сил взаимодействия с микроагрегатами, а пластический сдвиг происходит при дальнейшем повороте контактирующих частиц параллельно базисам ближних микроагрегатов и при прекращении статического сопротивления на участке поверхности скольжения w взаимному перемещению смежных микроагрегатов. Последующему

взаимному смещению смежных слоев микроагрегатов на этом участке поверхности разрушения будет препятствовать только вязкое трение.

6. Морфологическая модель деформации микроструктуры

Предположим, что поверхность Ω проходит через несколько наиболее крупных пор (LPn) в направлении роста деформации сдвига. В деформации сдвига участвуют два слоя микроагрегатов (МА), лежащих по обе стороны Ω и на (LPn) (рис. 7а). Эти слои сами деформируются и перемещаются в результате разрушения наиболее крупных пор (рис. 7б). Деформация слоев происходит вследствие поворота контактирующих частиц (СР), которыми соединены МА (рис. 7в).

Пусть СР длиной L_1 , ориентированная под углом a_o к МА, поворачивается на угол Δa под действием t_{\max} :

$$a_p = a_o - \Delta a. \quad (3)$$

СР оказывает сопротивление повороту, поэтому он соответствует восходящей части цикла Δs_e и его параметры удовлетворяют уравнению:

$$\Delta s_{e1} \sqrt{2} = L_1 \Delta a (\sin a_o / 2 + \cos a_o / 2) K_{pe}, \quad (4)$$

где K_{pe} – число МА между смежными наиболее крупными порами в направлении сдвига.

Из рисунка 7а и в соответствии с концепцией деформации микроструктуры ясно, что

$$L_4 + M_4 = l / n_b, \quad (5)$$

где l – длина трещины сдвига и отрыва в пробе грунта, n_b – число больших циклов в FD-1 и FD-2,

$$L_4 = \text{avg}\{\Delta s_{ri}\}, i > 1, \quad (6)$$

где i – порядок цикла,

Номер образца	Коэффициент пористости, e	M_4 , МКМ	M_3 , МКМ	L_3 , МКМ	K_{pe} ,	M_2 , МКМ
АС-1	1,030	14490	4140	0,319	100	0,136
АС-5	0,901	11700	3340	0,126	81	0,140
АС-2	0,788	3670	1830	0,157	44	0,165
АС-9	0,636	3350	1340	0,127	32	0,132
АС-3	0,598	4240	1060	0,139	26	0,126
АС-4	0,534	2230	1110	0,138	27	0,151
АС-8	0,517	2960	1130	0,113	27	0,186
АС-6	0,483	1790	620	0,141	15	0,181
АС-7	0,444	680	310	0,148	7	0,157
$r(e; X)$	1,000	0,932	0,972	0,664	0,972	-0,443
avg						0,152
var						0,140

$$L_3 + M_3 = M_4 / n_{cc}, \quad (7)$$

где n_{cc} – среднее число рядовых циклов между большими циклами.

Таблица 2 – Морфологические характеристики микроструктуры образцов грунта

Некоторые морфологические характеристики модели деформации имеют корреляционную связь с пористостью грунта: шаг и размер наиболее крупных пор, шаг песчаных и пылеватых зерен, причем эти величины согласуются с пористостью: чем больше коэффициент пористости, тем больше шаг. Шаг микроагрегатов такой связи с пористостью не имеет, но

его значения близки к среднему (табл. 2). А число микроагрегатов зависит от пористости.

Таким образом, построенная морфологическая модель деформации глинистого грунта не противоречит имеющимся представлениям о грунте, но содержит характеристики, отражающие неоднородность микроструктуры, упругие и неупругие свойства контактов между частицами, способность частиц к переориентации на поверхности скольжения, скачкообразность процесса перестройки микроструктуры при деформации грунтового тела.

Список литературы

1. Гольдштейн М.Н. Механические свойства грунтов (Основные компоненты грунта и их взаимодействие). – М.: Стройиздат, 1973. – 375 с.
2. Осипов В.И. Микроструктура глинистых пород / В.И.Осипов, В.Н.Соколов, Н.А.Румянцева / Под ред. акад. Е.М. Сергеева. – М.: Недра, 1989. – 211 с.
3. Вялов С.С. Кинетика структурных деформаций и разрушения глин / С.С. Вялов, Ю.К. Зарецкий, Р.В. Максимьяк, И.К. Пекарская / В кн.: Труды VIII Международной конф. по механике грунтов и фундаментостроению. – М., 1972. – С. 13–23.
4. Бондарик Г.К. Текстура и деформация глинистых пород / Г.К. Бондарик, А.М. Царева, В.В. Пономарев. – М.: Недра, 1975. – 168 с.
5. Кульчицкий Л.И. Физико-химические основы формирования свойств глинистых пород / Л.И. Кульчицкий, О.Г. Усъяров. – М.: Недра, 1981. – 178 с.
6. Нерпин С.В. Физика почвы / С.В. Нерпин, А.Ф. Чудновский. – М.: Наука, 1967. – 583 с.

7. Денисов Н.Я. О природе прочности глинистых пород / В кн.: Природа прочности и деформаций грунтов. – М.: Стройиздат, 1972. – С. 94–107.
8. Тер-Степанян Г.И. Исследование ползучести глинистых грунтов при сдвиге / В кн.: Труды УШ Международной конф. по механике грунтов и фундаментостроению. – М., 1972. – С. 51–63.
9. Тер-Степанян Г.И. Явление скачкообразной перестройки структуры грунтов при деформировании // Инженерная геология. – 1988. – №3. – С. 11–26.
10. Ляшенко П.А. Микроструктурная деформируемость глинистого грунта. – Краснодар: Изд. Кубанского государственного аграрного ун-та, 2001. – 122 с.