

КОНТАКТНАЯ ТЕОРИЯ ПРОЧНОСТИ ГРУНТА

Ляшенко П. А. – к. т. н., доцент

Кубанский государственный аграрный университет

Модель деформации грунта, описанная в настоящей статье и в статье [5], дает возможность определить обобщенные характеристики микроструктуры с использованием данных опыта на одноосное сжатие образца. Они получены расчетом значения числа контактов и его изменения в ходе сжатия. Сформулирован новый критерий прочности грунта. Введено понятие оптимальной плотности грунта, соответствующей наибольшему числу активных контактов.

The soil deformation model has been used for determination of the common microstructure characteristics on the base of uniaxial compression results. The number of active clay contacts and there trend was calculated during the compression. New criterion of soil destruction has been formulated. The conception of soil optimal density has been suggested which suit to the active clay contacts maximum number.

Введение

Глинистые частицы и микроагрегаты образуют коагуляционные и переходные контакты. Пространство между частицами – поры – неоднородно. Размеры пор определяются размерами частиц. Доля наиболее крупных пор относительно невелика и составляет единицы процента. В частности, "анализ РЭМ-изображений показал, что поровое пространство глинистых пород с матричной микроструктурой представлено четырьмя категориями пор со средним эквивалентным диаметром 0,06; 0,42; 3,3 и 12,3 мкм. Поровое пространство в основном формируется межмикроагрегатными порами" (93,8 % общей пористости).

Их распределение по эквивалентным диаметрам и периметрам носит прерывистый характер [1].

Понятие контакта и его роль в исследовании микроструктуры грунта весьма важны. Они лежат в основе теории контактных взаимодействий [2]. Формирование структурных связей в грунтах происходит не по всей межфазной поверхности, а только в местах их максимального сближения – контактах. В частном случае коагуляционных контактов между частицами существует равновесие сил притяжения и отталкивания. Наличие на контакте равновесной прослойки жидкости обуславливает способность контактов обратимо разрушаться при механических воздействиях, восстанавливаясь затем до первоначальной прочности.

Энергия взаимодействия грунтовых частиц зависит от состояния их поверхностей и расстояния между ними. Эту зависимость можно выразить кривыми, отражающими изменение энергии взаимодействия при изменении расстояния между поверхностями глинистых минералов. Для природных глинистых систем типична кривая, имеющая два потенциальных минимума, возникающих при взаимодействии частиц с двойным электрическим слоем – глинистых частиц [2].

Общая потенциальная кривая взаимодействия глинистых частиц имеет два потенциальных минимума и энергетический барьер между ними. Дальний потенциальный минимум возникает при взаимодействии частиц на больших расстояниях (70–100 нм), ближний – на малых расстояниях (2–3 нм). Им соответствуют дальние и ближние коагуляционные контакты [1].

Контакты могут иметь следующие геометрические разновидности: базис-базис (при параллельном положении базальных плоскостей), базис-скол (базальные плоскости образуют ненулевой угол), скол-скол (касание краями частиц – наименее устойчивый контакт). Измерения прочности

контактов на аналогах дают значения $10^{-12} \dots 10^{-11}$ Н для дальнего коагуляционного контакта и $10^{-10} \dots 10^{-8}$ Н для ближнего [3].

Связь числа контактов с уплотнением грунтов не исследовалась, хотя интуитивно ясно, что она должна быть. С числом контактов должно быть связано понятие структурной неустойчивости и переуплотнения грунтов [1; 4]. В предлагаемой статье приводится решение этого вопроса на основе модели деформации микроструктуры, концепция этой модели изложена в нашей предыдущей статье [5].

1. Модель взаимодействия частиц грунта

Взаимодействие глинистых поверхностей может быть описано потенциальной энергией в функции расстояния между ними $U(r)$. Зададим эту функцию в виде:

$$U(r) = a_0 + a_1 r + a_2 r^2 + a_3 r^3 + a_4 r^4, (r > 0). \quad (1)$$

Эта функция имеет четыре нуля $h_0 < h_{1b} < h_{b2} < h_3$ и три экстремума: h_1, b, h_2 (рис. 1а). Положим, что

$$\frac{U(b) - U(h_2)}{U(b) - U(h_1)} = \frac{\sum \Delta A_e}{\sum \Delta A_r} = K_U, \quad (2)$$

где ΔA_e и ΔA_r – приращения работы упругой и неупругой деформации соответственно, определенные каждое для своей ветви цикла деформации [5] и просуммированные (2) во всем диапазоне изменения деформаций.

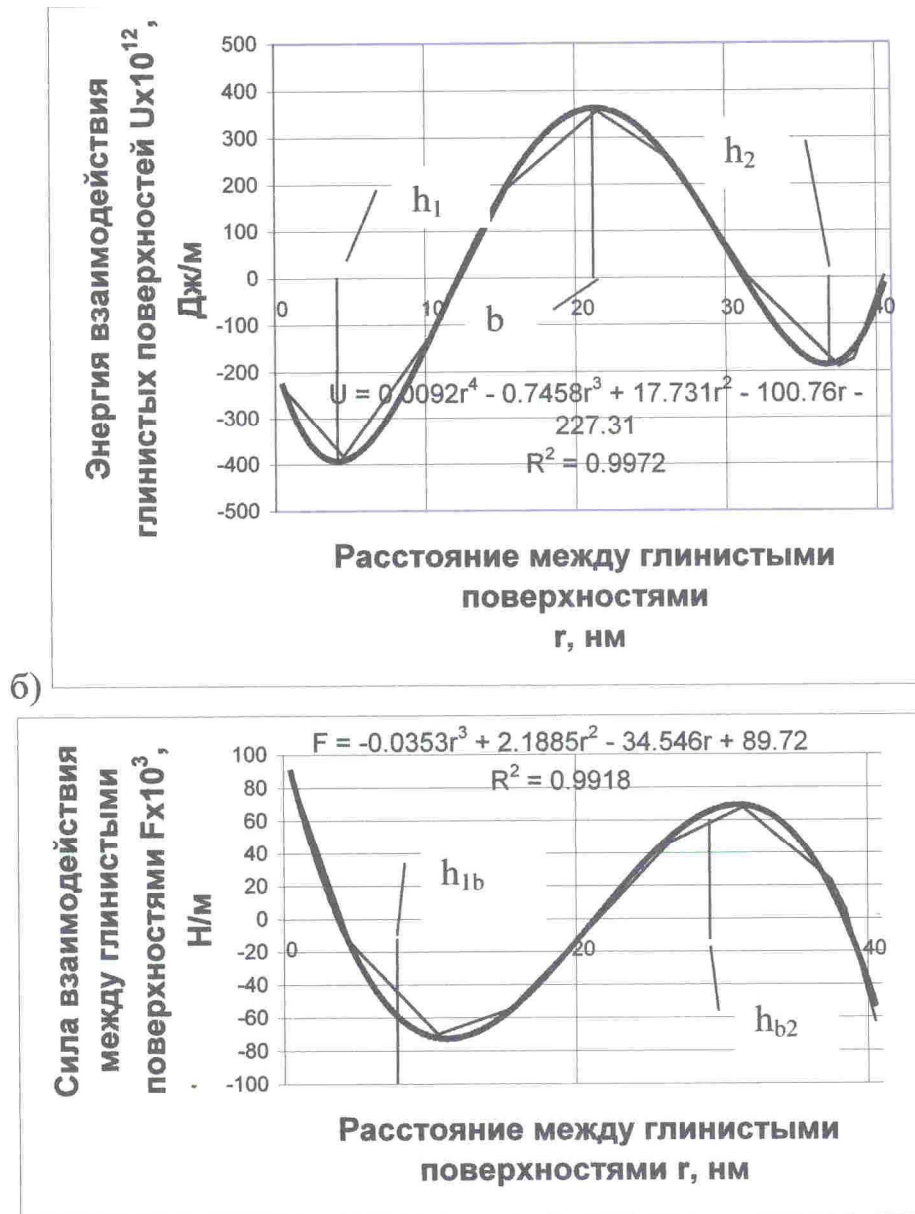


Рисунок 1 – Графики потенциальной энергии (а) и силы взаимодействия между глинистыми поверхностями (б) для образца АС-9

Выражение для силы взаимодействия получаем дифференцированием формулы (1):

$$F(r) = \frac{dU(r)}{dr}, \quad (3)$$

при условии, что (рис. 1б)

$$F(b) = 0; \min F = F(h_{1b}) < 0; \max F = F(h_{b2}) > 0. \quad (4)$$

Скорость изменения реакции при сближении глинистых поверхностей получаем из формулы (3):

$$V_F(r) = \frac{dF(r)}{dr}. \quad (5)$$

Скорость изменения реакции образца зафиксирована нами в опыте при одноосном сжатии образца грунта [5]. Свяжем эти наблюдения с величиной $V_F(r)$ следующими условиями:

$$V_F(b) = C; V_F(h_2) = C - H; V_F(h_1) = H - C - G, \quad (6)$$

где $C = E_e$ в FD-2; $H = E_e$ в FD-3; $G = -E_r$ в FD-3 [5]. (7)

Первое условие в (6) выражает скорость изменения сопротивления глинистых частиц при сближении до расстояния, равного положению потенциального барьера на графике функции $U(r)$. Значение C определяется в фазе $FD-2$, соответствующей стабильному росту поверхности скольжения за счет разрушения наиболее крупных пор, и определяется упругим сопротивлением контактирующих частиц перед преодолением потенциального барьера [5].

Второе и третье условия в (6) используют амплитудные значения циклов деформации в фазе $FD-3$, где происходит разрушение микроструктуры образца с образованием трещин отрыва. После первой трещины поверхность скольжения испытывает более резкое торможение на песчаных и пылеватых зернах. Скорость реакции возрастает на величину $H - C$, а затем уменьшается на эту же величину в результате неупругого поворота контактирующих глинистых частиц и достижения временного равновесия. Эта величина определяет скорость реакции во 2-ой потенциальной яме $V_F(h_2)$. После образования трещины отрыва скорость реакции падает еще больше (в результате отдачи на поверхности

зерен), на величину G до значения, соответствующего дну 1-ой потенциальной ямы – $V_F(h_1)$. На этом цикл деформации в FD-3 завершается до следующего торможения на зернах.

Значения C , H и G определяются по графику " $dp(\epsilon)/d\epsilon - \epsilon$ " [5], значения ΔA_e и ΔA_r рассчитываются для каждого цикла изменения величины $E(e)$. Условий (2), 1-го условия (4) и условий (6) достаточно для определения коэффициентов $a_0 \dots a_4$ в формуле (1). По значениям C , H и G строится функция скорости изменения реакции образца $V_F(r)$, где r – расстояние между глинистыми поверхностями (рис. 2).



Рисунок 2 – Кривая скорости изменения реакции образца, построенная по амплитудным значениям H , C и G (образец АС-9)

Полученные расчетом функции $F(r)$ и $U(r)$ имеют следующий вид (рис. 1). График функции $U(r)$ имеет два минимума (две потенциальные "ямы"). Силы взаимодействия, соответствующие этим минимумам, равны нулю, что возможно только в ненагруженном состоянии грунта.

Силы, действующие на контактах частиц, определяются по графику функции $F(r)$:

1) упругое сопротивление сжатию на восходящей ветви цикла деформации $F_{\max} = F(h_{b2})$;

2) упругое сопротивление растяжению после преодоления частицей силового барьера на нисходящей ветви цикла $F_{\min} = F(h_{1b})$;

3) сопротивление отрыву частиц при образовании трещины $F_3 = F(h_3)$;

4) расклинивающее давление $F_o = F(h_o)$.

2. Изменение числа контактов при деформации грунта

Число контактов глинистых частиц, участвующих в процессе деформации и разрушения образца, может быть рассчитано на основе полученных характеристик микроструктуры.

1. Число упругих контактов на восходящей и нисходящей ветвях рядового цикла определим по формуле:

$$\Delta N_e = \Delta N_e^{(e)} + \Delta N_e^{(r)}, \quad (8)$$

где

$$\Delta N_e^{(e)} = \frac{\Delta p_e^{(e)} L_1^2}{F_{\max}}, \quad (9)$$

$$\Delta N_e^{(r)} = \frac{\Delta p_e^{(r)} L_1^2}{F_{\max}}. \quad (10)$$

2. Число разрушенных контактов на нисходящей ветви цикла определим как сумму контактов, разрушенных в результате поворота контактирующих частиц, и контактов, разрушенных после образования трещины отрыва:

$$\Delta N_r = \Delta N_r^{(r)} + \Delta N_{rd}^{(r)}, \quad (11)$$

где

$$\Delta N_r^{(r)} = \frac{(\Delta p_e^{(e)} \Delta \varepsilon_r / \Delta \varepsilon_e - \Delta p_e^{(r)}) L_1^2}{F_{max}}, \quad (12)$$

$$\Delta N_{rd}^{(r)} = \frac{|\Delta p_{rd}^{(r)}| L_1^2}{F_3}. \quad (13)$$

3. Последовательное суммирование предшествующих приращений числа упругих и разрушенных контактов дает изменение числа активных контактов в функции осевой деформации образца:

$$N(e) = N_e(e) - N_r(e), \quad (14)$$

$$\text{или } N(e) = \sum \Delta N_e(e) - \sum \Delta N_r(e), \quad (15)$$

где L_1 – размер контактирующих глинистых частиц [5]; \sum – знак суммирования от 1-го до заданного цикла деформации; Δp_e и Δp_r – приращения упругой и неупругой реакции образца соответственно.

Графики функции $N(\varepsilon)$ имеют вид кривых с максимумом N_{max} , который достигается при значении деформации образца $\varepsilon(N_{max})$ (рис. 3, 4 и 5). При $\varepsilon(N=0)$ число активных контактов обращается в нуль. Это значение (обозначим $\varepsilon(N=0) = \varepsilon_{cr}$) соответствует моменту разрушения образца: $\varepsilon_{cr} - \varepsilon_c = 0,0023$, что составляет 18 % в среднем от значения ε_c , соответствующего пределу прочности грунта при одноосном сжатии.

Таким образом, предел прочности грунта наступает при достижении максимума числа активных контактов на поверхности скольжения.



Рисунок 3 – Изменение числа активных контактов при увеличении деформации сжатия образцов AC-1, AC-2 и AC-5

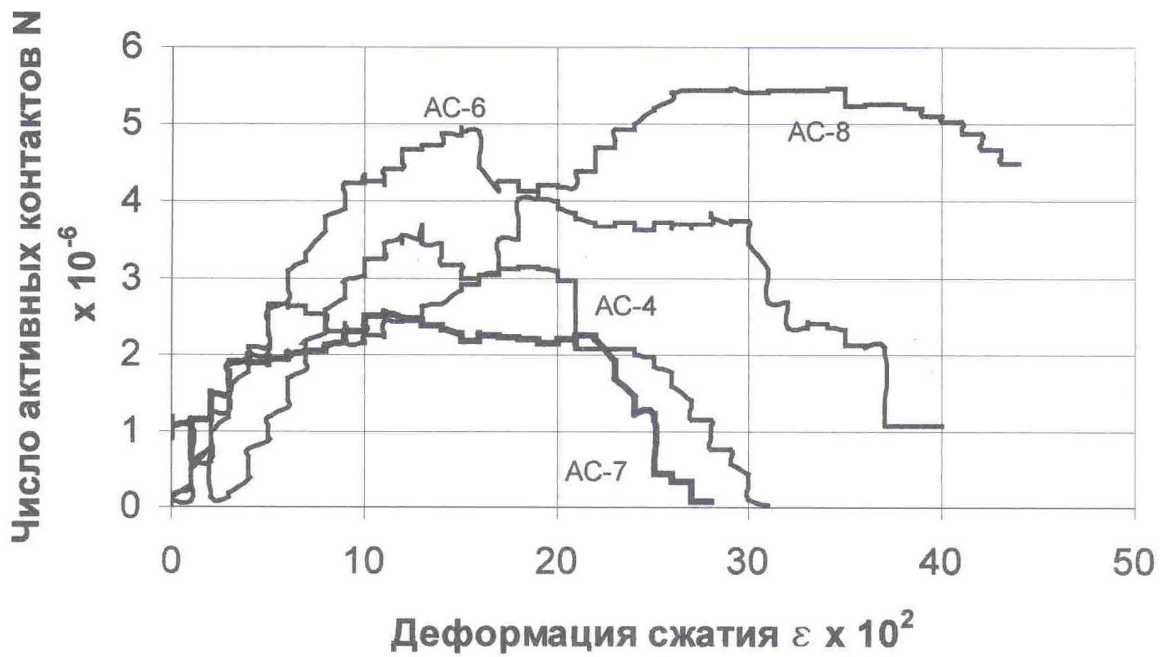


Рисунок 4 – Изменение числа активных контактов при увеличении деформации сжатия образцов AC-7, AC-4, AC-6 и AC-8

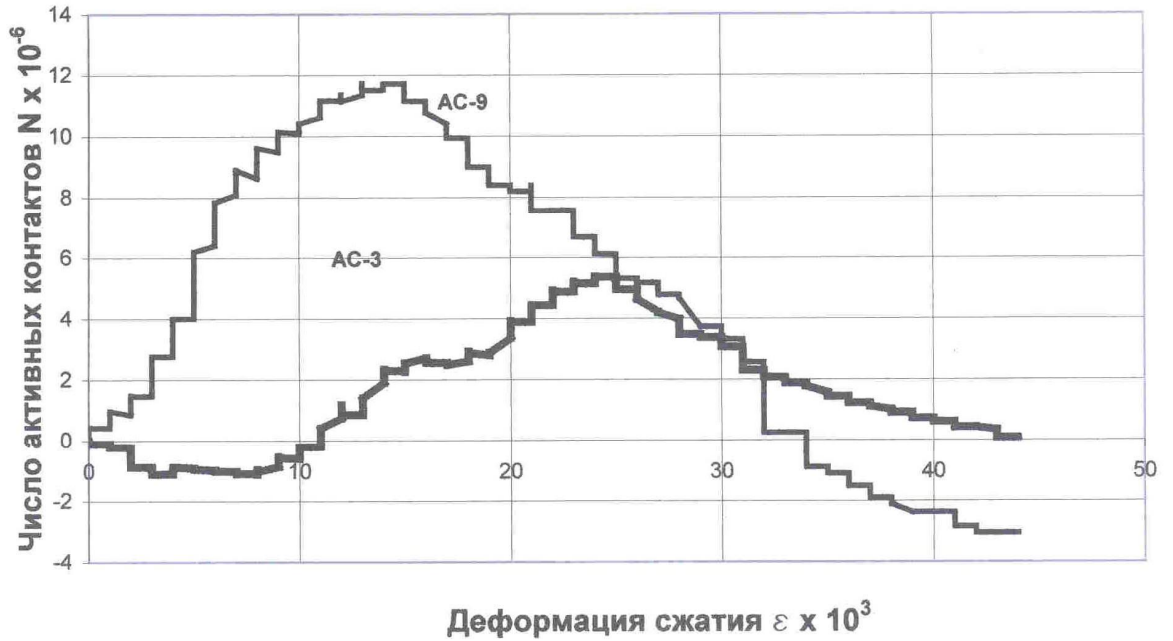


Рисунок 5 – Изменение числа активных контактов при увеличении деформации сжатия образцов АС-3 и АС-9

3. Обсуждение результатов

3.1. Корреляция силовых характеристик микроструктуры с плотностью скелета грунта

Модель взаимодействия глинистых поверхностей построена с использованием параметров C , H и G экспериментального графика " $dp(\varepsilon)/d\varepsilon - \varepsilon$ ". Все три величины имеют хорошую корреляцию (коэффициент корреляции $R > 0,7$) с относительной плотностью, которая оценивалась через коэффициент пористости e (табл. 1).

Таблица 1 – Амплитудные значения скорости изменения реакции образцов грунта

Номер образца	Коэффициент пористости, e	C , $\frac{МПа}{e.o.d.}$	H , $\frac{МПа}{e.o.d.}$	G , $\frac{МПа}{e.o.d.}$	K_U
АС-1	1,030	6,89	8,6	8,6	0,318
АС-5	0,901	8,75	15,7	8,75	0,531
АС-2	0,788	8,90	16,0	14,2	0,556
АС-9	0,636	19,0	19,0	9,0	0,739
АС-3	0,598	10,0	18,0	18,0	0,803
АС-4	0,534	18,0	26,4	18,0	0,720
АС-8	0,517	11,4	9,1	21,0	0,703
АС-6	0,483	17,0	44,8	19,2	0,866
АС-7	0,444	28,8	50,0	22,0	0,831
$R(e;X)$	1,000	-0,726	-0,812	0,852	-0,860

Наибольшее значение коэффициента корреляции с e имеет величина $K_U = -0,860$. Производные от измеряемых величин характеристики взаимодействия дают меньшие значения коэффициента корреляции: $R(F_0, e) = -0,680$; $R(F_{min}, e) = -0,690$; $R(F_{max}, e) = -0,706$; $R(F_3, e) = -0,708$ (табл. 2) и меньшие, чем для "макрохарактеристик". Для сравнения, прочность на одноосное сжатие, определенная традиционным способом, соотносится с коэффициентом пористости при $R(R_c; e) = -0,920$, а соответствующая ей деформация – при $R(\varepsilon(R_c); e) = -0,842$. Эти последние значения выше, чем для характеристик микроструктуры, так как получены прямым измерением.

Таблица 2 – Характеристики контактного взаимодействия глинистых поверхностей

Номер образца	Коэффициент пористости, e	$F_0, H \times 10^6$	$F_{min}, H \times 10^6$	$F_{max}, H \times 10^6$	$F_3, H \times 10^6$	$\varepsilon(N_{max}) \times 10^3$	$\varepsilon_{cr} \times 10^3$
АС-1	1,030	3,5	-2,8	3,1	-3,2	1,1	2,1
АС-5	0,901	5,2	-4,2	4,6	-6,7	1,4	1,6
АС-2	0,788	12,8	-9,7	10,3	-15,8	10,4	11,2
АС-9	0,636	3,6	-2,9	2,8	-2,5	13,6	34,6
АС-3	0,598	14,2	-8,6	9,8	-19,5	24,5	45,0
АС-4	0,534	26,6	-35,1	29,9	-64,6	38,9	45,0
АС-8	0,517	11,1	-10,6	10,0	-18,4	13,7	31,4
АС-6	0,483	43,5	-30,7	30,3	-64,3	28,6	40,0
АС-7	0,444	25,2	-25,5	25,2	-51,2	11,8	29,1
$R(e;X)$	1,000	-0,680	0,690	-0,706	0,708	-0,715	-870

F_0 – сила отталкивания глинистых поверхностей при ближнем взаимодействии;

F_{min} – сила притяжения глинистых поверхностей при ближнем взаимодействии;

F_{max} – сила сопротивления преодолению энергетического барьера между ближним и дальним взаимодействием глинистых поверхностей;

F_3 – сопротивление отрыву глинистых поверхностей;

$\varepsilon(N_{max})$ – деформация образца грунта, соответствующая максимальному числу контактов, мобилизованных сжатием;

$\varepsilon(N=0)$ – деформация образца грунта, соответствующая его полному разрушению (число контактов, мобилизованных сжатием, равно нулю).

Таким образом, получаем: чем больше плотность грунта и, следовательно, меньше пористость, тем большее значение имеют все силовые характеристики микроструктуры.

3.2. Зависимость от плотности числа активных контактов

Сравнивая между собой анализ результатов расчетов в п. 3.1. и [5], приходим к выводу, что нами получены значения характеристик, относящиеся к модели деформации в целом, а не к выделенной из нее микропоре, микроагрегату, наиболее крупной поре или минеральному

зерну. Зависимость силовых характеристик от пористости указывает на их обобщенные значения.

Максимальное число активных контактов N_{max} зависит от плотности грунта: при увеличении плотности оно возрастает до максимума (при плотности 1650 кг/м^3), а затем уменьшается примерно в два раза (рис. б). Такая же закономерность наблюдается для $\varepsilon(N_{max})$ и $\varepsilon(N=0)$ (максимум достигается при плотности 1690 кг/м^3). Очевидно, что плотность скелета $1650\text{--}1690 \text{ кг/м}^3$ является оптимальной для этого грунта.

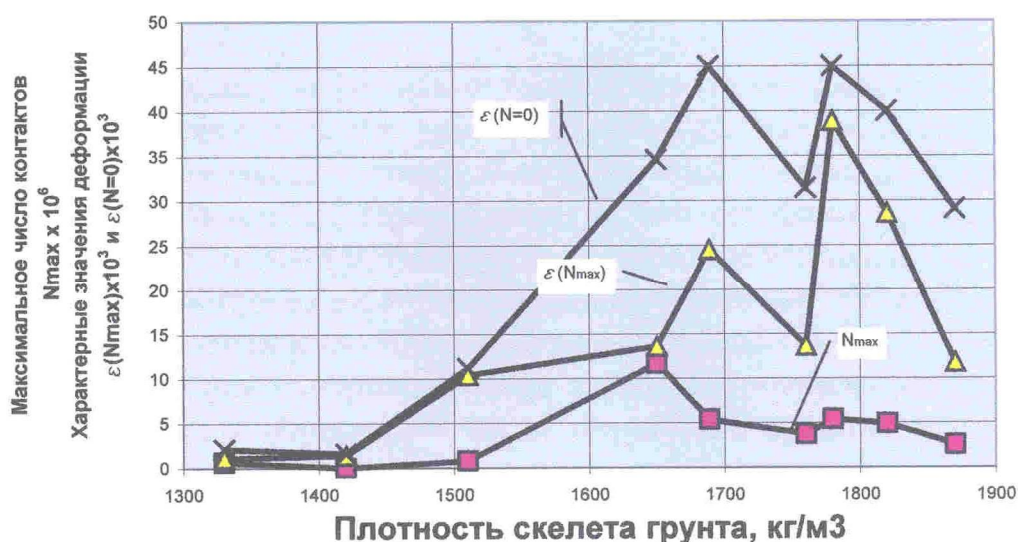


Рисунок 6 – Зависимости от плотности скелета грунта максимального числа контактов N_{max} , деформации сжатия образца, при которой этот максимум достигается $\varepsilon(N_{max})$, и деформация, предшествующая разрушению образца, $\varepsilon(N=0)$.

При меньшей плотности (при недоуплотнении [4]) даже небольшие значения внешней деформации вызывают большую концентрацию напряжений на наиболее крупных порах, их разрушение и быстрое продвижение поверхности скольжения. Число активных контактов на поверхности скольжения невелико, так как часть ее занята порами.

В нормально уплотненном грунте наиболее крупные поры имеют меньшие размеры (более крупные разрушены предварительным сжатием при формовании образца), и для их разрушения требуется большая деформация внешней границы, способная вызвать разрушение этих пор и продвижение поверхности скольжения. Число активных контактов на поверхности скольжения больше, а само скольжение является более вязким.

Переуплотнение приводит к уменьшению как максимального числа активных контактов, так и соответствующих значений деформации: $\varepsilon(N_{max})$ и $\varepsilon(N=0)$. Это связано, по-видимому, с тем, что поверхность скольжения проходит через наиболее крупные поры малых размеров, число которых значительно больше. Это подтверждается большим числом больших циклов изменения реакции образца: корреляция коэффициента пористости и числа циклов оценивается значением $-0,840$. Вязкость скольжения увеличивается еще больше, происходит укрупнение микроагрегатов, делающее грунт более жестким: увеличивается число жестких контактов (F_0) и уменьшается число вязких (F_{max}), в целом же число активных контактов уменьшается.

Заключение

Модель деформации грунта, описанная в настоящей статье и в статье [5], дает возможность определить обобщенные характеристики микроструктуры с использованием данных опыта на одноосное сжатие образца. Получены следующие результаты:

- 1) число активных контактов в процессе одноосного сжатия возрастает до максимума, а затем уменьшается до нуля, причем нуль на оси деформации совпадает с пределом прочности в традиционной трактовке. Таким образом, достижение нулевого значения числом

активных контактов следует считать новым **критерием прочности грунта** при одноосном сжатии: *разрушение образца наступает при $N=0$* ;

2) максимальное число активных контактов увеличивается с увеличением плотности грунта до максимума, а затем уменьшается. Максимум свидетельствует о существовании **оптимальной плотности**, при которой мобилизуется наибольшее число глинистых контактов;

3) значения относительной деформации образцов, соответствующие максимальному числу активных контактов $\varepsilon(N_{max})$ и потере прочности $\varepsilon(N=0)$, также проходят через максимум при увеличении плотности грунта. Этот максимум практически совпадает с максимумом числа активных контактов, что указывает на их взаимосвязь. Ее можно выразить следующей гипотезой: *при одноосном сжатии образца грунта оптимальной плотности в нем мобилизуется наибольшее число активных глинистых контактов, что отражается в наибольшей деформации разрушения.*

Список литературы

1. 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.
2. Андреева, Т. В. Результаты моделирования сингенетической просадочности эоловых лессовых пород / Т. В. Андреева // Геозкология. – 1996. – № 1. – С. 79–84.
3. Бондарик, Г. К. Текстура и деформация глинистых пород / Г. К. Бондарик, А. М. Царева, В. В. Пономарев. – М. : Недра, 1975. – 168 с.
4. Денисов, Н. Я. Природа прочности и деформаций грунтов / Н. Я. Денисов. – М. : Стройиздат, 1972. – 279 с.
5. Ляшенко, П. А. Модель деформации микроструктуры грунта / П. А. Ляшенко // Научный журнал КубГАУ [Электронный ресурс]. – Краснодар : КубГАУ, 2005. – № 03(11). – Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2005/03/02/p02.asp>.