

МЕХАНИКА КОНТАКТНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ГЛИНИСТОГО ГРУНТА ПРИ ОДНООСНОМ СЖАТИИ

П.А. ЛЯШЕНКО¹, В.В. ДЕНИСЕНКО²

¹ Кубанский государственный аграрный университет,
350044, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Калинина, 13; электронная почта:
lyseich1@yandex.ru

² Кубанский государственный технологический университет,
350072, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Московская, 2;
электронная почта: devivi@yavdex.ru

Предложена модель контакта элементов глинистого грунта. Она включает частицы глинистого грунта, которые связывают все элементы микроструктуры грунта, и определяет упругие и пластично-вязкие деформации грунтового тела. В опытах с одноосным сжатием при постоянной скорости деформации получены результаты, показывающие, что модель контакта не противоречит существующим представлениям о сопротивлении грунта. Анализ диаграммы «деформация-давление» дает нам инструмент определения особенностей микроструктуры, которые объясняют все известные формы сопротивления грунта внешним нагрузкам. Авторы дают простой и доступный лабораторный метод типового измерения реакции и алгоритм обработки данных. Работа содержит пример его использования.

Ключевые слова: грунт, модель сопротивления контакта, контактирующая частица, упругая деформация, пластично-вязкая деформация, характеристики микроструктуры грунта.

ВВЕДЕНИЕ

«...Сложение глинистых грунтов представляет собой *многопорядковое образование*» [1]. Рассмотрим четырехпорядковую модель деформации и прочности глинистого грунта с водно-коллоидными связями между элементами микроструктуры. Элементы 1-го порядка – глинистые частицы пластинчатой формы, взаимодействие их параллельных базисных граней описывается потенциальной функцией $U(r)$ расстояния r между ними, имеющей два минимума и энергетический барьер [2–5] (рис. 1).

Сила взаимодействия базисных граней описывается функцией r :

$$R(r) = -\frac{d}{dr}U(r); \quad (1)$$

скорость изменения силы – функцией r :

$$V(r) = -\frac{d^2}{dr^2}U(r). \quad (2)$$

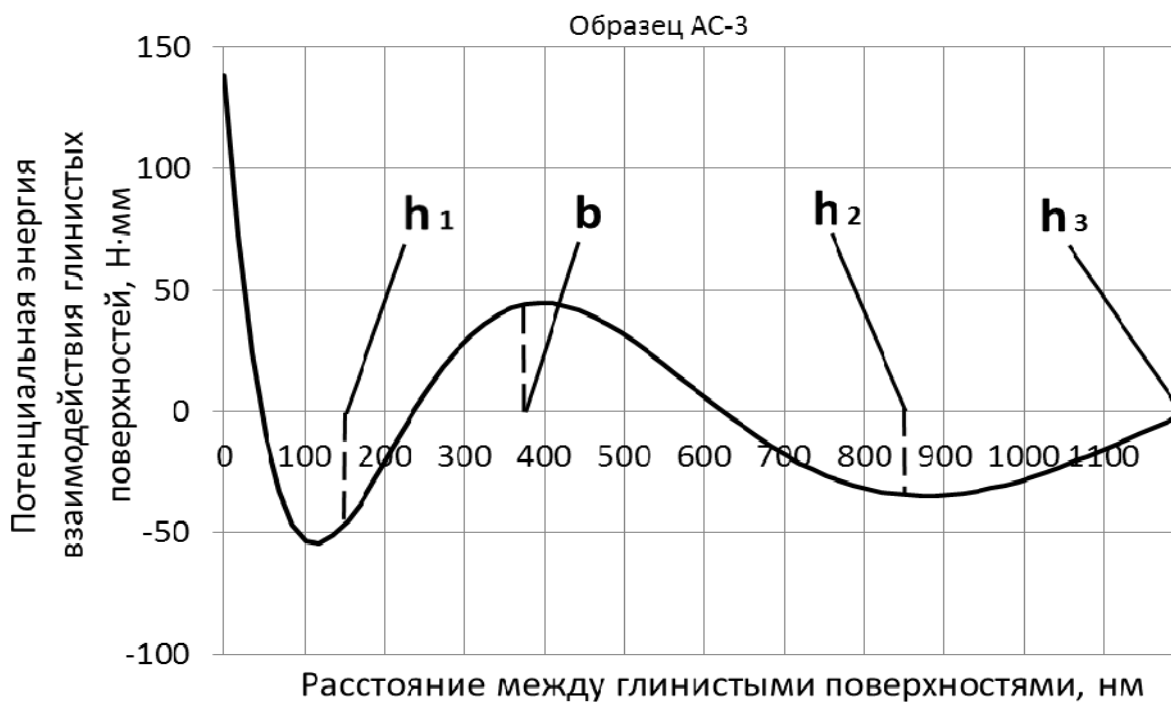


Рис. 1. Вид энергетической функции. Буквами h_1 , b , h_2 обозначены координаты экстремумов, h_3 – 4-го нуля

Элементы 2-го порядка – микроагрегаты глинистых частиц, связанных силами ближней агрегации и разделенных ультрамикropорами, ширина которых имеет порядок координаты первого минимума h_1 . Сами микроагрегаты связаны между собой силами дальней агрегации и разделены микropорами шириной порядка h_2 . Микropоры и ультрамикropоры заполнены связанной водой [4, 5].

Элементы 3-го порядка – зерна неглинистых минералов и крупные микроагрегаты, образующие наиболее крупные поры типа «шалашика» и «карточного домика» (по Троллопу и Чену [1], см. также [3–5]). Наиболее крупные поры могут содержать свободную воду [3–5].

Элементы 4-го порядка – наиболее крупные зерна неглинистых минералов, разделенные глинистой матрицей и покрытые глинистыми рубашками (по А. Казагранде [1], см. также [3]).

Эффект скачкообразного изменения сопротивления грунта при постоянной скорости деформации, замеченный Г.И. Покровским [6], позволяет

получить опытные данные для построения четырехпорядковой модели деформации и прочности глинистого грунта [7, 8].

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ОБРАЗЦОВ ГРУНТА ОДНООСНОМУ СЖАТИЮ

Деформации грунта рассмотрены на примере одноосного сжатия образцов твердого пылеватого суглинка нарушенной структуры, заформованного с разной плотностью скелета (табл. 1).

Таблица 1. Характеристики образцов грунта нарушенной структуры, испытанных при одноосном сжатии

Индекс образца	Давление формования, p_0 , кПа	Показатель текучести, I_L	Плотность скелета, ρ_d , г/см ³	Пористость n , %	Прочность при сжатии, p_s , кПа
АС-1	124	-0,16	1,33	50,7	10
АС-5	248	-0,27	1,42	47,4	28
АС-2	397	-0,26	1,51	44,1	56
АС-9	595	-0,35	1,65	38,9	99
АС-3	794	-0,16	1,69	37,4	132
АС-8	992	-0,31	1,78	34,1	156
АС-4	1241	-0,15	1,76	34,8	190
АС-6	1488	-0,49	1,82	32,6	376
АС-7	1488	-0,34	1,87	30,7	218
Corr($\square_d; X$)					0,843

При одноосном сжатии с постоянной скоростью деформации образца $du/dt = B$ ($B = 8,33$ мкм/с) сопротивление образца увеличивалось до предельного значения p_s (рис. 2, а, табл. 1). «Скорость» увеличения сопротивления $v(u) = dP(u)/du$ изменялась циклически (рис. 2, б), причем максимальные амплитудные значения $v_{i,\max}$, ($i = 1 \dots n_c$) в первых n_c циклах

возрастают, затем уменьшаются. Рассмотрим участок увеличения, полагая, что он отражает начало разрушения микроструктуры грунта.

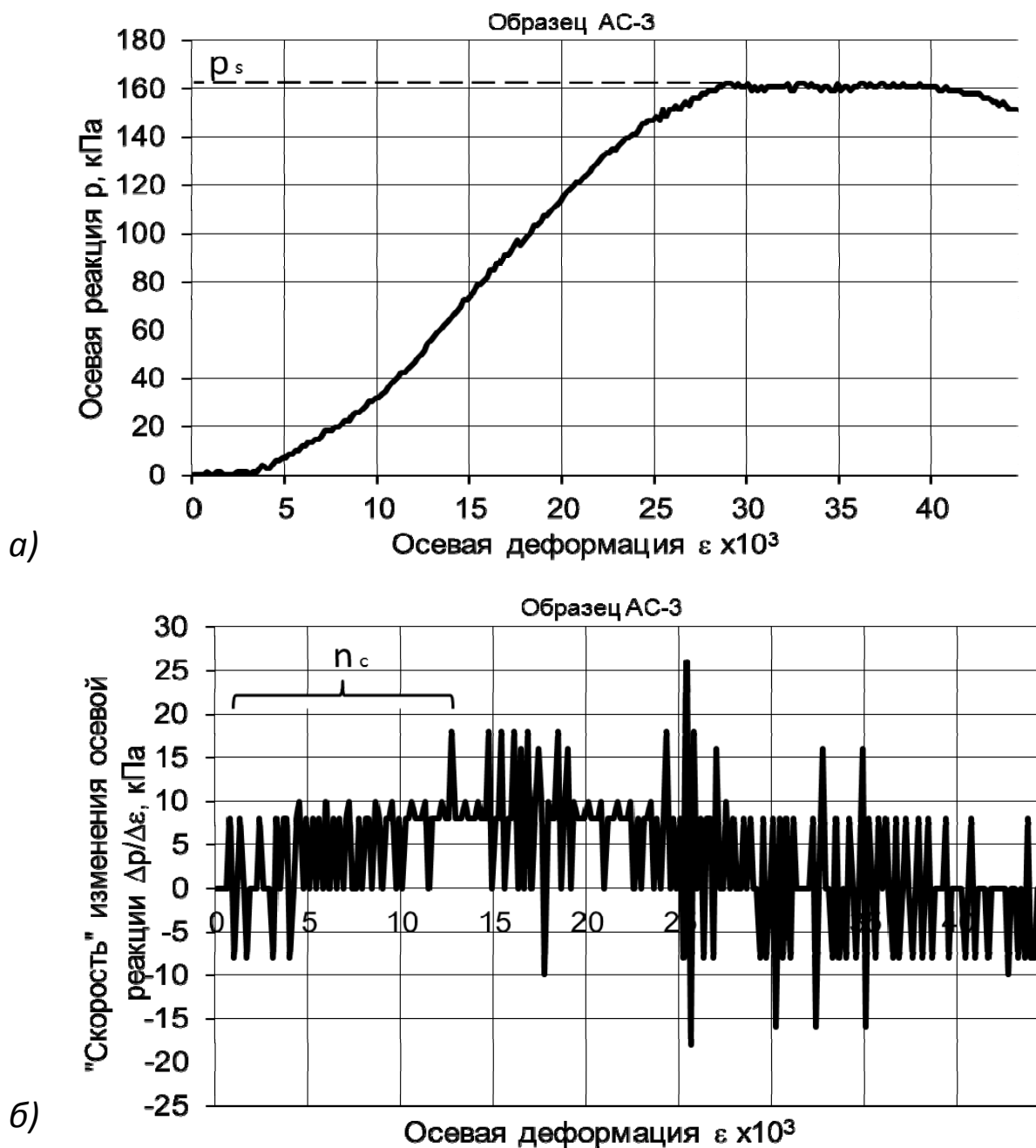


Рис. 2. Изменение реакции образца при одноосном сжатии с постоянной скоростью деформации (а) и «скорость» изменения осевой реакции (б)

2. АНАЛИЗ УПРУГОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Предположим, что на восходящей ветви цикла образец грунта оказывает наибольшее сопротивление упругой деформации, за счет контактов типа «базис-базис» в местах концентрации напряжений: на наиболее крупных

минеральных зернах. Приравняем «скорость» увеличения сопротивления в опыте к «скорости» увеличения сопротивления контакта:

$$avg v_{i,max} = \max V(r), (i=1..n_c), \quad (3)$$

где $\max V(r)$ – максимальное значение «скорости» сопротивления контакта при сближении глинистых поверхностей (рис. 3);

$avg v_{i,max}$, $(i=1..n_c)$ – среднее амплитудных значений «скорости» сопротивления образца.

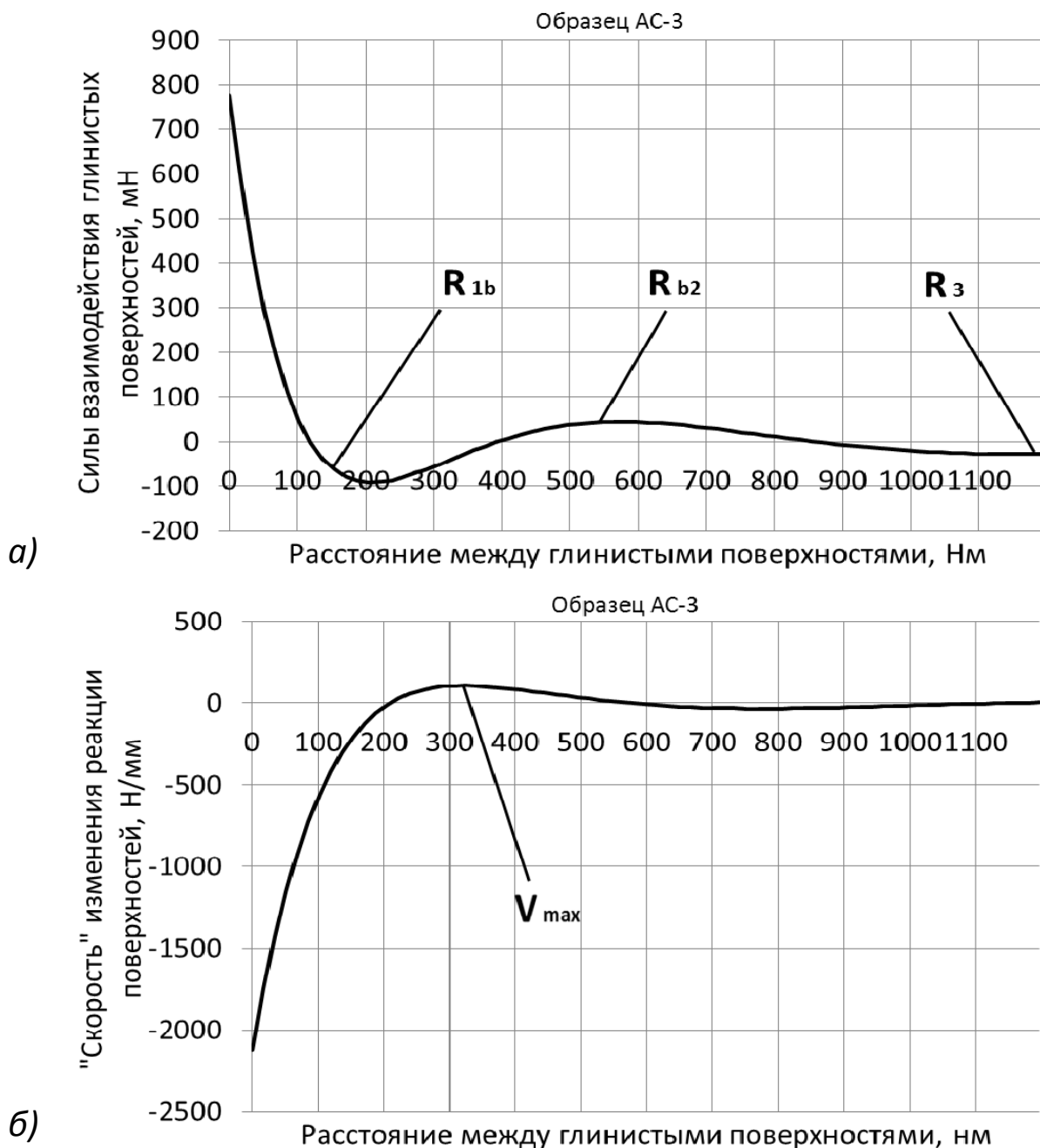


Рис. 3. Графики силовой реакции (а)

и «скорости» силовой реакции (б) контакта типа «базис-базис»

Это условие, а также средняя длина восходящих ветвей циклов и отношение работы деформации на восходящих и нисходящих ветвях циклов использованы для нормировки функции $U(r)$, представленной гладкой функцией расстояния r между глинистыми поверхностями [7] (рис. 1).

Далее определяются силы сопротивления (1) контакта плоскопараллельных глинистых плоскостей типа «базис-базис» (табл. 2, рис. 3, *a*), в том числе: максимальное сопротивление растяжению при ближней агрегации – R_{1b} , максимальное сопротивление сжатию при дальней агрегации – R_{b2} , отрыву – R_3 , а также координаты 1-й и 2-й потенциальных «ям», барьера между ними и предельной дальности взаимодействия: h_1, h_2, b, h_3 , соответственно (рис. 1). В описываемом опыте силовые величины не имеют корреляции с плотностью скелета и могут считаться характеристиками микроструктуры грунта. Координаты характерных точек зависят от плотности скелета с коэффициентом корреляции не ниже 0,8, следовательно, являются параметрами модели контакта типа «базис-базис».

Таблица 2. Экстремальные значения сил взаимодействия глинистых поверхностей по результатам одноосного сжатия образцов суглинка нарушенной структуры

Индекс образца	R_{1b} , Н	R_{b2} , Н	R_3 , Н	h_3 , м
АС-1	-1,63E-06	4,27E-05	-2,62E-05	3,36E-06
АС-5	-2,64E-06	6,89E-05	-3,84E-05	2,26E-06
АС-2	-7,76E-05	3,74E-05	-2,35E-05	1,76E-06
АС-9	-3,23E-05	1,56E-05	-9,77E-06	1,08E-06
АС-3	-6,06E-05	2,92E-05	-1,82E-05	1,21E-06
АС-4	-1,28E-04	6,18E-05	-3,80E-05	1,68E-06
АС-8	-1,03E-04	4,97E-05	-3,01E-05	1,32E-06
АС-6	-8,24E-05	3,97E-05	-2,22E-05	9,34E-07
АС-7	-5,79E-05	2,79E-05	-1,72E-05	9,75E-07

$\text{Corr}(\rho_d; X)$				-0,870
<i>Avg</i>	-6,07E-05	4,14E-05	-2,48E-05	
<i>Var</i>	-0,71	0,41	-0,38	
Примечания: $\text{Corr}(\rho_d, X)$ – коэффициент корреляции величин X с плотностью скелета грунта; <i>Avg</i> – среднее значение; <i>Var</i> – коэффициент вариации				

Контакт «базис-базис» осуществляет упругую связь силами дальней агрегации, а при бóльшем сближении глинистых поверхностей может преодолеть энергетический барьер и перейти в связь силами ближней агрегации, через ультрамикropору шириной порядка h_1 .

3. АНАЛИЗ НЕУПРУГОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Сопротивление упругой деформации оказывают не только контакты типа «базис-базис», но и контакты типа «базис-скол». Частица, прикрепленная сколом к базальной грани другой частицы, *контактирующая частица*, обеспечивает наибольшую подвижность и наименьшую прочность контакта, вследствие ее способности к повороту в микропоре.

Контактирующая частица – элемент 1-го порядка. Ее определяющая роль – контакт микроагрегатов, разделенных микропорой. Она взаимодействует своими гранями с двумя микроагрегатами: с *базовым* (силами ближней и дальней агрегации) и со *смежным* (силами дальней агрегации), в соответствии с законом изменения этих сил (1), показанным на рис. 3, а. При этом ширина микропоры может изменяться от $z = b$ до $z = b + h_3$. Часть этой деформации является упругой, другая – пластично-вязкой. Часть поворота контактирующей частицы происходит обратимо (упруго), но при некотором угле сопротивление повороту увеличивается настолько, что контактирующие микроагрегаты проскальзывают один относительно другого, порождая пластично-вязкую деформацию.

Если одновременно проскальзывает группа микроагрегатов на одной макроскопической площадке, то это регистрируется как нисходящая ветвь цикла «скорости» изменения реакции образца.

Пластично-вязкая деформация образца начинается на площадках сдвига Ω_i , лежащих на поверхности максимальных касательных напряжений Ω_T при условии Треска-Сен-Венана: $\tau_{\max} = \tau_{\lim}$, где τ_{\lim} – предельное касательное напряжение на площадке сдвига.

Площадки сдвига расположены в микропорах, где контакт микроагрегатов осуществляется глинистыми частицами по схеме «базис-скол» и является наименее прочным. Взаимодействие микроагрегатов выразим нормальной Y и тангенциальной X силами, по отношению к площадке сдвига, совпадающей с поверхностью базового микроагрегата, а также моментом сил относительно точки поворота контактирующей частицы на угол β к нормали поверхности базового микроагрегата (рис. 4). Решение задачи равновесия контактирующей частицы позволило определить упругое сопротивление контакта «базис-скол» в зависимости от угла β [8]: чем больше угол, в пределах $0 < \beta < \beta_o$, тем больше значения реакция контакта Y и X .

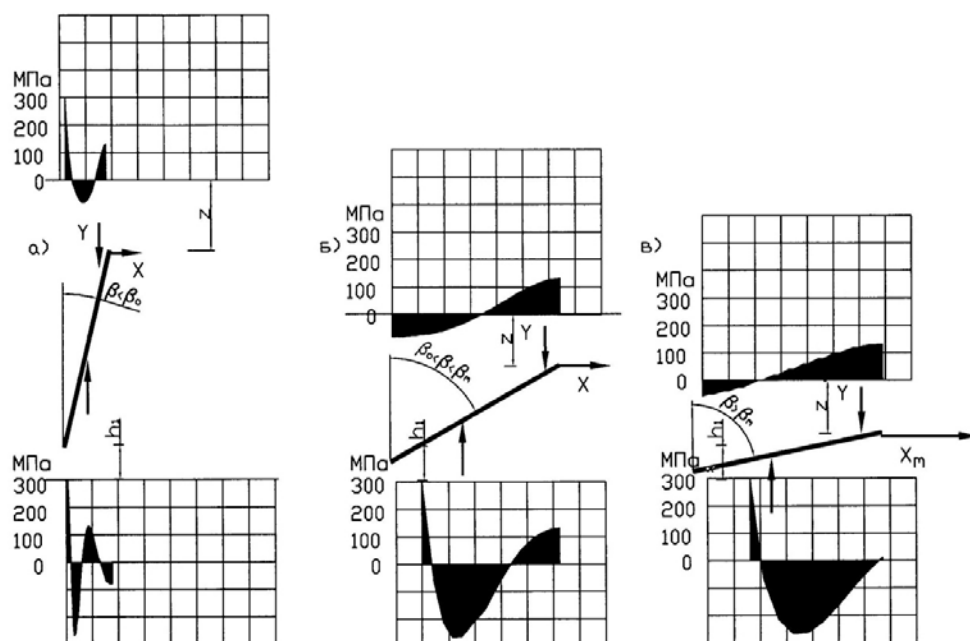


Рис. 4. Схема равновесия контактирующей частицы в микропоре между микроагрегатами, базовым (внизу) и смежным (вверху): а) при упругой деформации; б) при вязком скольжении; в) при максимальном наклоне.

Реакции контакта показаны: на микроагрегатах – распределенными, на контактирующей частице – равнодействующими

Внутренние напряжения в контакте можно оценить, задавая площадь контакта. Приняв, что контактирующая частица представляет собой пластину с размерами $h_3 \times h_3 / 2$ и в наклонном положении взаимодействует с микроагрегатами всей своей поверхностью, рассчитаем нормальные и касательные к площадке сдвига напряжения по формулам:

$$\tau_{xy} = 2X(\beta)/h_3^2, \quad \sigma_y = 2Y(\beta)/h_3^2. \quad (4)$$

На площадке сдвига действуют максимальное касательное $\tau_{xy} = \tau_{\max}$ и среднее $\sigma_y = \sigma$ напряжения.

В пределах значений угла поворота $0 < \beta < \beta_o$ в контакте типа «базис-скол» возникают только упругие деформации; при $\beta \geq \beta_o$ – пластично-вязкая деформация. Предельное сопротивление сдвигу рассчитывается по формуле:

$$\tau_{\lim} = 2X(\beta_o)/h_3^2, \quad (5)$$

а соответствующий ему угол поворота β_o определяется из условия, согласно построению О. Мора [8]:

$$\tau_{\lim} = \sigma + \sigma_t, \quad (6)$$

где σ_t – сопротивление контакта отрыву.

В опытах с грунтом разной плотности величины в уравнении (6) показали хорошую положительную корреляцию с плотностью скелета грунта (табл. 3). Это не противоречит существующим представлениям о прочности глинистых грунтов. Величины в табл. 3 являются параметрами модели сопротивления контакта типа «базис-скол».

Из сравнения сопротивлений контакта типа «базис-базис» R_{b2} и контакта «базис-скол» $Y_o(\beta_o)$ видно, что сопротивление сближению поверхностей контакта в первом случае на два порядка больше, чем во втором. Сопротивление сдвигу $R_{b2}/2$, соответственно, на два порядка больше, чем во втором – $X_o(\beta_o)$. Следовательно, разрушению сдвигом подвергаются контакты

типа «базис-скол» путем вязкого скольжения смежного микроагрегата по базовому (рис. 4, б).

Таблица 3. Сравнение значений сопротивления «сильного контакта» R_{b2} и «слабого контакта»: при вязком скольжении X_0 и Y_0 ; при максимальном наклоне контактирующей частицы X_m и Y_m

Индекс образца	R_{b2} , Н	X_0 , Н	Y_0 , Н	X_m , Н	Y_{max} , Н
АС-1	4,27E-05	6,31E-07	2,53E-07	2,43E-06	4,73E-07
АС-5	6,89E-05	2,16E-07	7,74E-08	5,28E-06	1,73E-07
АС-2	3,74E-05	1,85E-07	7,39E-08	1,50E-06	1,39E-07
АС-9	1,56E-05	8,81E-08	3,50E-08	7,27E-07	6,70E-08
АС-3	2,92E-05	1,03E-07	4,10E-08	8,23E-07	7,72E-08
АС-4	6,18E-05	2,47E-07	9,89E-08	1,98E-06	1,86E-07
АС-8	4,97E-05	2,20E-07	8,81E-08	1,75E-06	1,65E-07
АС-6	3,97E-05	1,43E-07	5,77E-08	1,12E-06	1,07E-07
АС-7	2,79E-05	1,31E-07	5,23E-08	1,05E-06	9,84E-08

4. ОЦЕНКА ВЯЗКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ КОНТАКТА

В момент достижения предельного напряжений $\tau_{max} = \tau_{lim}$ при $\beta = \beta_0$ начинается вязкое скольжение смежного микроагрегата вдоль базового по микропоре, определяющее пластично-вязкую деформацию. Ее скорость можно оценить по закону Ньютона для вязкого течения:

$$\dot{i}_x = \tau_{lim} (b + h_3 \sin \beta) / \eta,$$

где η – коэффициент вязкости жидкости в микропоре.

Коэффициент вязкости, вычисленный для исследуемого грунта по предложенной модели контакта, равен 0,012 МПа·с и не коррелирует с плотностью скелета грунта.

5. УПРОЧНЕНИЕ КОНТАКТА

В местах концентрации напряжений (на элементах 3-го и 4-го порядков, т. е. на крупных минеральных зернах и микроагрегатах) сопротивление сдвигу увеличивается до значений X_m , а сжатую – до значений $Y_{\max}(\beta_m)$, которые значительно меньше X_m (табл. 4). Следовательно, сближение глинистых поверхностей микроагрегатов преобладает над их относительным сдвигом. Если среднее напряжение в контакте достигает значения R_{b2} (максимального сопротивления «сильного контакта»), энергетический барьер преодолевается, и микроагрегаты сливаются под действием сил ближней агрегации.

Таблица 4. Предельные сопротивления микроструктуры грунта, вычисленные по модели деформации

Индекс образца	$ \sigma_\tau $, МПа	σ , МПа	σ_{\max} , МПа	τ_{\lim} , МПа	$\tau_{\lim.m}$, МПа
АС-1	0,045	0,035	0,084	0,059	0,814
АС-5	0,030	0,044	0,068	0,027	0,885
АС-2	0,048	0,048	0,090	0,083	0,973
АС-9	0,060	0,060	0,114	0,078	1,238
АС-3	0,056	0,056	0,105	0,073	1,115
АС-4	0,101	0,070	0,189	0,133	1,410
АС-8	0,070	0,102	0,132	0,093	2,019
АС-6	0,132	0,132	0,245	0,175	2,564
АС-7	0,110	0,110	0,207	0,145	2,205
$\text{Corr}(\rho_d; X)$	0,826	0,840	0,828	0,811	0,836
Примечание – $\text{Corr}(\rho_d; X)$ – коэффициент корреляции величин X с плотностью скелета грунта					

Слияние микроагрегатов происходит скачком, но только в местах концентрации напряжений. На площадках концентрации напряжений происходит упрочнение контактов: преобразование «слабых контактов» в «сильные контакты».

Упрочнение провоцирует скольжение группы «слабых контактов» по площадкам, соседним с местами концентрации напряжений. Это проявляется в макроскопическом масштабе как уменьшение «скорости» изменения сопротивления образца грунта в нисходящей ветви цикла.

6. ДЕФОРМАЦИИ КОНТАКТОВ И ПРОЧНОСТЬ ГРУНТА

Упругие деформации возникают в грунтовом теле с начала нагружения внешней нагрузкой и действуют во всех контактах в объеме тела. Сумма упругих деформаций контактов регистрируется прибором и дает восходящую ветвь цикла на графике «скорости» изменения реакции образца.

Пластично-вязкие деформации зарождаются при $\tau_{\max} = \tau_{\lim}$ на площадках сдвига, которые объединяются в поверхности скольжения. Поверхности скольжения имеют макроскопические размеры, определяемые размерами грунтового тела, поэтому регистрируются прибором и дают нисходящую ветвь на графике «скорости» изменения реакции образца. Она отражает локальное разрушение грунта путем сдвига, развивающегося во времени при постоянном касательном напряжении.

Модель контакта описывает деформацию и разрушение как единый процесс изменения сопротивления однородной группы контактов, обусловленного силами взаимодействия глинистых поверхностей.

ВЫВОДЫ

1 Модель контакта типа «базис-скол» с поворачивающейся контактирующей глинистой частицей («слабого контакта») построена для оценки внутренних напряжений в глинистом грунте с водно-коллоидными связями. Поворачивающаяся контактирующая частица играет роль механически активной связи между элементами более высоких порядков: микроагрегатов, минеральных зерен и однородных групп элементов.

2 Сопротивление «слабого контакта» на два порядка ниже сопротивления «сильного контакта» (типа «базис-базис»), следовательно, является местом зарождения деформаций и определяет величину деформации грунтового тела.

3 Оценка сопротивления контактов произведена по результатам опытов с нагружением образцов грунта при постоянно возрастающей деформации. Такой метод испытания позволяет выявить циклическое изменение «скорости» изменения силовой реакции образца, разделить ее упругую и неупругую части и рассчитать характеристики модели контакта элементов микроструктуры.

4 Расчеты параметров модели контакта показали корреляцию значений предельного сопротивления с плотностью скелета грунта, что является подтверждением правильности предложенной модели.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Гольдштейн М.Н.** Механические свойства грунтов. (Основные компоненты грунта и их взаимодействие). М.: Стройиздат, 1973. 375 с.
2. **Нерпин С.В., Чудновский А.Ф.** Физика почвы. М.: Наука, 1967. 583 с.
3. **Осипов В.И., Соколов В.Р., Еремеев В.В.** Глинистые покрышки нефтяных и газовых месторождений. М.: Наука, 2001. 238 с.
4. **Осипов В.И.** Природа прочностных и деформационных свойств глинистых пород. М.: Изд-во МГУ, 1979. 235 с.
5. **Осипов В.И.** Физико-химическая теория эффективных напряжений в грунтах // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2013. № 1. С. 3–24.
6. **Покровский Г.И.** Исследования по физике грунтов. М.–Л.: Госстройиздат, 1937.
7. **Ляшенко П.А., Денисенко В.В.** Вычисление характеристик микроструктуры грунта в опыте с компрессионным сжатием образца // Научный журнал КубГАУ. 2009. № 45 (01). <http://ej.kubagro.ru/2009/01/pdf/03.pdf>.
8. **Ляшенко П.А., Денисенко В.В.** Контактное взаимодействие элементов микроструктуры глинистого грунта // Научный журнал КубГАУ. 2012. № 04 (78). С. 278–305. <http://ej.kubagro.ru>.

REFERENCES

1. Goldstain M.N., The mechanical properties of soils (The main components of soil and their counteraction), Moscow, 1975, 375 p. (in Russian).
 2. Nerpin S.V., Chudnovsky A.F., The ground physics. Moscow, 1967, 583 p. (in Russian).
 3. Osipov V.I., Sokolov V.N., Ereemeev V.V., The clay covering of the oil and gas deposits, Moscow, 2001, 238 p. (in Russian).
 4. Osipov V.I., The solid and deformation properties nature of soils, Moscow, 1979, 235 p. (in Russian).
 5. Osipov V.I., *Geoecology. Engineering geology. Gydrogeology. Geocriology*, 2013, no. 1, pp. 3–24. (in Russian).
 6. Pokrovsky G.I., The ground physics researches, Moscow–Leningrad, 1937. (in Russian).
 7. Liashenko P.A., Denisenko V.V., *Nauchnyy zhurnal KubGAU* (Scientific journal KubSAU), 2009, no. 45 (01). <http://ej.kubagro.ru/2009/01/pdf/03.pdf> (in Russian).
 8. Liashenko P.A., Denisenko V.V., *Nauchnyy zhurnal KubGAU* (Scientific journal KubSAU), 2012, no. 04 (78), pp. 278–305. <http://ej.kubagro.ru> (in Russian).
- Поступила 22.04.14 г.*

*CONTACT RESISTANCE MECHANICS OF CLAY
UNDER THE UNIAXIAL COMPRESSION*

P.A. LIASHENKO¹, V.V. DENISENKO²

¹ *Kuban State Agrarian University,
13, Kalinina st., Krasnodar, Russian Federation, 350044; e-mail: lyseich1@yandex.ru*

² *Kuban State Technological University,
2, Moskovskaya st., Krasnodar, Russian Federation, 350072; e-mail: devivi@yavdex.ru*

The element contact model of clay is suggested. It includes the contact clay particle which are binding all soil microstructure elements and defines the elastic and plastic-viscous deformations of soil body. By for example of the uniaxial compression under the constant rate of deformation provides the slide surface into the sample of clay soil so the probability of numerical estimation of the contact resistance appears clearly. The analysis of «deformation–pressure rate» diagram gives us the instrument of determination of microstructure characteristics which explain all known forms of soil resistance to the external load. The

authors give the simple and accessible laboratory method of the sample reaction measuring and the algorithm of the data processing. The paper contains the example of its using.

Key words: soil, contact resistant model, contact particle, elastic deformation, plastic-viscous deformation, soil microstructure characteristics.