

*МОДЕЛЬ КОНТАКТА ГЛИНИСТЫХ ЧАСТИЦ***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: denvivi@yandex.ru*

Накопленный материал исследований глинистых грунтов дает достаточное число научных оснований для построения модели контакта глинистых частиц. Этот материал включает описание контактов по морфологическим признакам, обобщающее микроскопические наблюдения, физическую природу контактов, механические свойства грунтов. Предлагаемая авторами модель контакта глинистых частиц представляет собой подвижную модификацию контакта «базис-скол», в котором пластинчатая частица своим «сколом» (ребром) связана силами ближней агрегации с «базисом» (гранью) частиц, входящих в состав микроагрегата. Решение задачи об упругом и неупругом сопротивлении глинистого контакта показывает, что нормальная и касательная составляющие реакции на площадке скольжения ограничены физической природой минералов.

Ключевые слова: глинистые частицы, контакт глинистых частиц, модель контакта глинистых частиц, пластинчатые частицы, микроагрегат, площадки скольжения.

Модель микроструктуры глинистого грунта должна включать в себя модель контакта глинистых частиц в качестве опорного элемента. Попытки создать модель контакта предпринимались неоднократно, но не привели к построению модели микроструктуры, пригодной для применения к описанию поведения макроскопических тел: оснований зданий и сооружений, массивов глинистых пород, инженерных сооружений из грунта [1-3].

Накопленный материал исследований глинистых грунтов дает достаточное число научных оснований для построения модели контакта глинистых частиц, адекватной их поведению при деформациях микроструктуры и пригодной для инженерных расчетов. Этот материал включает описание контактов по морфологическим признакам, обобщающее микроскопические наблюдения, физическую природу контактов, механические свойства грунтов. Контакты типов «базис-базис», «базис-скол» присущи глинистым частицам, имеющим пластинчатую, чешуйчатую, игольчатую формы. Спонтанное образование микроагрегатов глинистых частиц происходит

<http://ntk.kubstu.ru/file/1628>

под действием сил, описываемых по теории Дерягина-Ландау-Фервея-Овербека (ДЛФО) кривой потенциала сил с двумя минимумами. Упругое сопротивление деформациям и вязко-пластическое течение по поверхностям скольжения являются реакцией на внешнюю нагрузку. Большая неоднородность глинистых грунтов, включающих частицы неглинистых минералов, влечет за собой неравномерное развитие деформаций как во времени, так и в пространстве грунтового тела.

Представим микроструктуру глинистого грунта в виде морфологической модели, основанной на понимании А. Казагранде строения скелета и взаимодействия его частей (рисунок 1).

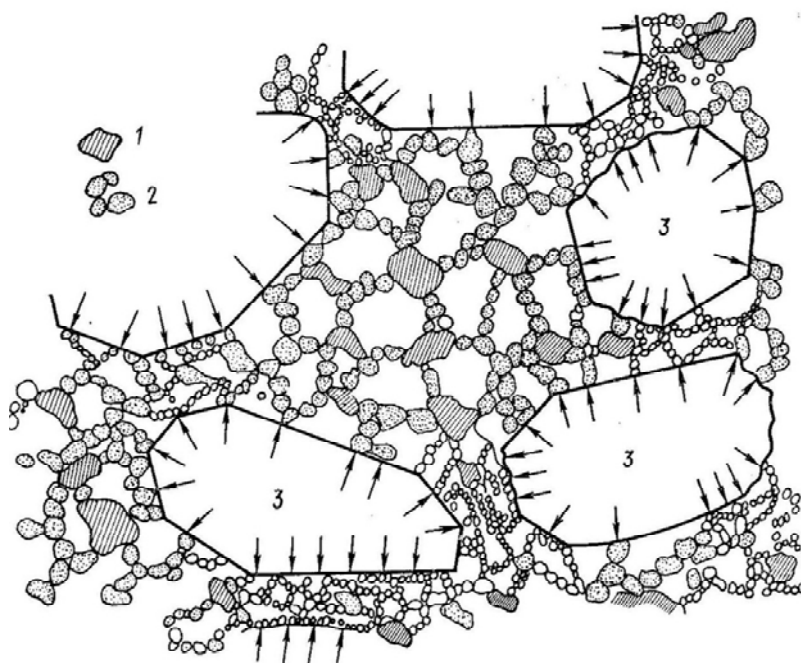


Рисунок 1 – Морфологическая модель микроструктуры глинистого грунта по А. Казагранде: 1 – микроагрегаты глинистых частиц; 2 – песчаные и пылеватые зерна

Примем, что скелет грунта состоит из зерен неглинистых минералов (песчаных и пылеватых частиц), скрепленных частицами глинистых минералов. Известно, что глинистые частицы объединяются в прочные микроагрегаты, границы которых кажутся размытыми при визуальном изучении [3]. Последнее является, по-видимому, следствием того, что на границах микроагрегатов расположены глинистые частицы, не вполне объединившиеся с ними. Эти периферийные частицы слабее связаны с внутренними частицами

микроагрегатов, чем внутренние между собой, а, следовательно, обладают бóльшей подвижностью [4-10].

Главная особенность периферийных глинистых частиц состоит в том, что посредством их взаимодействуют как микроагрегаты, так и минеральные зерна. Периферийные глинистые частицы (назовем их *контактирующими частицами*) составляют, с одной стороны, клеящее вещество, цементирующее все элементы грунта в твердое тело, а с другой, – образуют слабый слой, по которому более жесткие элементы перемещаются друг относительно друга.

Следуя принятым ранее классификациям [3], будем называть зазоры между микроагрегатами микропорами, а зазоры между глинистыми частицами внутри микроагрегатов – ультрамикропорами. Различие между ними определяется условиями взаимодействия их берегов. Известно, что для плоскопараллельных берегов оно описывается силами, потенциал которых является функцией расстояния между берегами, и эта функция имеет два минимума (рисунок 2).

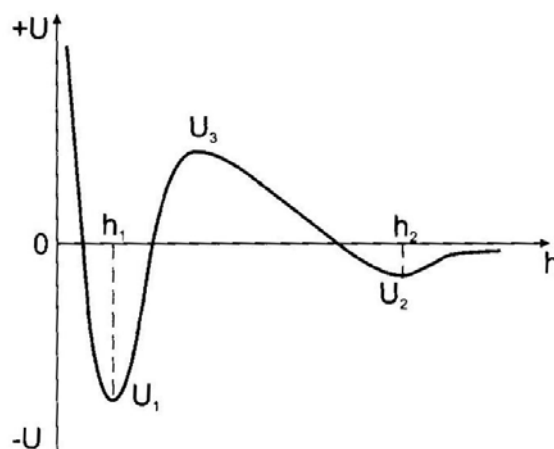


Рисунок 2 – Потенциальная энергия связи параллельных глинистых поверхностей в зависимости от расстояния между ними по [3]

Ширина микропор определяется расстоянием между глинистыми поверхностями, при котором потенциальная энергия $U(r)$ их взаимодействия находится во втором минимуме, или «дальней потенциальной яме», при $r = h_2$. Ширина ультрамикропор равна расстоянию до первого минимума, или «ближней потенциальной ямы», при $r = h_1$. Известно, что силы взаимодействия при этих расстояниях между параллельными глинистыми пластинками

<http://ntk.kubstu.ru/file/1628>

существенно различны, а именно $R(h_1) > R(h_2)$ [3]. Меньшая прочность связи берегов микропор приводит к тому, что по микропорам происходят перемещения микроагрегатов при деформациях грунтового тела.

Частицы, взаимодействующие базальными параллельными поверхностями, сближенными на расстояние h_1 , образуют микроагрегаты, внутри которых действуют устойчивые конструкции типа «базис-базис». Сила связей глинистых частиц в них наиболее велика, что объясняет прочность и жесткость микроагрегатов. Следовательно, микроагрегаты могут рассматриваться как жесткие недеформируемые элементы микроструктуры грунта. Они имеют, как правило, изометричную форму, обеспечивающую им сопротивляемость механическим воздействиям.

Кроме микропор в глинистом грунте наблюдаются макропоры [3]. Макропоры крупнее по размерам и отличаются от микропор тем, что на большей части их берегов отсутствует молекулярное взаимодействие. Минеральные частицы, слагающие макропоры, соединяются между собой в контактах типа «базис-скол» и образуют относительно устойчивую, но подвижную конструкцию.

Используя эти наблюдения, предположим, что устойчивой макропорой может быть конструкция типа «шалашика», образованного крупными частицами неглинистых минералов, соединенными глинистыми частицами (рисунок 3). В полости «шалашика» нет частиц, подкрепляющих его, а потому «шалашик» может быть разрушен дополнительным к природному воздействием на него со стороны окружающих элементов микроструктуры.

«Шалашик» под нагрузкой трансформируется в микропору, т.е. схлопывается до ширины микропоры, если он лежит на поверхности максимальных касательных напряжений $\Omega = \{\tau_{\max}\}$, когда они достигают предельного значения $\tau_{\max} = \tau_{\lim}$. В момент трансформации происходит освобождение объема, занимаемого прежде макропорой, и он заполняется микроагрегатами, скользящими по микропоре, лежащей на $\Omega = \{\tau_{\max}\}$.

Кооперативная трансформация «шалашиков», находящихся в одинаковых условиях на фронте $\Omega = \{\tau_{\max}\}$, вызывает увеличение скорости его движения при постоянной скорости нагружения образца.

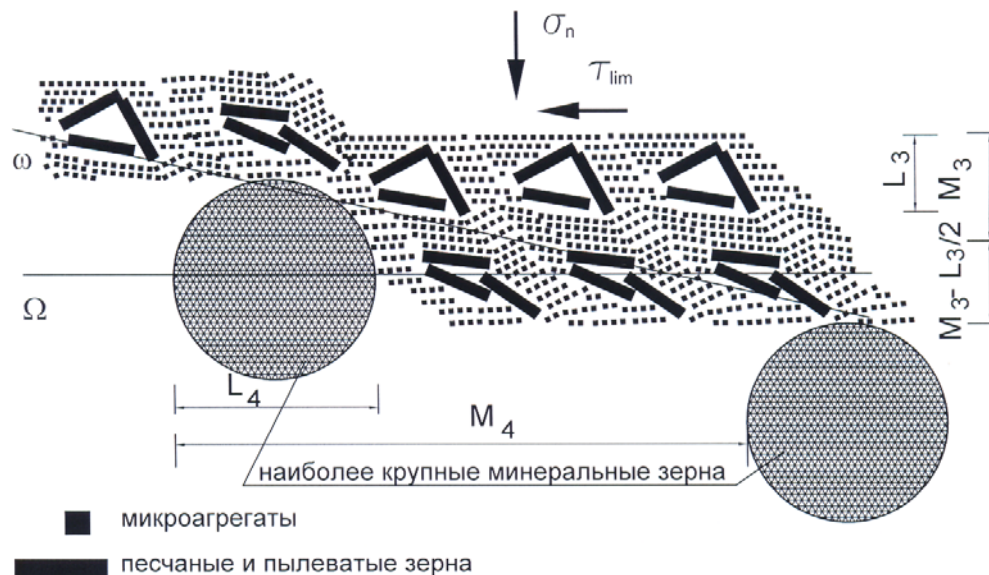


Рисунок 3 – Четырехпорядковая микроструктура глинистого грунта, образованная микроагрегатами глинистых частиц, песчаными и пылеватыми минеральными зёрнами, образующими наиболее крупные поры, наиболее крупными минеральными зёрнами и контактирующими глинистыми частицами (на рисунке не показаны)

Напротив, наиболее крупные минеральные зёрна, лежащие на $\Omega = \{\tau_{\max}\}$, тормозят движение микроагрегатов по микропоре, создавая «шпоночный» эффект.

Кооперативное торможение и кооперативная трансформация «шалашиков» регистрируются прибором, как скачек деформации образца на его границе при сжатии постоянно возрастающим давлением. Размеры скачков помогают оценить обобщенные размеры элементов микроструктуры и средние расстояния между ними [9-11].

Предлагаемая нами модель контакта глинистых частиц представляет собой подвижную модификацию контакта «базис-скол», в котором пластинчатая частица своим «сколом» (ребром) связана силами ближней агрегации с «базисом» (гранью) частиц, входящих в состав микроагрегата. Деформация микроструктуры внешней силой приводит к повороту пластинчатой частицы,

вызывая ее упругую реакцию, возрастающую по мере уменьшения угла между гранями взаимодействующих частиц. Упругая реакция обусловлена действием сил ДЛФО и имеет характер отталкивания при уменьшении расстояний между точками частиц до критической величины, после которой притяжение между ними приводит к слиянию пластинчатой частицы с микроагрегатом [8-14].

Если до слияния касательные напряжения на поверхности микроагрегата достаточно велики, чтобы преодолеть сопротивление сдвигу пластинчатой частицы, то она перемещается по поверхности микроагрегата, испытывая вязкое трение жидкости в зазоре между смежными микроагрегатами (в микропоре). Это перемещение формирует площадку скольжения между смежными микроагрегатами. Непрерывная последовательность площадок образует поверхность скольжения, перемещения по которой имеют макроскопический размер [8-14].

Образование площадок скольжения в глинистом грунте происходит при деформациях грунтового тела. Испытания образцов грунтов, оснований и грунтовых сооружений показывают, что при самых малых нагрузках в них возникают необратимые деформации. Это происходит потому, что силы связи между частицами малы, они намного меньше прочности самих частиц [1]. В глинистом грунте силы связи зависят от расстояний между поверхностями частиц глинистых минералов. Известны два уровня значений этих сил: дальней и ближней агрегации. Первые из них намного слабее вторых, именно они нарушаются при деформациях грунтового тела [15].

Силы ближней агрегации связывают между собой частицы, образуя прочные микроагрегаты, которые при деформациях макроскопического тела перемещаются как жесткие тела, взаимодействуя со смежными микроагрегатами силами дальней агрегации. Преодоление сил дальней агрегации под действием внешней нагрузки приводит к образованию площадки скольжения, разделяющей смежные микроагрегаты [9, 10, 12].

Группа площадок скольжения, последовательно образующихся на поверхности максимальных касательных напряжений, формирует в грунтовом

<http://ntk.kubstu.ru/file/1628>

теле поверхность скольжения макроскопического размера. Скольжение микроагрегатов по поверхности скольжения проявляется как необратимая деформация грунтового тела. Она продолжается до тех пор, пока напряжения от внешней нагрузки не уравниваются упругой реакцией контактов во всем грунтовом теле и вязким трением на площадках скольжения. Деформация развивается как в процессе нагружения грунтового тела, так и по окончании нагружения как деформация ползучести.

Неоднородность грунта вызывает торможение поверхностей скольжения g при прохождении их через крупные жесткие элементы (минеральные зерна), лежащие на поверхностях максимальных касательных напряжений Ω , что вызывает отклонение от нее физической поверхности скольжения ω на угол δ (рисунок 4). Одновременное влияние большого числа наиболее крупных зерен на движение фронта поверхности скольжения создает кооперативный эффект циклического изменения скорости деформации с шагом $\dot{I}_{4,r}$, регистрирующийся приборами [8, 10, 12, 14, 15].

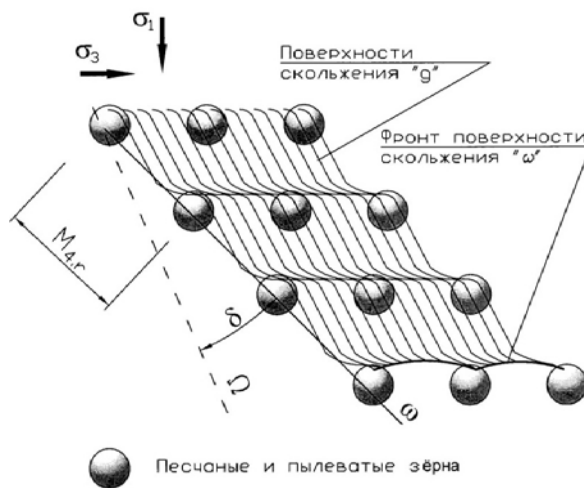


Рисунок 4 – Ступенчатое развитие поверхности скольжения

Непрерывная регистрация приборами деформации образца грунта при постоянной скорости нагружения дает информацию о микроструктуре грунта, которую можно использовать при прогнозе деформации грунтового основания или сооружения, выполненного из этого грунта в заданном его состоянии [10-15].

Решение задачи об упругом и неупругом сопротивлении глинистого контакта показывает, что нормальная и касательная составляющие реакции на площадке скольжения ограничены физической природой минералов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гольдштейн М.Н. Механические свойства грунтов: (Напряженно-деформативные и прочностные характеристики). – М.: Стройиздат, 1979. – 304 с.
2. Осипов В.И., Соколов В.Н., Румянцева Н.А. Микроструктура глинистых пород. – М.: Недра, 1989. – 211 с.
3. Кульчицкий Л.И., Усъяров О.Г. Физико-химические основы формирования свойств глинистых пород. – М.: Недра, 1981. – 178 с.
4. Денисенко В.В., Ляшенко П.А. Ускоренное определение сжимаемости грунтов методом ПВН // Проект. – 1994, № 1. – С. 7-9.
5. Денисенко В.В., Ляшенко П.А. Новые результаты компрессионных испытаний грунтов // Проект. – 1995, № 2-3. – С. 76-77.
6. Денисенко В.В., Ляшенко П.А. Анализ методов компрессионных испытаний грунтов // Научные труды Кубанского государственного технологического университета. – 2015, № 2. – С. 104-125. – URL: <http://ntk.kubstu.ru/file/337>.
7. Ляшенко П.А. Микроструктурная модель деформации глинистого грунта и почвы // Труды КубГАУ. – Краснодар: КубГАУ. – 2006, вып. 2. – С. 261-268.
8. Ляшенко П.А. Модель деформации микроструктуры грунта // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2005. – № 11 (03). – С. 34-52. – URL: <http://ej.kubagro.ru/2005/03/02/p02.asp>.
9. Ляшенко П.А. Микроструктурная деформируемость глинистых грунтов. – Краснодар: Изд-во КубГАУ, 2001. – 123 с.
10. Ляшенко П.А. Сопротивление и деформации глинистого грунта. – Краснодар: Изд-во КубГАУ, 2014. – 161 с.

11. Ляшенко П.А., Денисенко В.В. Вычисление характеристик микроструктуры грунта в опыте с компрессионным сжатием образца // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2009. – № 45 (1). – С. 66-82. – URL: <http://ej.kubagro.ru/2009/01/pdf/03.pdf>.

12. Денисенко В.В., Ляшенко П.А. Сопротивление микроструктуры глинистого грунта внешней нагрузке // Инженерные подходы к решению геотехнических задач: сборник научных трудов, посвященный 80-тилетию К.Ш. Шадунца. – Краснодар: КубГАУ, 2013. – С. 48-53.

13. Ляшенко П.А., Денисенко В.В. Контактное взаимодействие элементов микроструктуры глинистого грунта // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2012, № 78 (04). – С. 291-318. – URL: <http://ej.kubagro.ru/2012/04/pdf/25.pdf>.

14. Ляшенко П.А., Денисенко В.В. Механика контактного сопротивления глинистого грунта при одноосном сжатии // Научные труды Кубанского государственного технологического университета. – 2014, № 1. – С. 116-130. – URL: <http://ntk.kubstu.ru/file/14>.

15. Ляшенко П. А., Денисенко В. В. Расчёт осадки основания фундамента по результатам испытания штампом // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2009. – № 47 (03). – URL: <http://ej.kubagro.ru/2009/03/pdf/01.pdf>.

REFERENCES

1. Goldstein M.N. Mechanical properties of soils: (Stress-strain and strength characteristics). – Moscow: Stroiizdat, 1979. – 304 p.

2. Osipov V.I., Sokolov V.N., Rumyantseva NA Microstructure of clay rocks. – Moscow: Nedra, 1989. – 211 p.

3. Kulchitsky L.I., Usyarov O.G. Physicochemical basis of formation of properties of clay rocks. – Moscow: Nedra, 1981. – 178 p.

4. Denisenko V.V., Lyashenko P.A. Accelerated determination of the compressibility of soils using the PRT method // Project. – 1994, No. 1. – P. 7-9.

<http://ntk.kubstu.ru/file/1628>

5. Denisenko V.V., Lyashenko P.A. New results of compressive tests of soils // Project. – 1995, № 2-3. – P. 76-77.

6. Denisenko V.V., Lyashenko P.A. The analysis of methods of compressive tests of soils // Scientific works of the Kuban State Technological University. – 2015, № 2. – P. 104-125. – URL: <http://ntk.kubstu.ru/file/337>.

7. Lyashenko P.A. Microstructural model of deformation of clay soil and soil // Proceedings of KubSU. – Krasnodar: KubGAU. – 2006, № 2. – P. 261-268.

8. Lyashenko P.A. Model of deformation of the microstructure of the soil // Polytematic network electronic scientific journal of the Kuban State Agrarian University. – 2005. – № 11 (03). – P. 34-52. – URL: <http://ej.kubagro.ru/2005/03/02/p02.asp>.

9. Lyashenko P.A. Microstructural deformability of clay soils. – Krasnodar: Publishing House of KubSAU, 2001. – 123 p.

10. Lyashenko P.A. Resistance and deformation of clay soil. – Krasnodar: Publishing house KubGAU, 2014. – 161 p.

11. Lyashenko P.A., Denisenko V.V. Calculation of the microstructure characteristics of the soil in the experiment with compression of the sample // Polytematic network electronic scientific journal of the Kuban State Agrarian University. – 2009. – № 45 (1). – P. 66-82. – URL: <http://ej.kubagro.ru/2009/01/pdf/03.pdf>.

12. Denisenko V.V., Lyashenko P.A. Resistance of the microstructure of clay soil to an external load // Engineering approaches to the solution of geotechnical problems: a collection of scientific works dedicated to the 80th anniversary of K.Sh. Shadunts. – Krasnodar: KubGAU, 2013. – P. 48-53.

13. Lyashenko P.A., Denisenko V.V. Contact interaction of elements of a microstructure of a clay soil // The Polytechnical network electronic scientific magazine of the Kuban state agrarian university. – 2012, № 78 (04). – P. 291-318. – URL: <http://ej.kubagro.ru/2012/04/pdf/25.pdf>.

14. Lyashenko P.A., Denisenko V.V. Mechanics of contact resistance of clayey soil under uniaxial compression // Scientific works of the Kuban State Technological University. – 2014, № 1. – P. 116-130. – URL: <http://ntk.kubstu.ru/file/14>.

15. Lyashenko P.A., Denisenko V.V. Calculation of the basement foundation sediment by the stamp test results // Polymatic network electronic scientific journal of the Kuban State Agrarian University. – 2009. – № 47 (03). – URL: <http://ej.kubagro.ru/2009/03/pdf/01.pdf>.

MODEL OF CONTACT OF CLAY PARTICLES

P.A. LYASHENKO¹, V.V. DENISENKO²

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

²*Kuban State Technological University,
2, Moskovskaya str., Krasnodar, Russian Federation, 350072,
e-mail: denvivi@yandex.ru*

The accumulated material of studies of clay soils gives a sufficient number of scientific grounds for constructing a model of contact between clay particles. This material includes the description of contacts by morphological features, generalizing microscopic observations, the physical nature of contacts, and the mechanical properties of soils. The model of contact between clay particles proposed by the authors is a mobile modification of the "base-cleave" contact in which the lamellar particle, by its "cleavage" (edge), is connected by the forces of near aggregation to the "basis" (face) of the particles that make up the microaggregate. The solution of the problem of the elastic and inelastic resistance of clay contact shows that the normal and tangential components of the reaction at the slip site are limited by the physical nature of the minerals.

Key words: clay particles, clay particles contact, clay particles contact model, lamellar particles, microaggregate, slip sites.