

УДК 624.131

UDC 624.131

**КОНТАКТНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ
ЭЛЕМЕНТОВ МИКРОСТРУКТУРЫ
ГЛИНИСТОГО ГРУНТА****CONTACT INTERACTION OF CLAYEY SOIL
MICROSTRUCTURE ELEMENTS**

Ляшенко Павел Алексеевич
к.т.н., профессор
*Кубанский государственный аграрный
университет, Краснодар, Россия*

Liashenko Pawel Alekseevich
Cand.Tech.Sci., professor
Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Russia

Денисенко Виктор Викторович
к.т.н., доцент
*Кубанский государственный технологический уни-
верситет, Краснодар, Россия*

Denisenko Viktor Viktorovich
Cand.Tech.Sci., associate professor
*Kuban State Technology University, Krasnodar,
Russia*

Предложена концепция подвижного контакта между глинистыми частицами и их микроагрегатами. Контакт представлен в виде плоской частицы между микроагрегатами, имеющей возможность поворота вокруг точки крепления к одному из них и взаимодействующей с обоими. Показано, что контактирующая частица оказывает упругое и пластично-вязкое сопротивление взаимному перемещению микроагрегатов

The conception of mobile contact has been suggested for the clay particles and their microaggregates. The contact has been presented as the plane particle between microaggregates, which can turn over the point of fixing to one of them and interacts with both of them. There has been shown that contact particle describes elastic and plastic-viscous resistance to transference of adjacent microaggregates

Ключевые слова: ГЛИНИСТАЯ ЧАСТИЦА, МИКРОАГРЕГАТ, КОНТАКТИРУЮЩАЯ ЧАСТИЦА, УПРУГОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ, ПЛАСТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ, ВЯЗКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ

Keywords: CLAYEY PARTICLE, MICROAGGREGATE, CONTACT PARTICLE, ELASTIC RESISTANT, PLASTIC DEFORMATION, VISCOUS DEFORMATION

1 Введение

Глинистый грунт испытывает упругую и вязкопластичную деформацию при внешнем воздействии на грунтовое тело. «При нагружении в грунтах возникают значительные пластические деформации как в допредельном, так и в предельном по прочности состоянии. При этом пластические деформации возникают при формоизменении, а объёмные деформации в грунте являются остаточными... Сдвиговые пластические деформации грунтов сопровождаются остаточными объёмными деформациями» [1].

Глинистые частицы грунта являются коллоидными, т. е. состоят из глинистого минерала и водных пленок на поверхностях частиц, и способны к коагуляции и образованию микроагрегатов. «Отдельные частицы в глинистых породах, как правило, объединены в

ультрамикроагрегаты и микроагрегаты. Первые представляют собой ассоциации из нескольких частиц, обычно взаимодействующих по типу базис-базис и имеющих пластинчатую или листообразную форму... Важная особенность ультрамикроагрегатов – их достаточно высокая прочность... Микроагрегаты представляют собой ассоциации глинистых частиц и ультрамикроагрегатов, не распадающиеся в воде при отсутствии физико-химических диспергаторов и механического воздействия. Микроагрегаты – основной структурный элемент природных глин» [2]. Например, «основные твёрдые структурные элементы матричной микроструктуры – микроагрегаты с размерами 4-15 мкм и более мелкие удлинённые микроагрегаты, толщина которых может достигать 2 мкм, а длина 6 мкм» [2].

«Разрушение и деформирование глинистых пород идет по контактам структурных элементов, поскольку прочность контактов намного меньше прочности слагающих породу минералов» [2]. Прочность контактов глинистых частиц определяется взаимодействием их поверхностей с неуравновешенными зарядами и участками поляризации («микроучастков поверхности» [2]) и «характеризуется наличием двух потенциальных минимумов на расстояниях h_1 и h_2 (получивших название соответственно ближнего и дальнего), а также разделяющего их энергетического барьера отталкивания U_{\max} » [3] при расстоянии b между поверхностями на кривой энергии взаимодействия $U(r)$. «Если сила, действующая на контакт, превысит величину... барьера, то произойдёт самопроизвольное сближение частиц... частицы как бы попадают в «молекулярную ловушку»» [4] при расстоянии h_1 между глинистыми поверхностями.

«Молекулярная ловушка» создаёт условия ближней агрегации - наиболее прочной связи между глинистыми частицами. «Прочность коагуляционного контакта в ближнем потенциальном минимуме...

варьирует в пределах от $1 \cdot 10^{-9}$ до $5 \cdot 10^{-8}$ Н... минимальное значение характерно для двух сферических частиц микронного размера, а максимальное - для двух параллельных плоских частиц такого же размера» [2]. При расстоянии, меньшем h_1 , в водном слое между глинистыми поверхностями возникает расклинивающее давление, резко возрастающее при дальнейшем сближении поверхностей [3, 4].

При взаимодействии по типу дальней агрегации, при которой расстояния между глинистыми поверхностями h_2 достигает «нескольких десятков нанометров», прочность связей «составляет не более 10^{-10} Н» [2].

Прямое измерение энергии взаимодействия частиц монтмориллонита в водных растворах электроосмотическим методом позволило построить потенциальные кривые [5], по которым можно вычислить силу взаимодействия. Она достигает $8 \cdot 10^{-7}$ Н, что превышает предыдущую оценку, также полученную на основе эксперимента.

Такое большое различие не может быть объяснено только разными условиями экспериментов и материалов. Причина его видится в ограниченности представления о контакте глинистых поверхностей, как о точке касания их твёрдых фаз или участка перекрытия их водных оболочек. Механизм контакта более сложен. Это следует, прежде всего, из известного закона взаимодействия глинистых поверхностей $U(r)$. Он имеет два потенциальных минимума, что позволяет объяснить различие сил внутри микроагрегатов и между микроагрегатами.

Согласно этому закону, увеличение внешней силы встречает реакцию отталкивания в местах контактов микроагрегатов между собой, а уменьшение внешней силы – реакцию притяжения. Значения обеих реакций в состоянии дальней агрегации меньше, чем в случае ближней агрегации, и могут быть преодолены внешней нагрузкой, что приведёт к

деформации грунтового тела, к разрушению части контактов и скольжению по площадкам, на которых произошло это разрушение.

Преодоление потенциального барьера приводит к слиянию частиц силами ближней агрегации и образованию микроагрегатов. Размеры микроагрегатов таковы, что внешнее механическое воздействие на них: сжатие с изгибом и сжатие со сдвигом - не может преодолеть сил притяжения, соответствующих ближней агрегации, и разрушить их. Поэтому микроагрегаты следует считать жёсткими элементами микроструктуры, имеющими на граничных поверхностях глинистые поверхности с неуравновешенными зарядами.

Таким образом, морфологически глинистая среда может быть представлена в виде микроагрегатов, взаимодействующих по типу дальней агрегации и состоящих из частиц, связанных между собой силами ближней агрегации. Микроагрегаты связаны между собой менее жёсткими и менее прочными контактами, в которых реализуются упругие, пластические и вязкие свойства грунта.

Зёрна неглинистых минералов взаимодействуют с глинистой средой через «глинистые рубашки» [2], следовательно, ведут себя, в механическом отношении, как крупные микроагрегаты.

Листообразные и пластинчатые глинистые частицы при непосредственном контакте типа «базис-базис» оказывают сопротивление взаимному перемещению только двух видов: упругое – нормальному и вязкое - тангенциальному. Взаимное тангенциальное перемещение глинистых частиц и микроагрегатов не ограничено по величине и может происходить при сколь угодно малом касательном напряжении в микропоре между ними – до тех пор, пока напряжение не релаксирует. Нормальное перемещение ограничено сопротивлением на потенциальном барьере или, после его преодоления, - расклинивающим давлением при слиянии глинистых частиц.

Растягивающие силы вызывают вращающий момент в контакте типа «базис-базис», поворот одной частицы относительно другой, упругое растяжение и вязкое скольжение в микропоре, преобразующее его в контакт типа «базис-скол».

Таким образом, представление контакта, как точки соприкосновения двух упругих тел, недостаточно для глинистых частиц. Оно не описывает с достаточной полнотой некоторые свойства грунта: упругие (нет упругого сопротивления сдвигу), пластические (не обозначено отличное от нуля значение напряжения, после которого перемещение имеет необратимый пластично-вязкий характер) и вязкие (отсутствует предел ползучести).

Контакт типа «базис-скол» обладает бóльшим набором деформационных свойств. «Широкие пределы изменения прочности индивидуальных коагуляционных контактов определяются как бóльшим диапазоном изменения расстояния между частицами, так и геометрической разновидностью самих контактов» [7]. Действительно, поворот частицы вокруг точки крепления её к базису другой частицы осуществляется меньшей силой и приводит к большему взаимному перемещению элементов микроструктуры. Кроме того, в случае предельной деформации, контакт типа «базис-скол» переходит в контакт типа «базис-базис» скачкообразно, вызывая пластическую деформацию микропоры.

Взаимодействие микроагрегатов происходит благодаря силам притяжения-отталкивания между глинистыми частицами на периферии смежных микроагрегатов. Микроскопические исследования показывают, что между ними нет чётких границ. «Границы между микроагрегатами прослеживаются плохо, и один микроагрегат постепенно переходит в другой» [2]. Следовательно, микропоры содержат неагрегированные глинистые частицы.

Они находятся в менее устойчивом равновесии, чем частицы в составе микроагрегатов, более чувствительны к внутренним напряжениям

в местах их концентрации вблизи пор и на жёстких зёрнах. Деформации, обусловленные движением неагрегированных частиц, намного больше деформаций водных плёнок, поэтому заметны на границах грунтового тела даже при малых нагрузках и в самом начале нагружения.

Неагрегированные глинистые частицы осуществляют упругие контакты более крупных элементов микроструктуры: микроагрегатов и неглинистых зёрен, а при слиянии с крупными элементами обеспечивают условия пластично-вязкой деформации.

Модель контакта с неагрегированными глинистыми частицами (назовём их *контактирующими частицами*) должна отвечать следующим условиям:

1) микроагрегаты взаимодействуют между собой по типу *дальней агрегации* при посредстве отдельных *контактирующих частиц*. Контактирующая частица взаимодействует с одним из смежных микроагрегатов (базовым) по типу ближней агрегации, а с другим (смежным) – дальней агрегации. Расстояние *контактирующей частицы* до базового микроагрегата около h_1 , а до смежного – больше b .

2) *контактирующая частица* может поворачиваться в зазоре (микропоре) между микроагрегатами, при их взаимном сближении и удалении, вокруг точки прикрепления силой ближней агрегации к определённой точке («микроучастку поверхности» [2]) базового микроагрегата и силами дальней агрегации – к определённой точке смежного микроагрегата.

3) поворот *контактирующей частицы* обладает упругостью в некотором интервале значений угла наклона, за пределами которого происходит или слияние контактирующей частицы с базовым микроагрегатом, или утрата связи со смежным микроагрегатом. В последнем случае, возможен отрыв смежного микроагрегата от базового.

4) в момент слияния *контактирующая частица* утрачивает связь дальней агрегации со смежным микроагрегатом из-за дальности до него. Открывается возможность мгновенного смещения смежного микроагрегата относительно базового и его дальнейшее скольжение по водной плёнке в микропоре. Эта возможность может быть реализована при коллективном сопротивлении *группы контактирующих частиц*, находящихся одновременно в близких напряженных состояниях на ограниченной площадке внутри грунтового тела, и проявляется как пластично-вязкая деформация в микропоре между микроагрегатами.

5) согласно [2, 3, 4] коагуляция частиц в микроагрегаты с образованием внутри них связей *ближней агрегации* происходит до размеров, при которых микроагрегаты сохраняют целостность при взаимодействии, посредством «глинистых рубашек», с другими микроагрегатами и зёрнами неглинистых минералов. Прочность ближней агрегации определяется сопротивлением увеличению ширины ультрамикропоры от h_1 до b и уменьшению от h_1 до нуля. В последнем случае, сопротивление оказывает расклинивающее давление плёнок прочносвязанной воды. При рассмотрении макроскопического грунтового тела микроагрегаты можно принять жёсткими элементами.

2 Связь между микроагрегатами посредством контактирующих частиц (математическая модель контакта)

Представим модель контакта двух микроагрегатов глинистых частиц в форме плоской *контактирующей частицы*, базальная грань которой наклонена под углом b к нормали поверхности базового микроагрегата, взаимодействующей с базовым микроагрегатом в точке O по типу ближней агрегации, а со смежным - по типу дальней агрегации (Рисунок 1). По сути, *контактирующая частица* является частью первого

микроагрегата, но подвижной частью, способной к повороту вокруг точки O .

Основой расчёта является зависимость потенциальной энергии взаимодействия глинистых поверхностей от расстояния между ними, представленная кривой с двумя минимумами на расстояниях h_1 и h_2 и потенциальным барьером с координатой b , а также предельным расстоянием h_3 , на которое распространяется взаимодействие. Значения этих координат получены путём обработки данных компрессионных испытаний грунтов с постоянной скоростью увеличения нагрузки [8].

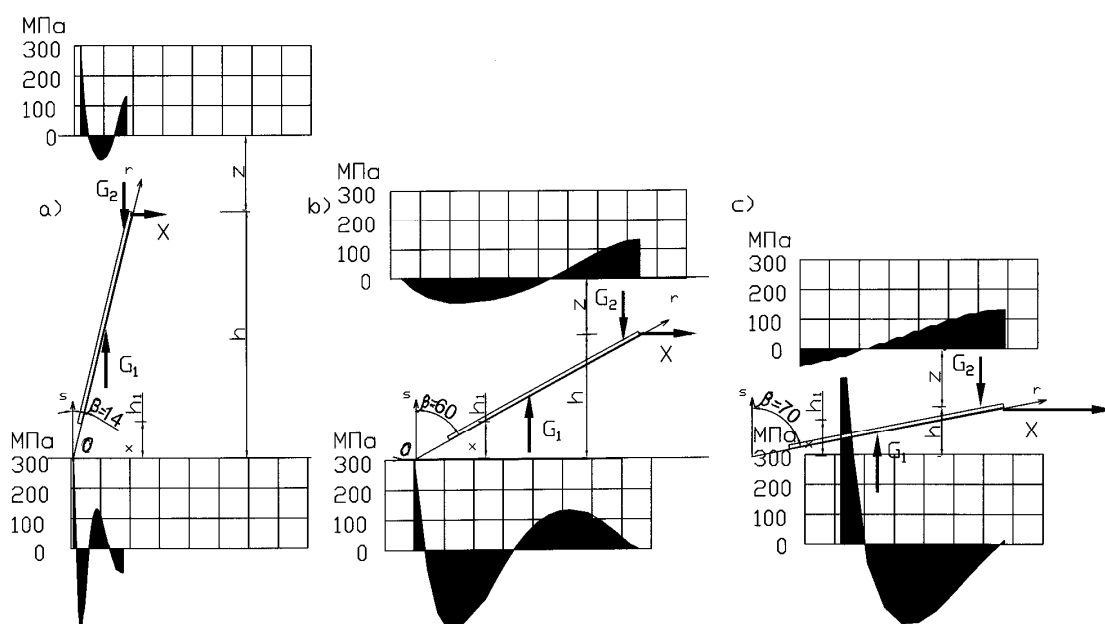


Рисунок 1 – Схема к расчёту условий равновесия контактирующей частицы при малом угле поворота (а), при угле поворота $35-70^\circ$ (б) и перед слиянием с базовым микроагрегатом

Пусть со стороны базового микроагрегата на контактирующую частицу действует распределённая нормальная к нему сила G_1 , со стороны смежного - сила G_2 и тангенциальная X (Рисунок 1). Силы G_1 и G_2 являются производными от потенциальной энергии взаимодействия.

Обозначим величину зазора между контактирующей частицей и смежным микроагрегатом через z , положив, что $z > b$.

Введём координаты с началом в точке ближней агрегации, направив ось Or вдоль грани контактирующей частицы. Длину контактирующей частицы в направлении оси Or примем равной h_3 , а угол b - будем отсчитывать по часовой стрелке от нормали Oy к поверхности базового микроагрегата.

$$\begin{aligned} G_1(s_1) &= U_0' F(s_1), \\ G_2(s_2) &= U_0' F(s_2), \end{aligned} \quad (1)$$

где U_0' - постоянная для данного грунта величина, МПа/м, определяемая путём обработки данных экспериментов с грунтом [6]; $F(r(s))$ - сила взаимодействия глинистых поверхностей на контакте частиц, s_1 и s_2 - расстояние между глинистыми поверхностями контактирующей частицы и микроагрегатами: базовым и смежным, соответственно, по нормали к поверхности базового микроагрегата.

Сила взаимодействия $F(s)$ получается дифференцированием выражения для кривой потенциальной энергии $U(s)$ взаимодействия глинистых поверхностей [8]:

$$\begin{aligned} F(s) &= -\frac{d}{ds} U(s); \\ U(s) &= U_0 e^{-\frac{s}{2}} (1 - 5s + 5s^2 - \frac{5}{3}s^3 + \frac{5}{24}s^4 - \frac{1}{120}s^5), \quad s \in [0; 7,2], \end{aligned} \quad (2)$$

$$s_1 = r 7,2 \cos b / h_3 ; \quad (3)$$

$$s_2 = 7,2 \cos b + 7,2 z / h_3 - s_1, \quad (4)$$

$U(s)$ - полином Лагерра 5-й степени [8]; (3) - для грани контактирующей частицы, обращённой к базовому микроагрегату, и (4) - для грани, обращённой к смежному микроагрегату; U_0 - постоянная для данного

грунта величина, МН/м, нормируемая в опыте с грунтом по значениям

$$V(s) = -\frac{d^2}{ds^2}U(s) \text{ [8].}$$

Уравнение моментов сил, действующих на контактирующую частицу, имеет вид:

$$\int_{s_{11}}^{s_{13}} G_1 r \sin b \, dr - \int_{s_{21}}^{s_{23}} G_2(s_2) r \sin b \, dr - X y = 0. \text{ (5)}$$

После подстановки (1)-(4) в (5) и преобразований получаем уравнение для вычисления тангенциальной реакции X контактирующей частицы, направленной вдоль оси Ox :

$$U_0 \frac{h_3^3}{7,2^3 \cos^2 b} \left[\int_{s_{11}}^{s_{13}} F(s_1) s_1 ds_1 - \sin b \int_{s_{21}}^{s_{23}} F(s_2) s_2 ds_2 + \right. \\ \left. + 7,2 \sin b \frac{h_3 \cos b + z}{h_3} \int_{s_{21}}^{s_{23}} F(s_2) ds_2 \right] - X y = 0, \text{ (6)}$$

где пределы интегрирования заданы формулами:

$$s_{11} = h_1 7,2 \cos b / h_3, \quad s_{13} = 7,2 \cos b,$$

$$s_{21} = 7,2 \cos b - h_1 7,2 \cos b / h_3 + 7,2 z / h_3, \quad s_{23} = 7,2 z / h_3.$$

Нормальная реакция базового микроагрегата рассчитана по формуле $Y = G_1 + G_2$, или, после подстановки (1), по формуле:

$$Y = U_0 \frac{h_3^2}{7,2^2 \cos b} \left[\int_{s_{11}}^{s_{13}} F(s_1) ds_1 - \frac{h_3}{7,2 \cos b} \int_{s_{21}}^{s_{23}} F(s_2) ds_2 \right], \text{ (7)}$$

Полная реакция контакта на сближение смежного микроагрегата с базовым имеет нормальную (Y) и тангенциальную (X) составляющие.

3 Результаты расчётов сопротивления контактирующей частицы

Расчёты были произведены для трёх образцов разных грунтов (суглинка твёрдого - образец № 100, глины полутвёрдой - образце № 103с, супеси тугопластичной - образец № 117а), испытанных в компрессионном приборе при постоянно возрастающей нагрузке и непрерывном измерении осадки образца с шагом регистрации обоих параметров 0,005 мм. По данным этих испытаний были определены значения h_1 , h_2 , b , h_3 и U_0' (Таблица 1).

Таблица 1 – Характеристики микроструктуры грунтов по данным компрессионных испытаний образцов [8]

Характеристики микроструктуры грунтов	h_1	b	h_2	h_3	U_0'
	нм	нм	нм	нм	МПа/м
Образец 100	87	284	618	890	405
Образец 103с	28	93	203	292	753
Образец 117а	42	138	315	431	388

В каждом расчёте задавались значения зазора z и угла наклона b , рассчитывались X и Y .

3.1 При постоянном значении z нормальная реакция $Y(b)$ ($Y > 0$ - сопротивление сжатию контакта, «отталкивание») изменяется по кривой с максимумом от значения $Y(0)$ до максимального Y_{max} при $b_m = 60-70^\circ$, а затем уменьшатся до нуля и отрицательных значений ($Y < 0$ - сопротивление растяжению контакта, «притяжение») при $b_{pl} = 85-87^\circ$ (Рисунок 2).

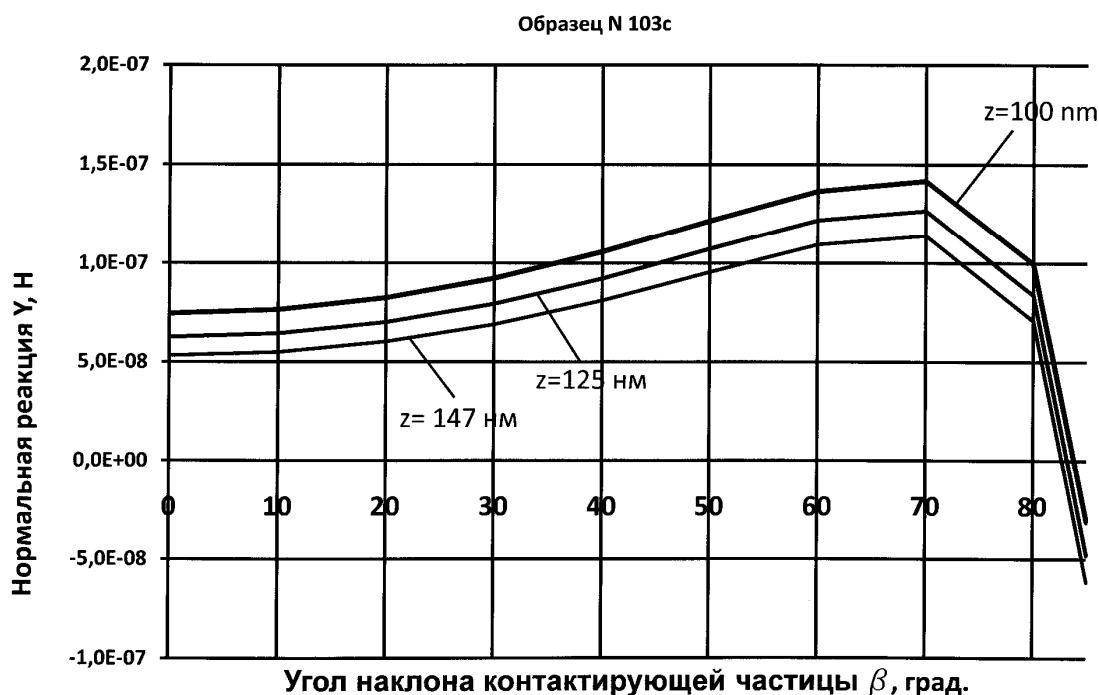


Рисунок 2 – Изменение нормальной реакции контактирующей частицы с увеличением угла наклона

Уменьшение $Y(b)$ после максимума происходит значительно быстрее (по b от b_m до b_{pl}), чем предшествующее увеличение до Y_{max} : производная от этой величины по b уменьшается на порядок при увеличении угла на 10^0 . Это свидетельствует о росте отношения сил притяжения к силам отталкивания после точки максимума, которое приводит к смене знака нормальной реакции – на «притяжение» - и к слиянию контактирующей частицы с базовым микроагрегатом, т. е. к переходу в состояние ближней агрегации с ним. Поэтому значение Y_{max} следует считать предельным значением нормальной реакции.

При $b \geq b_m$ контактирующая частица необратимо сливается с базовым микроагрегатом, освобождая микропору шириной z для пластично-вязкого перемещения смежного микроагрегата относительно базового, при этом микроагрегаты взаимодействуют в микропоре по типу дальней агрегации.

3.2 Величина $X(b)$ увеличивается от нуля при $b = 0$ монотонно и быстрее, чем $Y(b)$ (Рисунки 3а, 3б, 3с). Предельным для тангенциального сопротивления является значение $X(b_m)$, предшествующее моменту слияния контактирующей частицы с базовым микроагрегатом.

Увеличение зазора $z > b$ вызывает уменьшение значений $X(b_m)$ (Рисунки 5а, 6а, 7а) и приводит к появлению нулевых значений $X = 0$ при малых углах $b < b_0$, т. е. нулевое сопротивление сдвигу. Уравнение $X(z_t) = 0$ и определяет максимальную величину зазора $z = z_t$, при котором сохраняется ненулевое сопротивление сдвигу. При $X = 0$ происходит беспрепятственный сдвиг одного микроагрегата относительно другого, а при $s_t = -2Y(0)/h_3^2$ - отрыв микроагрегатов.

3.3 Величина Y даёт значение среднего реактивного напряжения $s_y = 2Y(b)/h_3^2$ на площадке максимального касательного напряжения в грунтовом теле. Эта площадка выбрана нами в качестве базовой $y = 0$. Предельный круг Мора (Рисунки 4, 5, 6), построенный радиусом $t_{lim} = s_y(b)/2$ из точки $(s_y(b); 0)$, ограничивает область, в которой напряжения от внешней нагрузки достигают предельных значений $t_{xy} = t_{lim}(b)$, $0 \leq b \leq b_0$, и вызывают необратимое вязкое перемещение

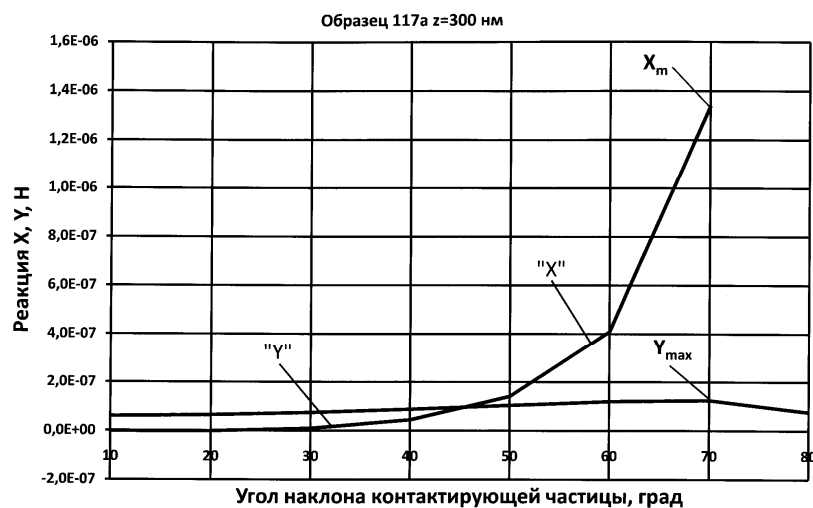
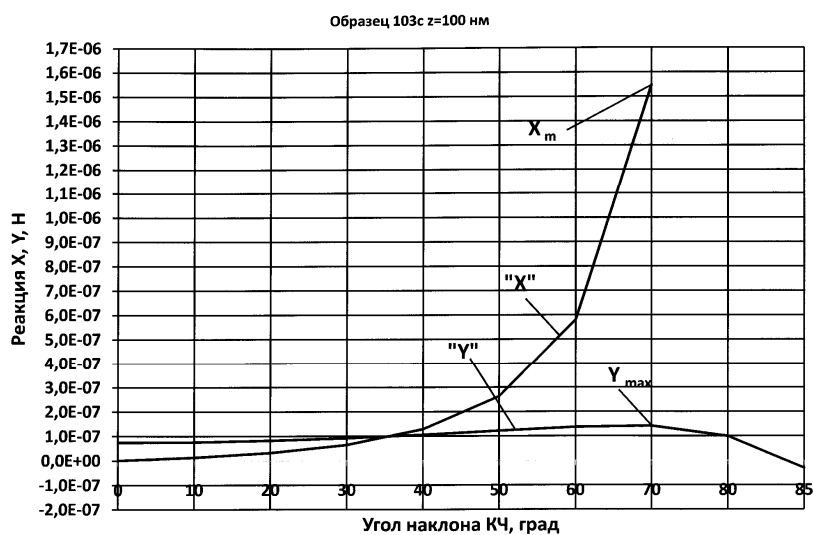
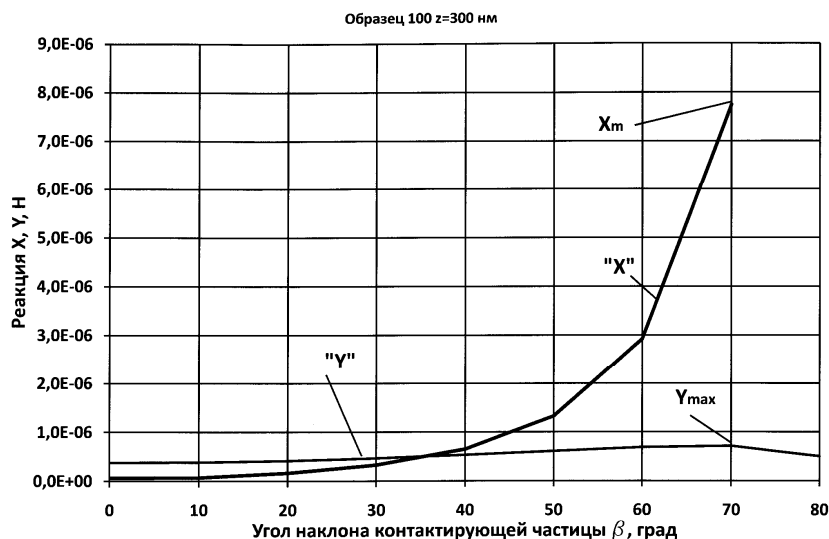


Рисунок 3 – Зависимости нормальной и тангенциальной реакций контактирующей частицы от угла наклона для образца твёрдого суглинка (№100), полу-

твёрдой глины (№103с) и пластичной супеси (№117а)

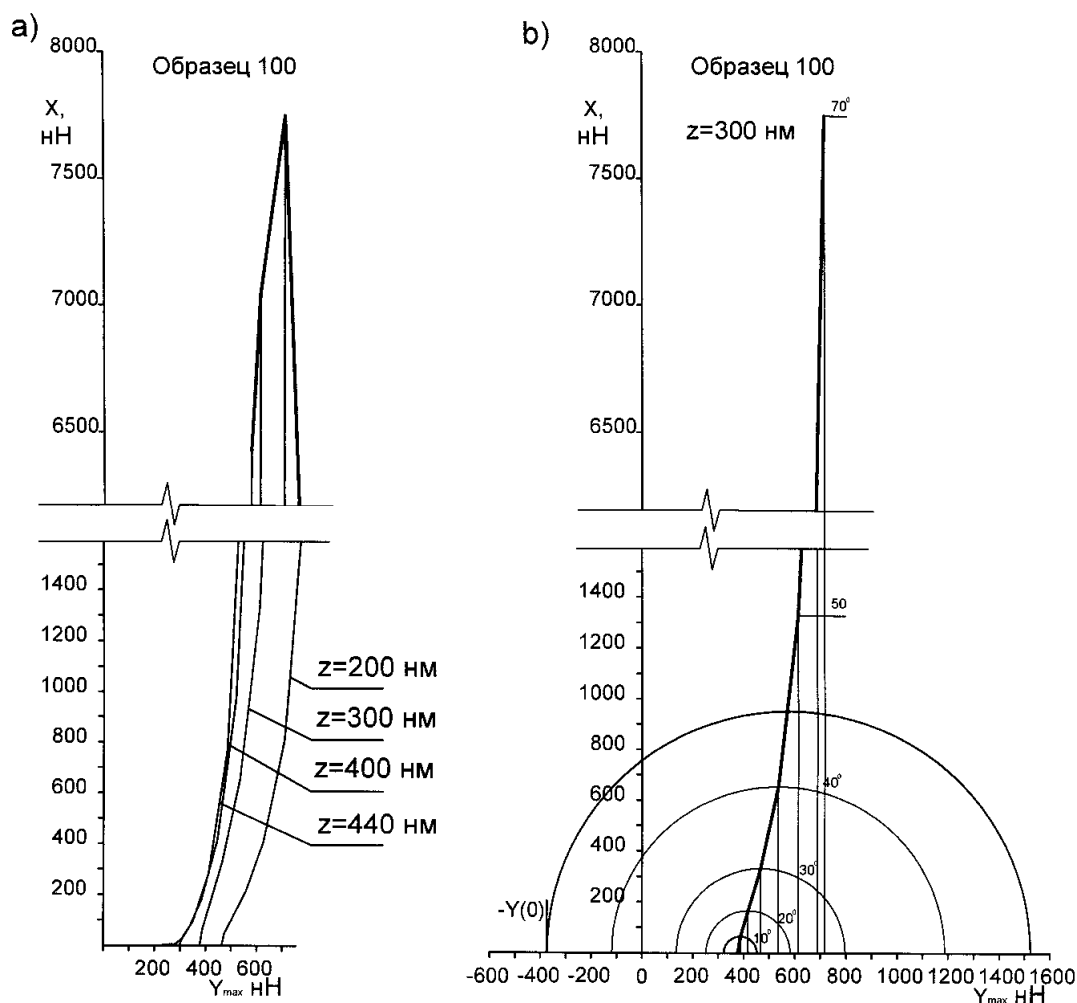


Рисунок 4 – Увеличение тангенциальной реакции с ростом среднего напряжения для разных значений ширины микропоры (а) и выделение упругой части для максимальной реакции при оптимальной ширине микропоры (б) - в твёрдом суглинке (образец № 100)

смежного микроагрегата относительно базового - контакт нарушается в точке $x=0$. Если значение t_{xy} находится внутри предельного круга, то деформация контактирующей частицы упруга: увеличение среднего напряжения S_y вызывает увеличение угла наклона, а уменьшение S_y - уменьшение b .

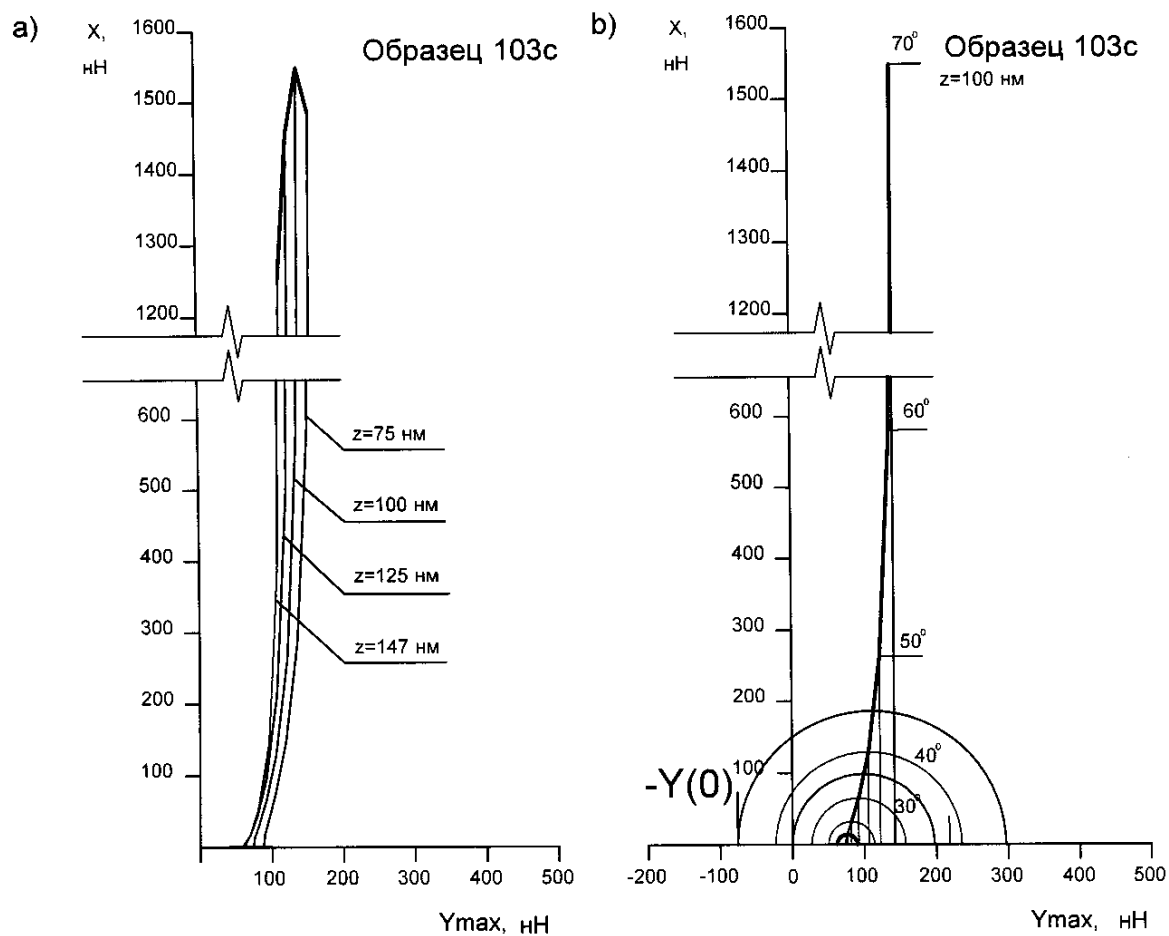


Рисунок 5 – Увеличение тангенциальной реакции с ростом среднего напряжения для разных значений ширины микропоры (а) и выделение упругой части для максимальной реакции при оптимальной ширине микропоры (б) - в твёрдом суглинке (образец № 103с)

3.4 При $b > b_o$ тангенциальное сопротивление больше приложенного извне усилия, и контакт не нарушается. При увеличении угла в интервале $b_o \leq b \leq b_m$ сопротивление контактирующей частицы касательным напряжениям больше, чем нормальным: $X > Y$, и поскольку $s_y = 2Y(b)/h_3^2$, а максимальное касательное напряжение $t_{max} \leq t_{lim}$, то

разрушения контакта не происходит. В диапазоне значений $b_o \leq b \leq b_m$ контактирующая частица упруго сопротивляется повороту, создавая упругую реакцию микропоры на изменение её ширины и на сдвиг смежного микроагрегата относительно базового.

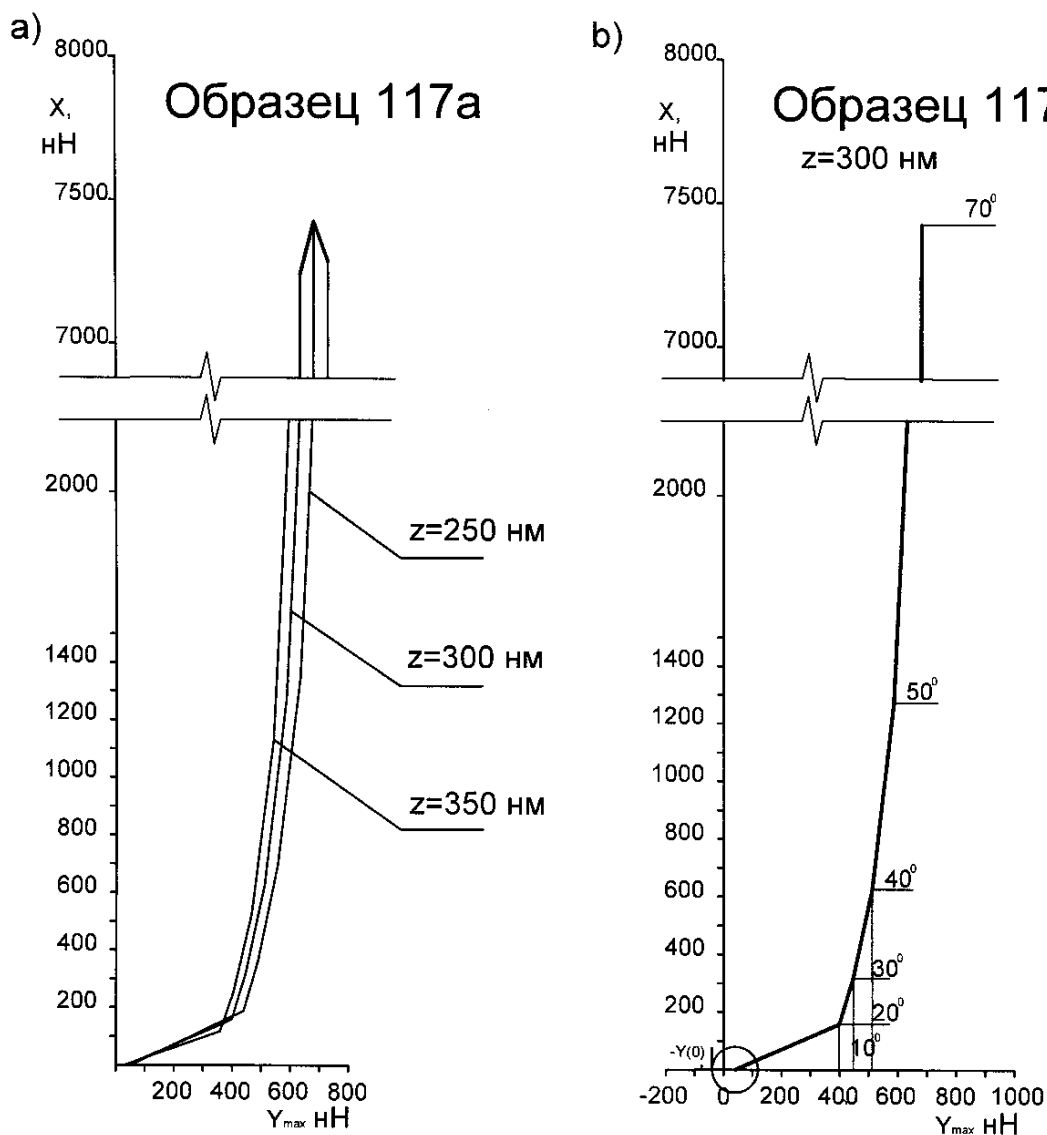


Рисунок 6 – Увеличение тангенциальной реакции с ростом среднего напряжения для разных значений ширины микропоры (а) и выделение упругой части для максимальной реакции при оптимальной ширине микропоры (б) - в твёрдом суглинке (образец № 117а)

Упругое сопротивление быстро возрастает с увеличением угла поворота контактирующей частицы и, соответственно, уменьшением

ширины микропоры. Это соответствует наблюдению, согласно которого более плотный грунт оказывает большее сопротивление деформации. «...сравнительно малое увеличение нагрузки на образец может вызвать существенное возрастание контактных давлений и обусловить резкое повышение сдвиговой прочности» [4].

4 Обсуждение результатов расчёта

Сопротивление сближению микроагрегатов на площадке $w_k \subset \Omega$ при увеличении внешней нагрузки можно описать с помощью трёх моделей деформации:

- а) упруго-вязкой при наклоне контактирующей частицы $b \in \{0; b_o\}$ - в состоянии «а»;
- б) упругой – для контактирующей частицы с углом наклона $b \in \{b_o; b_m\}$ - в состоянии «б»;
- в) пластично-вязкой – для контактирующей частицы, агрегированной базовым микроагрегатом при $b > b_m$ - в состоянии «с».

4.1 В состоянии «а» контактирующие частицы упруго поворачиваются при углах наклона $0 < b \leq b_o$ под действием напряжений от внешней нагрузки, максимальные касательные напряжения могут достигать предельного значения: $t_{\max} = t_{\lim}$, где $t_{\lim} = 2X(b)/h_3^2$ - предельное реактивное касательное напряжение, рассчитанное на площадь контактирующей частицы с размерами $h_3 \times h_3/2$. Упругая деформация микропор по нормали к базовому микроагрегату может быть выражена формулой

$$\Delta u_e = \pm h_3 (\cos b_o - \cos 0) n_c, \quad (8)$$

тангенциальная составляющая – по формуле

$$\Delta v_e = m h_3 (tg b_o - tg 0) n_c, \quad (9)$$

где n_c - число циклов деформации до тотального разрушения образца [8].

Результирующее перемещение вычислено по формуле (Таблица 2):

$$\Delta s_{e.a} = \sqrt{(\Delta u_e)^2 + (\Delta v_e)^2} / \sqrt{2} . (10)$$

Отношение этих двух величин даёт коэффициент упругой поперечной деформации микропоры:

$$n_a = \Delta v_e / \Delta u_e . (11)$$

Таблица 2 – Сравнение деформаций образца грунта при компрессионном сжатии и по модели контактирующей частицы

Данные испытаний грунтов	Деформации образцов грунта						
	измер.	вычисл.	измер.	вычисл.	измер.	вычисл.	вычисл.
	D_{Se1}	$D_{Se.a}$	$D_{Se.m}$	$D_{Se.b}$	$D_{Sr.m}$	$D_{Spl.c}$	D_{Sh}
	мкм	мкм	мкм	мкм	мкм	мкм	мкм
Образец 100	10	9,3	6,3	8,8	10,8	0,3	10,5
Образец 103с	10	10,9	8,4	7,4	8,5	0,1	8,4
Образец 117а	10	6,0	6,3	5,7	8,8	0,2	8,6

Примечания: 1) значения с индексом «1» вычислены для 1-го цикла деформации образцов; 2) с индексом «m» - средние для 2-nc циклов

В предельном состоянии происходит вязкий сдвиг микроагрегатов в микропоре шириной z . Используя данные компрессионных испытаний, можно рассчитать коэффициент динамической вязкости по формуле, выведенной из закона Ньютона для вязкой жидкости:

$$h_a = \frac{s_y(0) z \sqrt{2}}{2v_{cr.1}} , (11)$$

где h_a - коэффициент динамической вязкости воды в микропоре (Таблица 3), вычисленный по упруго-вязкой модели; $t_{max} = s_y(0) / 2$ - максимальное касательное напряжение, вызывающее вязкую деформацию; $v_{cr.1} / \sqrt{2}$ - проекция на ось образца грунта скорости деформации, экспериментально определённая для 1-го цикла деформации при компрессионном сжатии с

постоянно возрастающей нагрузкой. В 1-ом цикле штамп прибора встречает сопротивление микроагрегатов, расположенных на граничных поверхностях образца, где велика доля контактирующих частиц, ориентированных нормально (при $b = 0$) к площадкам $w_k \subset \Omega$. Силы взаимодействия таких частиц со смежным микроагрегатами малы, поэтому возможна вязкая деформация при малых нагрузках.

Развитие вязкой деформации на нескольких последовательных площадках $w_k \subset \Omega (k = 1 \dots k_w)$ может привести к отрыву краёв микропоры при растягивающем напряжении $S_t = S_y(0) = -2Y(0)/h_3^2$ с образованием новой свободной поверхности (трещины).

Таблица 3 – Сравнение коэффициентов вязкости, рассчитанных для непосредственного точечного частиц и для контактирующей частицы

Модели деформации	Модель контакта			
	Точечный	Контактирующая частица		
		h_c МПа·с	h_{cp} МПа·с	t_{lim} МПа
Образец 100 - z=300 нм				
а) Упруго-вязкая	3400	14,2	1,3	0-46
б) Упругая	-	-	-	46-70
с) Пластично-вязкая	-	8,0	19,6	70-85
Образец 103с- z=100 нм				
а) Упруго-вязкая	1488	16,0	2,7	0-45
б) Упругая	-	-	-	45-70
с) Пластично-вязкая	-	16,3	36,3	70-85
Образец 117а z=150 нм				
а) Упруго-вязкая	360	3,3	1,2	0-6
б) Упругая	-	-	-	6-70
с) Пластично-вязкая	-	6,4	18,7	70-85

4.2 В состоянии «b» контактирующие частицы упруго поворачиваются при углах наклона $b_o \leq b \leq b_m$ под действием

напряжений от внешней нагрузки. Но максимальные касательные напряжения не достигают предельного значения: $t_{\max} < t_{\lim}$. Предельные напряжения при $b = b_m$:

$$s_c = s_{\max} = 2Y(b_m) / h_3^2; \quad (12)$$

$$t_{\lim} = t_m = 2X(b_m) / h_3^2. \quad (13)$$

Упругая деформация n_c микропор может быть вычислена по формулам:

- нормальная к базовому микроагрегату

$$\Delta u_e = \pm h_3 (\cos b_m - \cos b_0) n_c; \quad (14)$$

- тангенциальная

$$\Delta v_e = m h_3 (tg b_m - tg b_0) n_c. \quad (15)$$

Отношение этих двух величин даёт коэффициент упругой поперечной деформации микропоры:

$$n_b = \Delta v_e / \Delta u_e. \quad (16)$$

Результирующее перемещение вычислено по формуле (Таблица 2):

$$\Delta s_{e,b} = \sqrt{(\Delta u_e)^2 + (\Delta v_e)^2} / \sqrt{2}.$$

Упругую деформацию микропоры в состояниях «а» и «б» можно оценить с помощью модулей деформации (Таблица 4):

$$E_{CP} = \Delta s_e / \Delta e_e,$$

и $G_{CP} = \Delta t_e / \Delta g_e,$

где $\Delta e_e = \Delta v_e / (z + h_3 \sin b)$; $\Delta g_e = \Delta u_e / (z + h_3 \sin b)$; $b_0 \leq b \leq b_m$.

4.3 При $b > b_m$ контактирующая частица переходит в состояние «с», её сопротивление повороту резко уменьшается: $X \rightarrow 0$, и она необратимо сливается с базовым микроагрегатом, обеспечивая пластическую деформацию микропоры и вязкое скольжение её краёв.

Таблица 4 – Сравнение модулей упругости, рассчитанных для непосредственного контакта частиц и для контактирующей частицы

Модели деформации	Модель контакта				
	Точечный		Контактирующая частица		
	E_c МПа	G_c МПа	E_{cp} МПа	G_{cp} МПа	β град.
Образец 100 - z=300 нм					
а) Упруго-вязкая	317	0	7,1	87	0-46
б) Упругая	-	-	16	534	46-70
с) Пластично-вязкая	-	-	-	-	70-85
Образец 103с- z=100 нм					
а) Упруго-вязкая	345	0	8,1	28	0-45
б) Упругая	-	-	8,9	27	45-70
с) Пластично-вязкая	-	-	-	-	70-85
Образец 117а z=150 нм					
а) Упруго-вязкая	301	0	1,1	16	0-6
б) Упругая	-	-	2,6	87	6-70
с) Пластично-вязкая	-	-	-	-	70-85

Переход от упругой деформации к пластично-вязкой происходит скачком, практически без увеличения нагрузки, на площадке максимальных касательных напряжений. При этом реактивное касательное напряжение падает до значения, определяемого вязким сопротивлением водной плёнки толщиной z , т. е. $t_{lim} = t_{max}$. Нормальное напряжение сохраняет своё значение:

$$s_{max} = 2Y(b_m) / h_3^2; \quad (17)$$

$$t_{max} = s_{max} / 2. \quad (18)$$

Пластическая деформация микропоры по нормали к базовому микроагрегату может быть выражена формулой

$$\Delta u_{pl} = h_3 (\cos b_m - \cos b_{pl}), \quad (19)$$

тангенциальная составляющая – по формуле

$$\Delta v_{pl} = h_3 (tg b_m - tg b_{pl}). \quad (20)$$

Таблица 5 – Сравнение значений прочности, рассчитанных для непосредственного контакта частиц и для контактирующей частицы

Модели деформации	Модель контакта				
	Точечный		Контактирующая частица		
	R _c МПа	R _t МПа	S _c МПа	S _t МПа	b град.
	Образец 100 - z=300 нм				
а) Упруго-вязкая	263	-151	-	-1,0	0-46
б) Упругая	-	-	-	-	46-70
с) Пластично-вязкая	-	-	1,8	-	70-85
	Образец 103с- z=100 нм				
а) Упруго-вязкая	230	-128	-	-1,7	0-45
б) Упругая	-	-	-	-	45-70
с) Пластично-вязкая	-	-	3,3	-	70-85
	Образец 117а z=150 нм				
а) Упруго-вязкая	124	-72	1,2	-0,9	0-6
б) Упругая	-	-	-	-	6-70
с) Пластично-вязкая	-	-	1,7	-	70-85

Равнодействующую пластической деформации в направлении оси образца грунта можно вычислить по формуле:

$$\Delta s_{pl} = \sqrt{(\Delta u_{pl})^2 + (\Delta v_{pl})^2} / \sqrt{2}. \quad (21)$$

Тогда вязкая составляющая неупругой деформации вычисляется по формуле:

$$\Delta s_h = \Delta s_r - \Delta s_{pl}, \quad (22)$$

где Δs_r - деформация на неупругой ветви цикла, средняя для $2 \dots n_c$ -ого циклов деформации образца грунта при компрессионном сжатии с постоянно возрастающей нагрузкой.

Значение коэффициента динамической вязкости воды в микропоре вычисляется по формуле:

$$h_c = \frac{S_{\max} z}{2v_{cr.m}}, \quad (23)$$

где h_c - коэффициент динамической вязкости воды в микропоре на этапе деформации «с»; $S_{\max} / 2$ - касательное напряжение на стенке микропоры, вызывающее вязкое течение водной плёнки; $v_{cr.m}$ - скорость вязкой деформации, средняя для циклов $i = 2 \dots n_c$.

Величина t_m определяет предельное напряжение вязкого сдвига макроскопического грунтового тела, входящее в модель Бингама.

5 Механическое поведение точечных контактов глинистых частиц

5.1 Упругая деформация точечного контакта

При точечном контакте упругая деформация макроскопического грунтового тела вызвана сопротивлением в состоянии дальней агрегации, при расстоянии между внешними поверхностями микроагрегатов порядка h_2 . Это сопротивление обеспечивает обратимую деформацию, т. е. восстановление ширины микропоры при уменьшении внешней нагрузки. Оно меньше значений, приводящих к преодолению энергетического барьера U_{\max} .

Это сопротивление контакта типа «базис-базис». Оно рассчитано нами по результатам испытаний грунтов при компрессионном сжатии с постоянно возрастающей нагрузкой на образец [8]. Определены, модуль упругой деформации и предельное сопротивление при сжатии до потенциального барьера, а также сопротивление отрыву – на основе расчёта сил взаимодействия $F(r)$ и их производных по расстоянию между глинистыми поверхностями $dF(r)/dr$. Модуль сдвига равен нулю (Таблица 4).

Как видно из Таблиц 4 и 5, непосредственный (точечный) контакт обладает весьма жёстким сопротивлением и большой прочностью, близким к внутрикристаллическим характеристикам [7]. По крайней мере, часть контактов дисперсного грунтового тела должна иметь меньшую жёсткость и бóльшую подвижность, которые наблюдаются при деформациях глинистых грунтовых тел.

5.2 Неупругая деформация

Поры разных размеров создают в матрице из глинистых микроагрегатов разную концентрацию напряжений, содержащих касательную компоненту. Модель контактов типа «базис-базис» не предусматривает иного сопротивления тангенциальному перемещению, кроме вязкого. Поэтому сколь угодно малые касательные напряжения вызывают вязкое скольжение частиц по водным плёнкам до релаксации касательных напряжений во всём грунтовом теле. Такое поведение присуще жидкостям и текучим грунтам.

Коэффициент вязкости оценим по формуле (Таблица 3):

$$h_c = \frac{R_c z}{2\nu_{cr.m}}$$

где R_c - максимальное значение среднего напряжения в микропоре при точечном контакте (Таблица 5).

Из Таблицы 3 видно, что в точечном контакте вязкость во много раз больше, чем в микропоре с контактирующей частицей.

6 Механическое поведение контактирующих частиц

6.1 Упругая деформация при повороте контактирующей частицы

Упругая деформация микропоры при повороте контактирующей частицы осуществляется при значительно меньшем сопротивлении, чем

при непосредственном лобовом («базис-базис») контакте (Таблица 4). Поэтому упругая деформация грунтового тела определяется, в первую очередь, сопротивлением при повороте. Сумма деформаций при повороте даёт бóльшее значение деформации грунтового тела, достаточное для регистрации приборами (Таблица 2).

6.2 Неупругая деформация при повороте контактирующей частицы

Модель контакта с контактирующей частицей позволяет понять механику пластической деформации, а именно, природу резкого («скачкообразного») приращения деформаций при практически неизменных внешних силах. Это возможно при резком изменении геометрии контакта, точнее, при слиянии контактирующей частицы с базовым микроагрегатом, к которому она прикреплена силами ближней агрегации, но удерживалась под углом к нему силами дальней агрегации со стороны смежного микроагрегата – до момента сближения с базовым микроагрегатом на критическое расстояние.

Становится объяснимым эффект предельного напряжения вязкого сдвига. Действительно, вязкий сдвиг начинается после преодоления внешними силами упругого сопротивления контактирующей частицы и её исчезновения как таковой в момент пластической деформации микропоры.

7 Выводы

7.1 Сопротивление взаимному смещению смежных микроагрегатов, связанных посредством контактирующей глинистой частицы, значительно меньше сопротивления при их непосредственном (точечном) взаимодействии.

Модель контакта в виде контактирующей глинистой частицы, поворачивающейся в микропоре в поле поверхностных сил, позволяет

описать взаимное смещение смежных микроагрегатов рядом простых механических моделей деформации: упругой, пластической и вязкой.

7.2 Упругая деформация проявляется во всём грунтовом теле в соответствии с уровнем среднего напряжения.

7.3 На поверхности максимальных касательных напряжений сопротивление контактирующей частицы может быть или упруго-вязким (при малых углах наклона к нормали поверхности микроагрегата), или упругим (при бóльших углах $6-70^\circ$), или пластично-вязким (при слиянии контактирующей частицы с микроагрегатом). В первом случае, разрушение грунтового тела может происходить путём вязкого течения по поверхности скольжения или отрывом; в третьем случае, на поверхности скольжения развивается ползучесть.

7.4 Контактующая глинистая частица создаёт изменяющуюся реакцию микропоры при сближении или удалении глинистых поверхностей за счёт поворота; нормальная реакция увеличивается при сближении до максимального значения, а затем резко (скачком) уменьшается при определённом угле поворота. Это приводит к слиянию контактирующей частицы с микроагрегатом, следовательно, к резкому падению тангенциальной реакции до значения вязкого сопротивления.

Литература

1. Зарецкий Ю.К., Ломбардо В.Н. Статика и динамика грунтовых плотин. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 256 с.
2. Осипов В.И., Соколов В.Н., Еремеев В.В. Глинистые покрышки нефтяных и газовых месторождений. – М.: Наука, 2001. – 238 с.
3. Нерпин С.В., Чудновский А.Ф. Физика почвы. – М.: Наука, 1967. – 583 с.
4. Кульчицкий Л.В., Усъяров О.Г. Физико-химические основы формирования свойств глинистых пород. – М.: Недра, 1981. – 178 с.
5. Злочевская Р.И., Королев В.А. Электроповерхностные явления в глинистых породах. – М.: Изд-во МГУ, 1988. – 177 с.

6. Дерягин Б.В., Чураев Н.В., Муллер В.М. Поверхностные силы. – М.: Наука, 1985. – 398 с.

7. Теоретические основы инженерной геологии. Физико-химические основы/Под ред. акад. Сергеева Е.М. – М.: Недр, 1985. – 288 с.

8. Ляшенко П.А., Денисенко В.В. Вычисление характеристик микроструктуры грунта в опыте с компрессионным сжатием образца Научный журнал КубГАУ [Электронный ресурс] № 45(01), 2009.<http://ej.kubagro.ru/2009/01/pdf/03.pdf>