

УДК 624.131

МИКРОСТРУКТУРНАЯ МОДЕЛЬ ФИЛЬТРАЦИИ ВОДЫ В ГЛИНИСТОМ ГРУНТЕ

MICROSTRUCTURAL MODEL OF WATER FILTRATION IN CLAY SOILS

Ляшенко Павел Алексеевич

профессор кафедры Оснований и фундаментов,
Кубанский государственный аграрный университет
Тел.: +7(861) 22-15-945, +7(918) 48-82-840
lyseich1@yandex.ru

Денисенко Виктор Викторович

кандидат технических наук, доцент кафедры
Кадастра и геоинженерии,
Кубанский государственный
технологический университет
Тел.: +7(861) 27-41-935, +7(961) 52-50-278
Devivi@yandex.ru

Аннотация. Рассмотрен механизм фильтрации воды в глинистом грунте на уровне микроструктуры. Трехпорядковая модель микроструктуры, включающая наиболее крупные минеральные зерна, наиболее крупные поры и содержащую их глинистую матрицу позволяет понять природу начального градиента напора и фильтрационной силы. Начальный градиент напора определяется давлением, необходимым для разрыва наиболее крупных пор, образования фильтрационных каналов и движения по ним свободной воды. Значения коэффициента фильтрации зависят от размера наиболее крупных пор и расстояния между ними. Гидродинамические (фильтрационные) напряжения возникают в результате сопротивления элементов микроструктуры сдвигу и повороту.

Ключевые слова: глинистый грунт, поры, микроструктура, фильтрация воды, начальный градиент напора.

Ljashenko Pavel Alekseevich

professor of the Department of
the foundations,
Kuban State Agrarian University
Ph.: +7(861) 22-15-945,
+7(918) 48-82-840
lyseich1@yandex.ru

Denisenko Viktor Viktorovich

the senior lecturer of chair of t
he Cadastre and geoengineering,
Kuban State University of Technology
Ph.: +7(861) 27-41-935,
+7(961) 52-50-278
Devivi@yandex.ru

Annotation. The mechanism of filtration of water in clay soils at the level of the microstructure. Trehporyadkovaya microstructure model, which includes the largest mineral grains, the largest pores and containing clay matrix allows them to understand the nature of the initial pressure gradient force and filtration. Initial pressure gradient is determined by the pressure required to rupture the largest pore formation filtration channels and traffic on them free water. Filter coefficient values depend on the size of the largest pores and the spacing between them. Hydrodynamic (filtration) stresses occur as a result of the resistance elements microstructure translation and rotation.

Keywords: clay soil, pore, microstructure, water filtration, the initial pressure gradient.

Введение

Вода является важнейшим фактором процессов внутри грунтов и почв, от ее содержания и интенсивности перемещения в значительной степени зависят деформации оснований фундаментов и плодородие почвы [1]. Значительные объемы воды перемещаются под действием разности напоров, составляя суть процесса фильтрации. В грунтах с мелкими порами скорость фильтрации свободной воды хорошо описывается линейным уравнением Дарси.

В глинистых грунтах закономерности движения воды сложнее. «Нелинейные зависимости $v_W(\Delta\sigma_W)$ чаще наблюдаются в набухающих системах (где v_W — скорости движения воды; σ_W — давление воды в наиболее крупных порах на фронте фильтрационного поля ω_W , равное среднему напряжению в момент их разрушения), в которых возможна перестройка пористой структуры под действием давления. Зависимости $v_W(\Delta\sigma_W)$ в этом случае формально такие же, что и при течении через недеформируемое пористое тело неньютоновских вязкопластичных жидкостей. Структурная перестройка

ка вызвана обратимым (а иногда и необратимым) изменением взаимного положения и ориентации частиц пористого тела» [2].

При деформациях грунтов и почв происходит перераспределение воды в пространстве и во времени. Вода выходит из сжимаемого объема грунта, что хорошо наблюдается при компрессионном [3, 4] и трехосном сжатии образцов, определяя скорость сжатия и осадку грунтовых оснований фундаментов. При всестороннем сжатии в образце появляются сдвиговые деформации [5]. «В процессе сдвиговых деформаций отдельные элементы и их группы могут совершать как поступательное, так и вращательное движение» [1].

Свободная вода дислоцируется в наиболее крупных порах (диаметром более 100 мкм [6]). Движение воды возможно, только если наиболее крупные поры сообщаются между собой. Тогда разность значений давления в соседних порах вызывает движение воды в сторону поры с меньшим его значением. Следовательно, любая сколь угодно малая разность давлений вызовет движение воды — фильтрацию, что отвечает закону Дарси. На самом деле в глинистых грунтах фильтрация начинается после достижения порогового значения градиента напора. Это вызвано тем, что в микро- и ультрамикрорах глинистых грунтов движение воды ограничено ее молекулярным взаимодействием с глинистыми минералами. В мезопорах находится вода переходного состояния (от связанной к свободной) — капиллярная вода [6].

1. Микроструктурная модель фильтрации воды в грунте

Рассмотрим фильтрацию в глинистых грунтах с позиций микроструктурной модели. В глинистых породах крупные поры образованы крупными частицами: зернами неглинистых минералов и глинистыми микроагрегатами. Крупные поры разделены между собой матрицей из глинистых частиц и их микроагрегатов, свободная вода заземлена в них, и ее передвижение возможно лишь после прорыва глинистой преграды между крупными порами. Прорыв глинистой матрицы водой происходит под действием давления воды на стенки наиболее крупных пор изнутри — с поворотом этих стенок. Поворачиваясь, стенки пор разрывают глинистую матрицу, образуются каналы фильтрации между крупными порами [7].

Рассмотрим модель устойчивой поры, сложенной неглинистыми зернами, условно показанными зачерненными прямоугольниками (рис. 1).



Рисунок 1 — Схема прорыва глинистой матрицы водой из наиболее крупной поры

Поворот стенки поры происходит вместе с деформацией глинистой матрицы за стенкой, отрыв стенок поры друг от друга вызывает разрыв и сдвиг матрицы вблизи нарушенного края поры. Образовавшаяся трещина развивается по направлению на ближайшую наиболее крупную пору, давление воды в которой меньше, чем в предыдущей.

Условие разрыва сплошной матрицы и образования трещины можно записать, используя характеристики микроструктуры грунта: сила, действующая на стенку наиболее крупной поры с характерным размером, вызывает отрыв участка матрицы микроагрегатов с размерами $L_3 \times M_3$:

$$\frac{\alpha_p \sigma_w L_3^2}{\sqrt{3}} = L_3 M_3 \sigma_t, \quad (1)$$

где α_p — коэффициент формы наиболее крупных пор; σ_w — давление воды в наиболее крупных порах на фронте фильтрационного поля ω_w , равное сред-

нему напряжению в момент их разрушения; L_3 — средний размер наиболее крупной поры; M_3 — среднее расстояние между смежными наиболее крупными порами; σ_t — предельное сопротивление отрыву единичного контакта [8].

Из уравнения (1) получаем формулу (2) для давления воды, инициирующего начало фильтрации:

$$\sigma_W = \left(\frac{M_3}{L_3} \right) \frac{\sigma_t \sqrt{3}}{\alpha_p}. \quad (2)$$

Соответствующий начальный градиент напора воды определяется по формуле:

$$I_o = \frac{\sigma_W}{\gamma_W M_3} = \left(\frac{M_3}{L_3} \right) \frac{\sigma_t \sqrt{3}}{\alpha_p \gamma_W M_3},$$

или

$$I_o = \frac{\sigma_t \sqrt{3}}{\alpha_p \gamma_W L_3}, \quad (3)$$

где γ_W — удельный вес воды.

Как видно из (3), начальный градиент напора определяется сопротивлением контактов отрыву и размером наиболее крупных пор. Отрыв наступает в предельном по прочности состоянии контакта, когда $\tau_{lim.o} = \sigma(\beta_o) + \sigma_t$ (где $\sigma(\beta_o)$ — нормальное напряжение в контакте, при котором начинается пластично-вязкая деформация), т.е. когда в нем действуют предельные касательные напряжения, вызванные поворотом стенок пор.

Скорость движения жидкости в капилляре описывается уравнением Шведова-Бингама [1], которое используем для описания движения жидкости в контакте:

$$-\eta_W \frac{\partial v_W}{\partial r_k} = \frac{1}{2} \gamma_W r_k l - \tau_{lim.o}, \quad (4)$$

где v_W — скорость движения жидкости; r_k — радиус капилляра; l — текущее значение градиента напора; η_W — вязкость жидкости; $\tau_{lim.o}$ — предельное сопротивление контакта сдвигу.

Примем, что $\frac{\partial v_W}{\partial r_k} \approx \frac{v_W}{b}$, $r_k = \frac{L_3}{2\sqrt{3}}$ (см. рис. 1). Тогда из (4) получаем формулу для скорости движения воды через микропору:

$$v_W = -\frac{\gamma_W L_3 b}{4\sqrt{3}\eta_W} l + \frac{b\tau_{lim.o}}{\eta_W}. \quad (5)$$

где b — шириной микропоры.

В уравнении (5) правая часть должна быть равна нулю при начальном градиенте напора воды

$$I_o = \frac{4\sqrt{3}\tau_{lim.o}}{\gamma_W L_3}. \quad (6)$$

Формула (6) совпадает по своей структуре с формулой, приведенной авторами [1], выведенной ими для случая фильтрации жидкости в тонких слоях. Принципиальная разница состоит в том, что в их построении фигурирует сдвиговая прочность жидкости, а в формуле (6) — предельное сопротивление сдвигу контакта глинистых поверхностей.

Сравнивая формулы (6) и (3), получаем формулу для коэффициента формы наиболее крупных пор:

$$\alpha_p = \frac{1}{4 \left[1 + \frac{\sigma(\beta_o)}{\sigma_t} \right]} \quad (7)$$

Однако $\sigma(\beta_o)$ и σ_t зависят от размеров контактирующей частицы L_1 и ее ориентации β_o [8].

Формулу для вычисления скорости движения воды (5) можно преобразовать с использованием формулы (6) к виду:

$$v_W = -\frac{\gamma_W L_3 b}{4\sqrt{3}\eta_W} (I + I_o), \quad (8)$$

где $k_f = \frac{\gamma_W L_3 b}{4\sqrt{3}\eta_W}$ — коэффициент фильтрации грунта. (9)

Формула (9) дает выражение через параметры микроструктуры коэффициента фильтрации воды сквозь единичный контакт. Коэффициент фильтрации прямо пропорционален площади поперечного сечения фильтрационного канала и обратно пропорционален вязкости воды. Эта зависимость подобна полученным ранее на основе представления о порах как «извилистых трубках постоянного сечения с некоторым условным радиусом» [1]. В нашем случае, сечение фильтрационного канала определено размерами наиболее крупных пор L_3 и шириной микропоры b . Обе величины определяются по данным эксперимента с исследуемым грунтом.

Как и в работе [1], коэффициент фильтрации в формуле (9) не зависит от формы пор грунта в случае его полного водонасыщения. Однако здесь, в отличие от работы [1], рассмотрена лишь фильтрация воды по межмикроагрегатным наиболее крупным порам, которая, по нашему мнению, доминирует над внутриагрегатной.

Зависимость параметров фильтрации от валовых характеристик физических свойств, таких как влажность, плотность, пористость, число пластичности, показатель текучести, никогда не проявлялась достаточно отчетливо в глинистых грунтах. То же относится к предлагаемым нами параметрам фильтрации, выведенным на основе модели деформации микроструктуры. Они рассчитаны для грунтов, характеристик физических свойств которых приведены в таблице 1.

Таблица 1 — Характеристики физических свойств грунтов

Индекс образца	Глубина отбора, м	Влажность, W, %	Плотность, ρ , г/см ³	Коэффициенты		Число пластичности, I_p	Показатель текучести, I_L
				пористости, e	водонасыщения, S_r		
66	3,0	27	1,94	0,765	0,95	13	-0,1
74	1,5	26	1,82	0,882	0,80	14	-0,1
75	7,0	24	1,94	0,731	0,89	13	0,15
76	8,5	25	1,97	0,715	0,95	16	-0,1
77	3,0	23	1,80	0,843	0,73	10	0
78	5,0	21	2,00	0,636	0,89	11	-0,1
86a	4,0	43	1,91	1,014	1,0	26	0,23
89	8,0	26	2,04	0,679	1,0	17	0,06
97	7,0	25	2,07	0,649	1,0	15	-0,07
100	7,0	21	2,10	0,557	1,0	15	-0,1
101a	8,0	25	2,06	0,642	1,0	16	-0,1
103с	6,0	35	1,93	0,930	1,0	35	0,03
117	8,5	23	2,08	0,585	1,0	7	0,43

Расчеты по формулам (3), (5), (7) и (9) приведены в таблице 2.

В таблице 2 приведены также значения скорости фильтрации, вычисленные для момента нарушения структурной прочности грунта, которая играет важную роль при оценке сжимаемости грунта [8]. При давлении структурной прочности процесс сжатия

грунта резко ускоряется, как показывают эксперименты. Микроструктура грунта пере-страивается во всем объеме образца, что приводит к увеличению скорости фильтрации v_{nc} при соответствующем градиенте напора l_{nc} .

Таблица 2 — Расчетные параметры фильтрации воды в грунте

Индекс образца	Вычисленный Коэффициент фильтрации		Начальный градиент напора, l_0	Коэффициент формы пор, α_p	Коэффициент фильтрации с учетом формы пор	
	$k_{f,u}$, м/с	$k_{f,u}$, м/сут.			k_f , м/с	k_f , м/сут.
66	3,04E-08	2,63E-03	0,61	0,031	9,32E-10	8,05E-05
74	5,33E-08	4,60E-03	2,18	0,138	7,36E-09	6,36E-04
75	5,18E-08	4,48E-03	0,48	0,021	1,11E-09	9,62E-05
76	4,06E-07	3,51E-02	2,78	0,053	2,15E-08	1,86E-03
77	1,69E-08	1,46E-03	1,28	0,022	3,74E-10	3,23E-05
78	4,11E-07	3,55E-02	2,10	0,023	9,46E-09	8,18E-04
86a	2,29E-08	1,98E-03	7,24	0,101	2,32E-09	2,01E-04
89	1,23E-06	1,06E-01	3,59	0,047	5,83E-08	5,03E-03
97	4,64E-08	4,01E-03	1,44	0,028	1,29E-09	1,12E-04
100	4,20E-08	3,63E-03	1,26	0,011	4,77E-10	4,12E-05
101a	6,53E-11	5,64E-06	0,92	0,015	9,60E-13	8,29E-08
103c	1,15E-07	9,97E-03	5,74	0,017	1,92E-09	1,66E-04
117c	1,25E-08	1,08E-03	1,23	0,015	1,84E-10	1,59E-05

Анализ этих значений показывает, что параметры фильтрации имеют устойчивую корреляцию с влажностью грунта (рис. 2) и с числом пластичности (рис. 3, табл. 3).

Начальный градиент напора в общем возрастает с увеличением пористости (рис. 4), хотя эта связь слабее предыдущих (табл. 3).

Таблица 3 — Коэффициенты корреляции параметров фильтрации с характеристиками физических свойств грунтов

Характеристики физических свойств грунтов	Градиент напора		Скорость фильтрации, v_{nc}	Коэффициент формы пор, α_p
	начальный, l_0	при структурной прочности грунта, l_{nc}		
Влажность, W	0,914	0,712	< 0,5	< 0,5
Плотность скелета грунта, ρ_d	-0,691	< 0,5	< 0,5	-0,606
Коэффициент пористости, e	0,735	0,585	< 0,5	0,598
Число пластичности, I_p	0,775	0,908	0,685	< 0,5

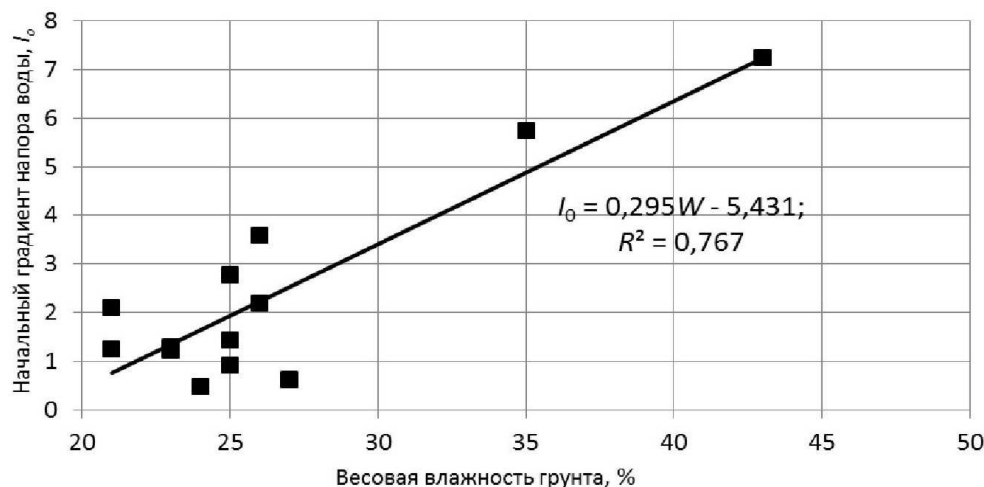


Рисунок 2 — Увеличение начального градиента напора при возрастании влажности грунта

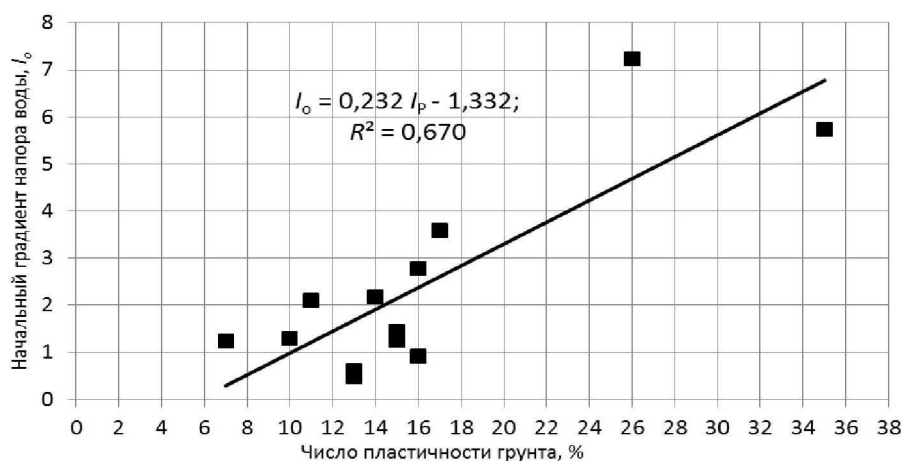


Рисунок 3 — Возрастание начального градиент напора при увеличении числа пластичности грунта

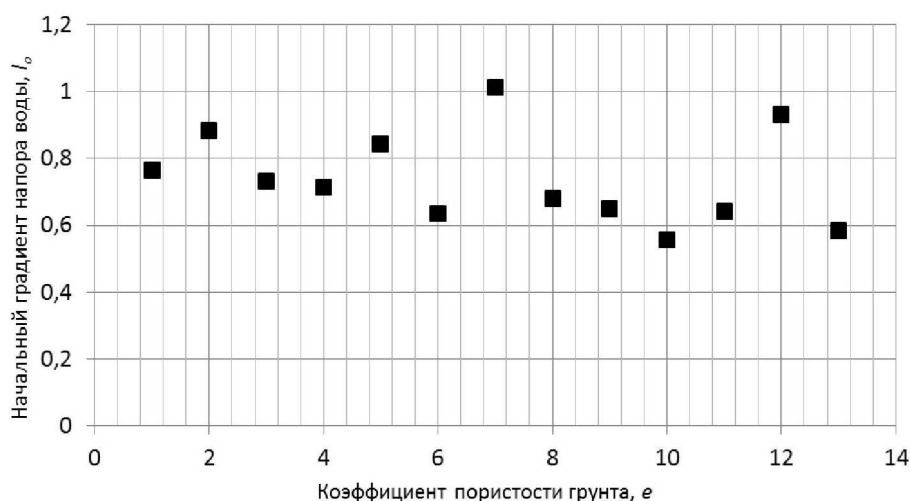


Рисунок 4 — Возрастание начального градиента напора при увеличении пористости грунта

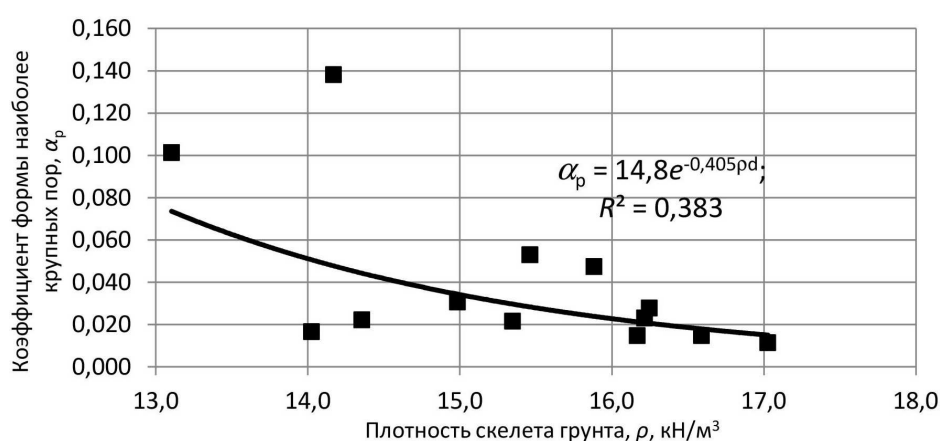


Рисунок 5 — Уменьшение коэффициента формы наиболее крупных пор при увеличении плотности скелета грунта

2. Фильтрация в грунтовом теле

Фильтрация в водонасыщенном грунте идет от границы грунтового тела, на которой создан напор воды, более высокий, чем внутри тела, точнее, при разности напоров в крупных порах на границе тела и внутри него. Процесс образования фильтраци-

онных каналов продолжается внутри грунтового тела при последовательном выполнении этого условия для более удаленных от напорной границы крупных пор. Вблизи напорной границы появляются вторичные каналы. Если напор на границе увеличивается, то образуется разветвленная система каналов.

«В такой сложной системе, как почвы и грунты, невозможно точно учесть форму пространства, занятого водой» [1]. Можно попытаться учесть ее обобщенно. Введем показатель $\xi_{W,\theta}$, обобщенно учитывающий ветвление фильтрационных каналов при увеличении граничного напора на θ -том шаге продвижения фронта фильтрации. Тогда коэффициент фильтрации грунта на θ -том шаге определится по формуле:

$$k_{f,\theta} = \xi_{W,\theta} k_{fu,\theta}. \quad (10)$$

Величину $\xi_{W,\theta}$ можно определить экспериментально, если использовать метод определения зависимости коэффициента фильтрации от градиента напора, описанный в [1]. По данным, приведенным авторами [1], коэффициент фильтрации сначала резко увеличивается, потом скорость увеличения уменьшается, но не обращается в нуль. Возможно, быстрое увеличение вызвано быстрым ростом каналов фильтрации, проходящих через наиболее крупные поры, а уменьшение — образованием вторичных каналов как ответвлений первых, проходящих через менее крупные поры и ветвящихся далее. Чем гуще ветвление, тем короче каналы и меньше их поперечное сечение, следовательно, меньше увеличение коэффициента фильтрации.

3. Расчет фильтрационной силы

Рассмотрим равновесие стационарного потока воды в фильтрационном канале длиной M_4 , имеющем поперечное сечение в виде равностороннего треугольника со стороной L_3 , при этом распространим значение коэффициента формы наиболее крупных пор на канал длиной M_4 . Разность давлений воды на концах фильтрационного канала уравновешивается вязким трением о стенки канала:

$$\frac{\alpha_p \Delta \sigma 2 L_3^2}{\sqrt{3}} = \frac{\tau_W L_3 M_4}{2}, \quad (11)$$

откуда получается выражение для напряжения вязкого трения фильтрующейся воды:

$$\tau_W = \frac{4 \alpha_p \Delta \sigma L_3}{M_4 \sqrt{3}}. \quad (12)$$

Формулу (11) можно переписать, выделив из нее выражение для градиента напора воды на площадке между наиболее крупными минеральными зернами:

$$\tau_W = \frac{4 \alpha_p \gamma_W L_3}{\sqrt{3}} I, \quad (13)$$

где $I = \frac{\Delta \sigma}{\gamma_W M_4}$ — градиент напора воды на участке глинистой матрицы между наиболее крупными зернами.

Фильтрационная сила, действующая на объем грунта, включающий участок фильтрации, может быть вычислена по формуле:

$$F_W = \frac{12 \alpha_p \gamma_W L_3^2}{\sqrt{3}} I. \quad (14)$$

Модель деформации микроструктуры дает представление о фильтрации воды и механическом действии ее на грунт в процессе фильтрации. Изучение фильтрации на уровне микроструктуры позволяет понять природу начального градиента напора и фильтрационной силы:

а) начальный градиент напора определяется давлением, необходимым для разрыва наиболее крупных пор, образования фильтрационных каналов и движения по ним свободной воды;

б) значение коэффициента фильтрации зависит от размера наиболее крупных пор и расстояния между ними;

в) гидродинамические (фильтрационные) напряжения возникают как касательные напряжения на стенках фильтрационных каналов. Их суммарное действие можно рассматривать как объемную силу.

Литература:

1. Нерпин С.В., Чудновский А.Ф. Физика почвы. – М. : Наука, 1967. – 583 с.
2. Денисов Н.Я. Некоторые особенности деформаций глинистых пород // Природа прочности и деформаций грунтов. – М. : Стройиздат, 1972. – С. 85–89.
3. Денисенко В.В., Ляшенко П.А. Исследование природы сжимаемости глинистых грунтов // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). – 2013. – № 3. – С. 65–68.
4. Кравченко Э.В., Будагов И.В. Обоснование лабораторной модели пенетрационных испытаний почв и грунтов // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). – 2013. – № 1–2. – С. 37–39.
5. Тер-Мартirosян З.Г. Механика грунтов. – М. : Изд-во АСВ, 2005. – 488 с.
6. Осипов В.И. Природа прочностных и деформационных свойств глинистых пород. – М. : Изд-во МГУ, 1979. – 235 с.
7. Ляшенко П.А. Фильтрация в глинистых грунтах // Сб. науч. тр. Каф. оснований и фундаментов КубГАУ. – Краснодар : КубГАУ, 2003. – С. 151–158.
8. Ляшенко П.А., Денисенко В.В. Контактное взаимодействие элементов микроструктуры глинистого грунта // Научный журнал КубГАУ [Электронный ресурс]. – Краснодар : КубГАУ, 2012. – № 04(78). – С. 278–305.

References:

1. Nerpin S.V., Chudnovsky A.F. Soil Physics. – M. : Nauka, 1967. – 583 p.
2. Denisov N.Y. Some features of deformation of clay rocks // Nature of strength and deformation of soils. – M. : Stroyizdat, 1972. – P. 85–89.
3. Denisenko V.V., Lyashenko P.A. Study of the nature of the compressibility of clay soils // Science. Engineering. Technology (polytechnical bulletin). – 2013. – № 3. – P. 65–68.
4. Kravchenko E.V., Budagov I.V. Justification of a laboratory model of a penetration testing of soils and soil // Science. Engineering. Technology (polytechnical bulletin). – 2013. – № 1–2. – P. 37–39.
5. Ter-Martirosyan Z.G. Soil mechanics. – M. : Publishing House of the DIA, 2005. – 488 p.
6. Osipov V.I. Nature strength and deformation properties of argillaceous rocks. – M. : MGU, 1979. – 235 p.
7. Ljashenko P.A. Filtering in clay soils // Proc. scientific. tr. Kaf. bases and foundations KubGAU. – Krasnodar : KubGAU, 2003. – P. 151–158.
8. Ljashenko P.A., Denisenko V.V. Contact interaction of the elements of the microstructure of clay soil // Scientific Journal KubGAU [electronic resource]. – Krasnodar : KubGAU, 2012. – № 04 (78). – P. 278–305.