

ОБ ЭФФЕКТЕ ПРЕКРАЩЕНИЯ ФИЛЬТРАЦИИ В МОНТМОРИЛЛОНИТОВОЙ ГЛИНЕ

ON THE TERMINATION EFFECT OF FILTRATION IN MONTMORILLONITE CLAY

ГАБИБОВ Ф.Г.

Заведующий лабораторией механики грунтов, оснований и фундаментов Азербайджанского НИИ строительства и архитектуры, г. Баку, farchad@yandex.ru

КУЛЬЧИЦКИЙ Л.И.

Главный научный сотрудник Всероссийского научно-исследовательского института гидрогеологии и инженерной геологии (ВСЕГИНГЕО), Московская область

ГАБИБОВА Л.Ф.

Инженер Азербайджанского НИИ строительства и архитектуры, г. Баку

GABIBOV F.G.

The head of the Soil Mechanics and Foundation Engineering laboratory of the Azerbaijan Research Institute of Construction and Architecture, Baku, farchad@yandex.ru

KULCHITSKY L.I.

A principal researcher of the All-Russian Research Institute of Hydrogeology and Engineering Geology (VSEGINGEO), the Moscow Region

GABIBOVA L.F.

An engineer of Azerbaijan Research Institute of Construction and Architecture, Baku

Ключевые слова:

монтмориллонитовая глина; фильтрация воды; давление; уплотнение; прекращение процесса фильтрации; модельный анализ; коэффициент поверхностного трения; микрочастицы монтмориллонита; макропоры; контактные поры.

Key words:

montmorillonite clay; water filtration; pressure; compaction; termination of the filtration process; simulation study; surface friction coefficient; montmorillonite microparticles; macropores; contact pores.

Введение

Процесс фильтрации воды и водных растворов электролитов в глинистых грунтах отличается большой сложностью и к настоящему времени недостаточно изучен. Тонкодисперсный глинистый грунт со значительной удельной поверхностью характеризуется наличием межмолекулярных сил и поверхностных процессов. С этим связана чрезвычайно низкая фильтрационная способность глинистых грунтов. В инженерной практике указанное полезное свойство глинистых грунтов используется при сооружении противофильтрационных экранов и ядер гидротехнических сооружений. В последнее время большую актуальность получила проблема создания надежных глинистых экранов для хранилищ токсичных отходов.

Заметный вклад в изучение закономерностей фильтрации, диффузии и осмоса для глинистых грунтов внесли К. Терцаги, С.В. Нерпин, Н.Ф. Бондаренко, И.А. Брилинг, Б.Ф. Рельтов, Г.М. Березкина, В.М. Павилонский, Л.И. Кульчицкий, В.М. Гольдберг и др.

В настоящее время доказано [2, 6], что вода при фильтрации через тонкодисперсные системы ведет себя как ньютоновская жидкость.

Повышение средней вязкости воды в глинистых системах может составлять 50%. Установлено, что толщина слоев воды с измененной структурой вблизи поверхности кварца в капиллярах составляет несколько нанометров [6]. Это свойственно и глинистым грунтам [2, 9]. Здесь граничные слои воды имеют повышенную вязкость, но не обнаруживают (в пределах возможной ошибки измерений) неньютоновского поведения. Исследования скоро-

Аннотация

На основе экспериментальных исследований авторами статьи впервые было обнаружено прекращение процесса фильтрации воды в монтмориллонитовой глине при нагрузке более 1,6 МПа. В глинах другого минерального состава этот эффект обнаружен не был. Модельный анализ показал, что из-за самого низкого коэффициента поверхностного трения микрочастицы монтмориллонита под давлением могут максимально надвигаться друг на друга и размеры их макропор достигают до размеров контактных пор.

Abstract

On the basis of their experimental investigation the authors of the article for the first time detected termination of the filtration process in montmorillonite clay loaded by more than 1,6 MPa. They did not detect such effects in clays of other mineral composition. The simulation study revealed that montmorillonite microparticles under pressure could maximally move onto each other because of the lowest surface friction coefficient and their macropore sizes reached the contact pore sizes.

стей фильтрации воды (V_{ϕ}) в тонких порах стеклянных мембран со средним радиусом пор 105 нм показали [2], что в пределах точности экспериментов скорость фильтрации подчиняется закону Дарси:

$$V_{\phi} = K_{\phi} J, \quad (1)$$

где K_{ϕ} — коэффициент фильтрации; J — градиент напора.

Иногда наблюдаются отклонения от этой закономерности и вводится так называемый начальный градиент J_0 . Тогда

$$V_{\phi} = K_{\phi} (J - J_0) \quad (2)$$

и при градиенте $J \leq J_0$ течения жидкости нет.

Относительно наличия начального градиента фильтрации в глинистых грунтах нет единого мнения, и вопрос о нем в известной мере остается дискуссионным. В одних работах [4] отмечается его существование, а в других [11] утверждается его отсутствие.

Различные авторы дают различные объяснения природы начального градиента фильтрации. А.К. Митчелл и Дж. С. Яангер [13] в своей обзорной работе по исследованиям западных ученых отметили в этом отношении следующее: (1) неньютоновское поведение воды, квазикристаллическое строение; (2) электрокинетику, осмос; (3) миграцию коллоидных частиц в потоке, закупорку пор; (4) рост бактерий; (5) взаимодействие отступающего и нарастающего менисков, загрязнение капилляра.

Е.М. Сергеев и др. [12] объясняют существование начального градиента в глинистых грунтах заполнением узких пор между частицами пленочной связанной водой, защемляющей при этом свободную воду в более крупных порах, и ее последующим сдвигом при увеличении градиента напора.

Одно время природу начального градиента фильтрации в глинистых грунтах связывали с тем, что вода обладает конечной величиной сдвига как собственно в объеме, так и в граничных слоях. Соответственно, $\tau_0 = 10^{-8}$ Н/см² и $\tau_0 = 10^{-7}$ Н/см² [1]. Однако при более строгом рассмотрении задачи эф-

фект начального градиента, наблюдающийся при фильтрации, связывают с влиянием капиллярного осмоса [2, 3, 5]. При его отсутствии фильтрация в пористых телах с радиусом пор до 1 нм подчиняется закону Дарси и экспериментально получаемые зависимости $V_{\phi}J$ являются линейными и проходят через начало координат. Отклонения от линейности могут происходить вследствие набухания глинистых грунтов, что следует учитывать при экспериментальном определении зависимости $V_{\phi}J$.

Известно, что при течении растворов электролитов в тонкопористых телах и глинистых грунтах под воздействием градиента напора фильтрационный и капиллярно-осмотический потоки обычно действуют одновременно. При этом скорость фильтрации может изменяться при возникновении в пористом теле встречного или однонаправленного капиллярно-осмотического потока. В первом случае встречный поток тормозит фильтрацию, что приводит к отклонению от закона Дарси и возникновению эффекта начального градиента. Предполагается, что процесс фильтрации водных растворов в таких глинистых грунтах существенным образом может изменяться вследствие изменения баланса действия поверхностных сил, а также структуры граничных слоев воды и диффузных адсорбционных слоев ионов [6].

Методика исследований

Для учета явлений капиллярно-осмотического переноса воды и водных растворов электролитов через глинистые грунты ранее предлагались различные методы, сводившиеся к разделению суммарной скорости переноса воды через глинистый грунт и осмотического переноса под воздействием заданных градиентов напора, концентрации и температуры с последующим внесением соответствующих поправок [2]. Однако эти методы трудоемки, требуют специального нестандартного оборудования и не позволяют исследовать динамику развития фильтрационно-осмотических процессов в глинистых грунтах.

Авторами настоящей статьи была разработана методика определения скорости фильтрации воды в глинистых грунтах в зависимости от градиента напора с помощью немного усовершенствованного прибора УИПК-1М [7]. При этом моделируется не только геостатическое и пластовое давление, что предусматривается в конструкции этой установки, но и перепад концентрации электролитов по обе стороны испытываемого образца. Для этого металлические плунжеры, передающие на образец торцевое давление масляного пресса и имеющие в центре осевой канал для подачи и отвода жидкости, заменяют на плунжеры-камеры 1 и 9 с перфорированным торцом 7, изготовленные из плексигласа (рис. 1). В эти камеры заливают испытываемые растворы различной концентрации для создания градиента концентрации. Одновременно на входе в образец 6 создают определенный гидростатический напор для проведения фильтрационных испытаний. Таким образом измеряют суммарную скорость про-

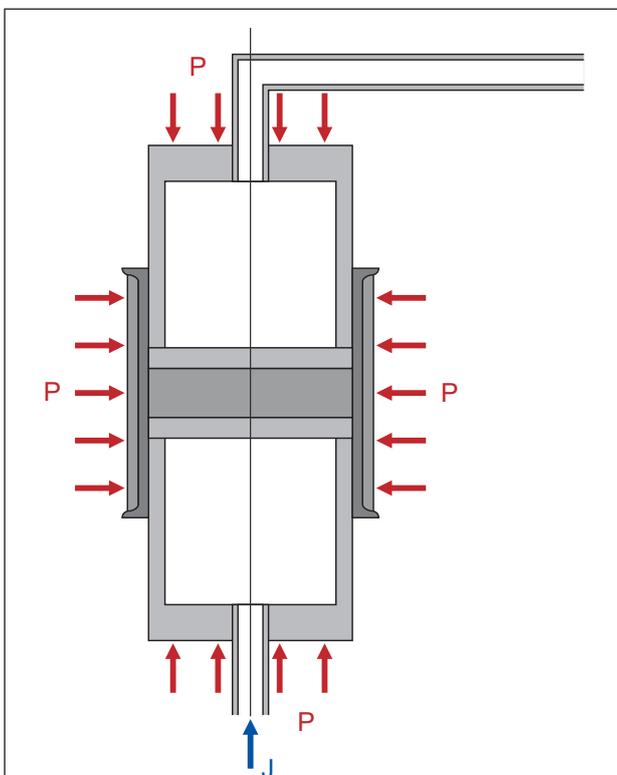


Рис. 1. Схема модернизированного узла с образцом испытываемого грунта в фильтрационном приборе УИПК-1М для одновременного измерения скоростей фильтрационного и капиллярно-осмотического потоков в глинистых грунтах (объяснения в тексте)

текания жидкости через образец грунта за счет градиентов напора и концентрации электролита.

Вся методика определения коэффициента фильтрации глинистых грунтов с учетом осмотических потоков сводится к следующему. Образец грунта в виде цилиндра 6 высотой 1–5 см и диаметром 3 см помещают в резиновую манжету 4, находящуюся в перфорированной гильзе 5. С помощью масляного пресса создают всесторонний обжим образца, величина которого P не превышает давление его предварительного или естественного уплотнения. Торцевой обжим осуществляют с помощью полых плунжеров 1 и 9. В полости 3 и 8 перед испытанием вводят растворы электролита заданных концентраций. При этом на выход из образца (камера 3) подают рабочую жидкость, имеющую повышенную или пониженную концентрацию солей по сравнению с рабочей жидкостью на входе, что вызывает капиллярно-осмотический поток через образец грунта. Одновременно на входе через канал подводящего патрубка 10 создают в полости 8 плунжера 9 определенный гидростатический напор для проведения фильтрационных испытаний. Когда концентрация электролита в полости 3 плунжера 1 превышает концентрацию электролита в полости 8 плунжера 9, то направление осмотического потока через образец совпадает с направлением фильтрационного потока. Когда же концентрация электролита в полости 8 плунжера 9 выше, чем в полости 3 плунжера 1, то направление осмотического потока противоположно фильтрационному.

Скорость течения жидкости через образец грунта $V_{\text{сум}}$ определяют по расходу электролита в градуированном капилляре 2, соединенном с патрубком на выходе плунжера 9, за определенные отрезки времени. Скорость и направление осмотического потока определяют следующим образом. Строят график зависимости $V_{\text{сум}}(J)$, как это показано на рис. 2. Полученную зависимость в виде прямой 1 или 2 экстраполируют до пересечения с осью ординат (скоростей). Затем измеряют отрезок прямой, отсекаемой на оси скоростей графика $V_{\text{сум}}(J)$ при $J = 0$. Полученное значение и будет характеризовать величину скорости осмотического потока $V_{\text{осм}}$.

При встречных направлениях фильтрационного и осмотического потоков (прямая 2 на рис. 2) точка пересечения прямой $V_{\text{сум}}(J)$ с осью скоростей будет находиться на ее отрицательной ветви. Отрезок, отсекаемый прямой $V_{\text{сум}}(J)$ на оси J , как видно из рис. 2, характеризует величину «начального градиента» фильтрации. При данном градиенте напора J_0 имеет место равенство:

$$V_{\phi} = -V_{\text{осм}}. \quad (3)$$

Величина $J_0 l$ (где l — толщина мембраны) при этом равна осмотическому давлению идеальной полупроницаемой мембраны:

$$\Delta P_0 = J_0 l = RT\Delta C, \quad (4)$$

где R — газовая постоянная; T — абсолютная температура; ΔC — перепад концентраций.

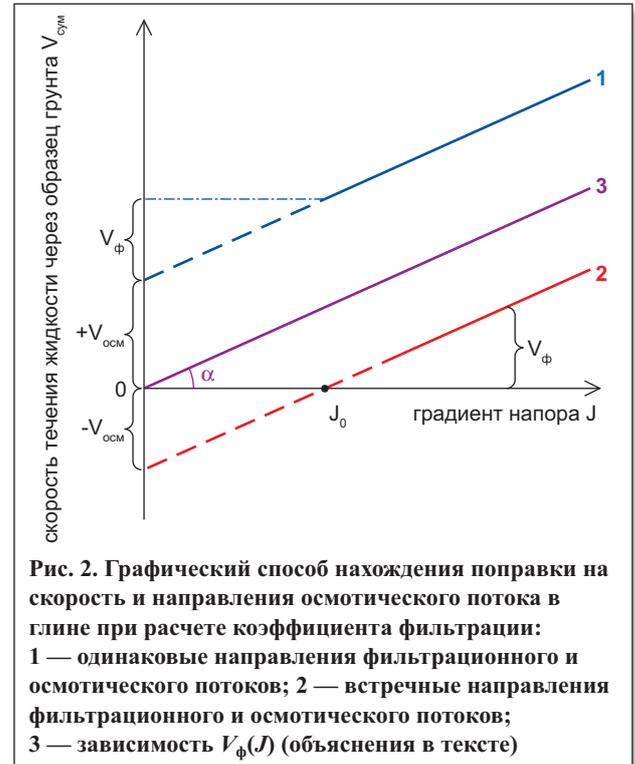


Рис. 2. Графический способ нахождения поправки на скорость и направления осмотического потока в глине при расчете коэффициента фильтрации:
 1 — одинаковые направления фильтрационного и осмотического потоков;
 2 — встречные направления фильтрационного и осмотического потоков;
 3 — зависимость $V_{\phi}(J)$ (объяснения в тексте)

Истинная скорость фильтрации V_{ϕ} характеризуется прямой 3 (см. рис. 2), а коэффициент фильтрации K_{ϕ} равен тангенсу угла α , образованного этой прямой с осью J .

K_{ϕ} рассчитывают с учетом поправки на скорость и направление осмотического потока в глинистом грунте по формуле:

$$K_{\phi} = (V_{\text{сум}} \pm V_{\text{осм}}) J, \quad (5)$$

где знак « \pm » берется в случае, когда направления фильтрационного и осмотического потоков совпадают, а знак « $+$ », соответственно, — когда их направления не совпадают.

Экспериментальные исследования фильтрации глин при их уплотнении

Исследования авторов показывают, что при расчете коэффициента фильтрации без учета скоростей осмотических потоков в засоленных глинистых грунтах происходит примерно двукратное занижение или завышение результатов. Кроме того, было замечено, что с увеличением плотности глинистого грунта (с уменьшением пор) интенсивность осмотических процессов возрастает [8].

При изучении проницаемости Са-монтмориллоновых глинистых грунтов (рис. 3) с учетом капиллярно-осмотического перетекания (при строгом термостатировании комнаты, в которой проводились эксперименты) было обнаружено, что после уплотнения грунта нагрузками более 1,6 МПа указанная глина приобретает свойство идеальной полупроницаемой мембраны и фильтрация под воздействием градиента напора прекращается. Авторы довели величину напора J до 22 000.

Анализ многочисленных исследований, проведенный В.М. Гольдбергом и Н.П. Скворцовым [4],

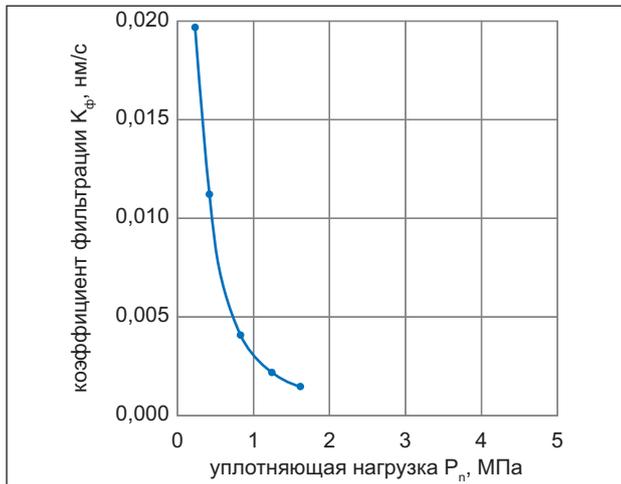


Рис. 3. Зависимость коэффициента фильтрации Са-монтмориллонита K_f от давления предварительного уплотнения P_n

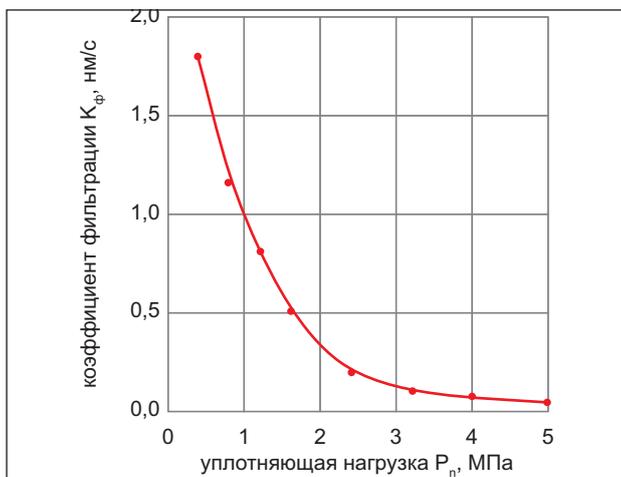


Рис. 4. Зависимость коэффициента фильтрации На-каолинита K_f от давления предварительного уплотнения P_n

показал, что пористость различных глинистых грунтов характеризуется весьма высокими величинами, соизмеримыми с ее значениями для водовмещающих песчаных пород (и даже существенно превышающими их).

При проведении авторами настоящей статьи повторных экспериментов, несмотря на достаточно высокое значение пористости Са-монтморилло-

нита после его уплотнения нагрузками 1,6 МПа, было впервые обнаружено не известное ранее явление прекращения фильтрации в монтмориллоновой глине. При этом эксперименты показали, что в каолиновых (рис. 4) и гидрослюдистых (рис. 5) глинах вышеупомянутое anomальное явление не наблюдается.

Если исходить из ранее разработанной авторами физико-химической модели глинистого грунта (рис. 6, [10]), в которой микропорами являются поры в контактах между элементарными частицами, а плоские сквозные макропоры пронизывают систему, то именно в макропорах происходит фильтрация. Микропоры в фильтрации не участвуют, т.к. жидкость, находящаяся в них, связана активной поверхностью глинистых частиц и участвует только в диффузных и осмотических процессах.

Анализ полученного эффекта на основе физико-химической модели глины

Абсолютная микропористость Са-монтмориллонита значительно выше, чем Са-гидрослюды и каолинита, в основном за счет внутриагрегатной (межслоевой) микропористости. Для всех агрегированных глин характерно увеличение микропористости при их уплотнении за счет перекрытия наружных базисов микроагрегатов. Расчеты по модели показывают, что завершение интенсивного снижения макропористости Са-монтмориллонита соответствует достижению практически максимума микропористости при уплотнении глины нагрузками $P_n \approx 1,6$ МПа.

На рисунке 7 показана зависимость размера макропор различных глин от уплотняющей нагрузки. Видно, что при нагрузке $P_n \approx 1,6$ МПа размер макропор в Са-монтмориллоните достигает 100 Å, а в Са-гидрослюде и На-каолините значения этого параметра даже при $P_n \approx 4,0$ МПа в 2,5–3,0 раза выше.

Микрореологический анализ с использованием вышеуказанной модели глинистого грунта показал, что действительно после уплотнения нагрузками $P_n \approx 1,6–2,0$ МПа размер макропор Са-монтмориллиновых глин становится соизмеримым с размерами микропор. В связи с этим в таком грун-

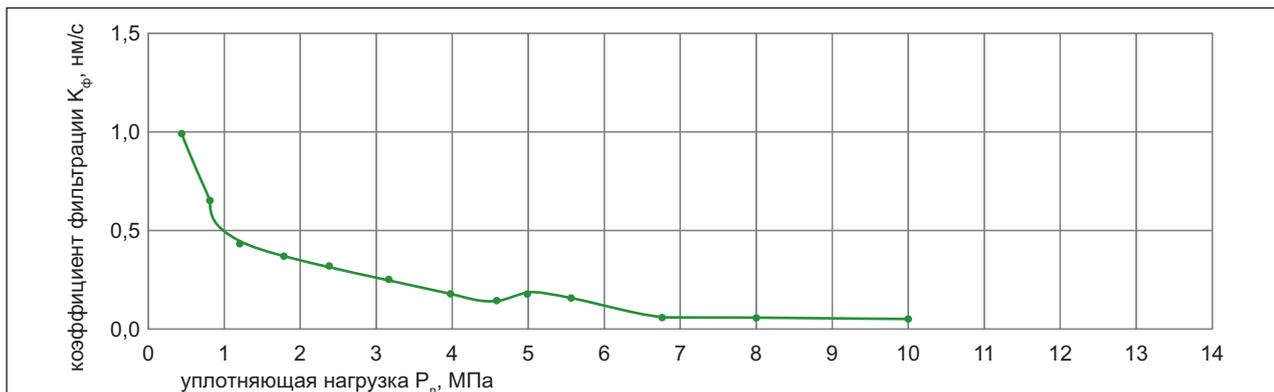


Рис. 5. Зависимость коэффициента фильтрации Са-гидрослюды K_f от давления предварительного уплотнения P_n

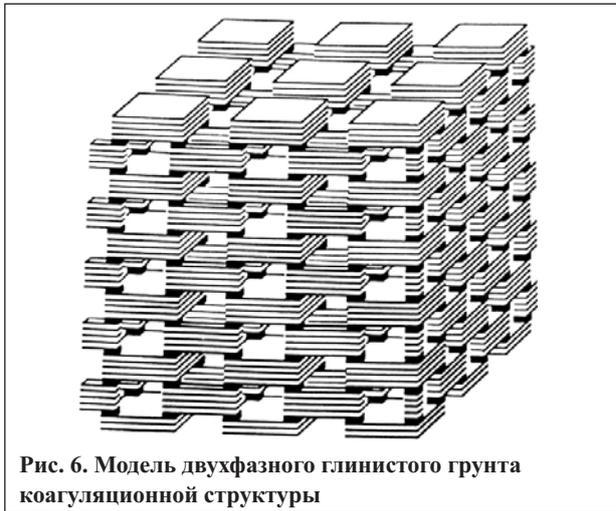


Рис. 6. Модель двухфазного глинистого грунта коагуляционной структуры

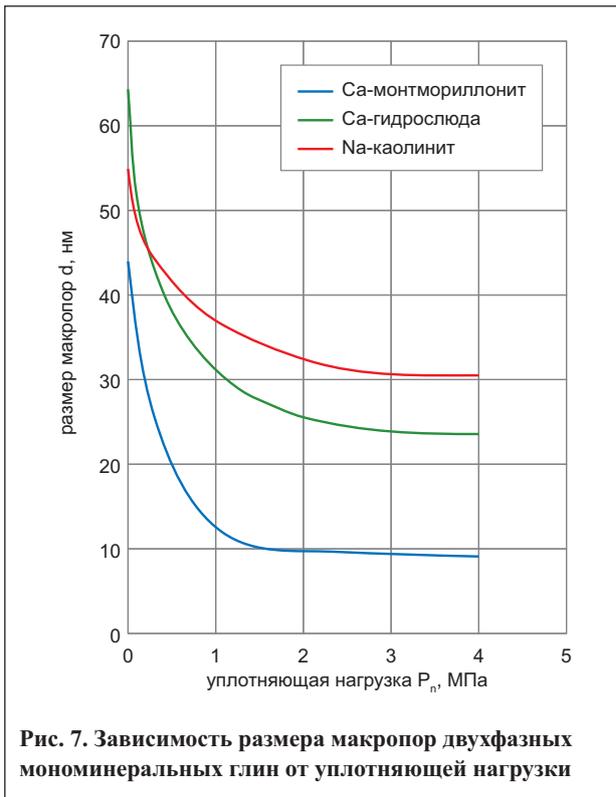


Рис. 7. Зависимость размера макропор двухфазных мономинеральных глин от уплотняющей нагрузки

те прекращаются фильтрационные процессы и он приобретает свойства полупроницаемой среды.

На рисунке 8 показана схема перемещения микрочастиц (или микроагрегатов) друг относительно друга при их уплотнении в горизонтальной плоскости. На этом рисунке наглядно видно, как при наезде частиц друг на друга увеличивается контактная поверхность и уменьшаются сквозные макропоры. Коэффициент поверхностного трения для монтмориллонитовых частиц наиболее низок, что позволяет им при уплотнении максимально сближаться с соседними частицами в тангенциальном (горизонтальном) направлении и доводить размер макропор до размера микропор, связывая находящуюся там воду поверхностными силами. Таким образом, вода, находящаяся в макропорах, уменьшенных до размеров микропор, не может участвовать в фильтрационном процессе.

В гидрослюдистых и каолинитовых глинах вышеуказанный эффект не наблюдается и не являет-

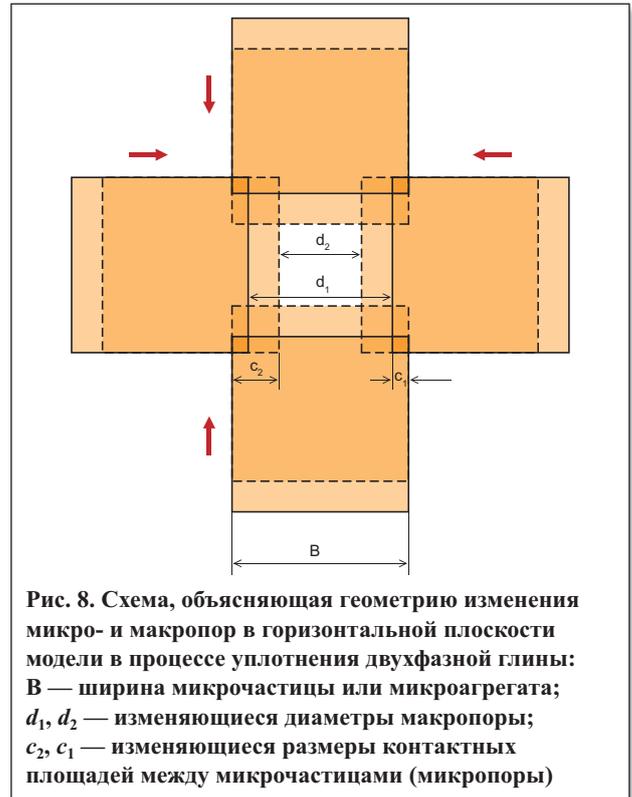


Рис. 8. Схема, объясняющая геометрию изменения микро- и макропор в горизонтальной плоскости модели в процессе уплотнения двухфазной глины: B — ширина микрочастицы или микроагрегата; d_1, d_2 — изменяющиеся диаметры макропоры; c_2, c_1 — изменяющиеся размеры контактных площадей между микрочастицами (микропоры)

ся достижимым из-за относительно высокого коэффициента поверхностного трения между микрочастицами указанных глинистых минералов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бондаренко Н.Ф. Физика движения подземных вод. Л.: Гидрометеиздат, 1973. 215 с.
2. Брилинг И.А. Фильтрация в глинистых породах / Обзорная информация. Серия «Гидрогеология и инженерная геология». М.: ВИЭМС, 1984. 60 с.
3. Габибов Ф.Г., Кульчицкий Л.И. Исследование природы начального градиента фильтрации в глинистых грунтах // Труды 1-го Центрально-Азиатского геотехнического симпозиума. Астана, 2000. Т. 1. С. 367–368.
4. Гольдберг В.М., Скворцов Н.П. Проницаемость и фильтрация в глинах. М.: Недра, 1986. 160 с.
5. Дерягин Б.В., Зорин З.М., Соболев В.Д., Чураев Н.В. Свойства тонких слоев воды вблизи твердых поверхностей // Связанная вода в дисперсных системах. Иркутск: Изд-во ИГУ, 1980. С. 4–13.
6. Дерягин Б.В., Чураев Н.В., Муллер В.М. Поверхностные силы. М.: Наука, 1987. 398 с.
7. Калинин М.К. Методика исследования коллекторных свойств кернов. М.: Гостоптехиздат, 1973. 224 с.
8. Кульчицкий Л.И., Габибов Ф.Г., Ткаченко Ю.Г. Определение проницаемости глин // Разведка и охрана недр. 1986. № 10. С. 54–58.
9. Кульчицкий Л.И., Усъяров О.Г. Физико-химические основы формирования свойств глинистых пород. М.: Недра, 1981. 180 с.
10. Кульчицкий Л.И., Усъяров О.Г., Габибов Ф.Г. Физико-химическая модель водонасыщенной глины и ее применение при изучении объемных деформаций глинистых грунтов. Баку: Изд-во АЗНИИСА, 2000. 41 с.
11. Павиловский В.М. К вопросу о начальном градиенте в глинистых грунтах // Труды ВОДГЕО. М.: 1986. Вып. 19. С. 26–31.
12. Сергеев Е.М., Голодковская Г.А., Зиангиров Р.С. и др. Грунтоведение. М.: Изд-во Московского университета, 1971. 596 с.
13. Mitchell A.K., Younger J.S. Permeability and capillarity of soils / ASTM STP 417. Philadelphia: American Society for Testing and Materials, 1967. P. 106–139.

Инженерно-геологические, инженерно-геодезические и инженерно-экологические изыскания для строительства объектов I и II уровня ответственности.

Исследования по оценке фоновому состоянию природной среды и разработка программ экологического мониторинга объектов добывающей и перерабатывающей промышленности.

Оценка гидрогеологических, инженерно-геологических и геоэкологических условий разработки и эксплуатации месторождений полезных ископаемых.

Оценка геологических, социальных и экономических рисков.

Комплексные гидрогеологические, инженерно-геологические, инженерно-экологические исследования и съемки в масштабах 1:200000-1:2000.

Разработка инженерно-геологических, гидрогеологических, геомеханических и геоэкологических баз данных в геоинформационных форматах для городских агломераций, производственных объектов всех уровней ответственности, горнотехнических сооружений открытого и подземного типов, транспортных тоннелей и др.

Геофизические исследования на дневной поверхности, в скважинах и в подземных выработках с целью оценки и контроля изменения структуры, свойств, геодинамического и физико-механического состояний горного массива на стадиях проектирования, строительства и эксплуатации сооружений различных типов.

Определение физико-механических свойств горных пород.



Лаборатория скальных грунтов ООО «ГИНГЕО» выполняет определение полного комплекса лабораторных исследований физико-механических свойств скальных и полускальных пород, в том числе:

- естественной влажности;
- водонасыщения;
- водопоглощения;
- плотности, плотности сухого грунта, плотности минеральной части;
- прочности на одноосное сжатие;
- прочности на одноосное растяжение;
- угла внутреннего трения;
- удельного сцепления;
- скоростей распространения упругих продольных и поперечных волн;
- статического и динамического коэффициента Пуассона;
- статического и динамического модуля деформации.

Исследования проводятся на оборудовании: испытательный пресс ПГМ-500МГ4, приборы неразрушающего контроля (импульсный ультразвуковой низкочастотный дефектоскоп А1220 «Монолит», скелерометр ИСП-МГ4.01). Все приборы для определения свойств и исследований скальных и полускальных грунтов имеют сертификаты соответствия и действующие поверки, выданные компетентными органами.

