

УДК 532.546:550.820.7

ПРОНИКНОВЕНИЕ ПРЕСНОЙ ВОДЫ В НАСЫЩЕННУЮ ЭЛЕКТРОЛИТОМ ГЛИНУ (ЭКСПЕРИМЕНТ)

В. И. Пеньковский, Н. К. Корсакова

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск

E-mails: penkov@hydro.nsc.ru, kors@hydro.nsc.ru

Проведено экспериментальное исследование проникновения дистиллированной воды в насыщенный раствором поваренной соли образец глинистого грунта. Получена количественная оценка изменения фильтрационных характеристик грунта в результате проникновения пресной воды и набухания частиц глины, а также воздействия электрического поля на процесс вытеснения. Показано, что на конечном этапе замещения раствора пресной водой электрокинетические процессы играют определяющую роль. Исследованы причины возникновения потенциалов самополяризации глин в результате нарушения условий электрического равновесия.

Ключевые слова: электролит, частицы глины, гидратация, потенциал самополяризации, эксперимент.

Введение. Результаты математического моделирования и расчеты процессов, происходящих при бурении скважин на основе водных глинистых растворов, показывают, что радиус зоны объемного проникновения фильтрата и толщина осаждающейся на стенке скважины глинистой корки находятся в прямой зависимости от проницаемости пробуриваемого пласта [1, 2]. Корка малой толщины образуется на уровне залегания глинистых пластов, характеризующихся слабой проводимостью. В процессе проходки пластов с относительно высокой проницаемостью толщина глинистой корки быстро увеличивается, в результате чего объемное проникновение фильтрата бурового раствора в эти пласты столь же быстро уменьшается.

Малоизученным, особенно экспериментально, остается характер проникновения относительно пресного фильтрата в пласты, содержащие природную соленую воду и частицы глины. Некоторые модели взаимодействия растворов с поглощающим комплексом почв рассматривались в работах [3–9].

Каркас глинистых минералов образуют тонкие (толщиной порядка нескольких десятков ангстрем) пластинки. Обладая достаточно высокой пористостью, глины слабопроницаемы для природных флюидов. Присутствие в молекулах глин большого количества атомов кислорода обуславливает наличие стационарного, связанного с кристаллической решеткой отрицательного заряда. В присутствии пресной воды пластинки подвергаются гидратации подобно ионам солей в электролитах, что приводит к увеличению объема (набуханию) глины. Степень набухания зависит от радиуса зоны гидратации, участвующего в обмене ионами, и обменной емкости поглощающего комплекса породы.

Согласно теории двойного электрического слоя [5] концентрация C_i (измеряемая в молях на литр) i -го иона в растворе, примыкающего к отрицательно заряженной поверхности

частицы глины, определяется по формуле

$$C_i = C_i^0 \exp [-z_i e (\zeta - \zeta_0) / (kT)],$$

где z_i — валентность иона; e — заряд электрона; $\zeta = \zeta(y)$ — электрический потенциал (дзета-потенциал) на расстоянии y от стенки; k — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура; C_i^0 , ζ_0 — равновесные значения концентрации и дзета-потенциала соответственно, измеряемые на некотором расстоянии от поверхности. Эта формула, а также полученная в работе [7] формула для действующего вблизи поверхности частицы глины избыточного давления (давления набухания)

$$\Delta p = p - p_0 \frac{RT}{1000} \sum_i (C_i - C_i^0)$$

устанавливают связь величины Δp с величиной дзета-потенциала. Здесь $R = kN_A$ — газовая постоянная; N_A — число Авогадро; p , p_0 — давление вблизи стенки и на некотором расстоянии от нее; суммирование проводится по общему числу ионов.

В работах [10, 11] отмечено, что процесс набухания сопровождается коагуляцией коллоидных частиц, в результате чего увеличивается количество относительно неподвижной воды и существенно уменьшается водопроницаемость породы. Обратное явление — пептизация (диспергирование частиц), приводящая к уменьшению количества связанной воды и улучшению проводимости, наблюдается при фильтрации электролита через насыщенную пресной водой породу. Пусть поровое пространство насыщенного водой глинистого минерала заполняется некоторым раствором солей. При этом часть молекул воды, адсорбированных на поверхности пластинок, переходит в раствор, разбавляя его, а к освобождающимся при этом активным центрам (свободным местам) примыкают катионы из порового раствора. В самом растворе появляется избыточное количество отрицательных зарядов (анионов). Это явление получило название анионного выталкивания, или отрицательной адсорбции [6].

Таким образом, вытеснение из глинистого пласта пресной воды соленым раствором приводит к появлению в области проникновения отрицательной разности потенциалов. С течением времени избыточный отрицательный заряд “стекает” в окружающие породы под действием возбужденного электрического поля и процесса диффузии, до тех пор пока не будет достигнуто общее равновесие, т. е. пока электрические потенциалы пластов не станут одинаковыми.

Очевидно, что равновесие будет нарушено, если в глинистый пласт, насыщенный раствором электролита, закачать пресную воду. В результате первоначально нейтральный инфильтрат насыщается десорбированными с поверхности частиц глины катионами, а на освобождаемые ими места будут прикрепляться дипольные молекулы воды. В области проникновения появляется потенциал с положительным знаком. Эффективная, проводящая флюиды пористость уменьшается, что приводит к резкому уменьшению проницаемости глинистой породы и уменьшению объемного проникновения пресного фильтрата. Условия равновесия и возникновения самополяризации в содержащих глину породах рассмотрены в работе [12]. Экспериментальные и теоретические исследования причин возникновения электрокинетических потенциалов в насыщенных электролитом породах и численное решение задач о взаимосвязи фильтрационных и электрических потоков выполнены в работах [13, 14]. Установлено, что для большинства геологических формаций возникающие электрические поля практически не влияют на процесс фильтрации. Расчет этих полей может быть выполнен после того, как будет определено поле скоростей фильтрации.

В породах, объем которых содержит значительную долю частиц глины, взаимосвязь электрического и фильтрационного полей более сильная. Ниже приводятся результаты

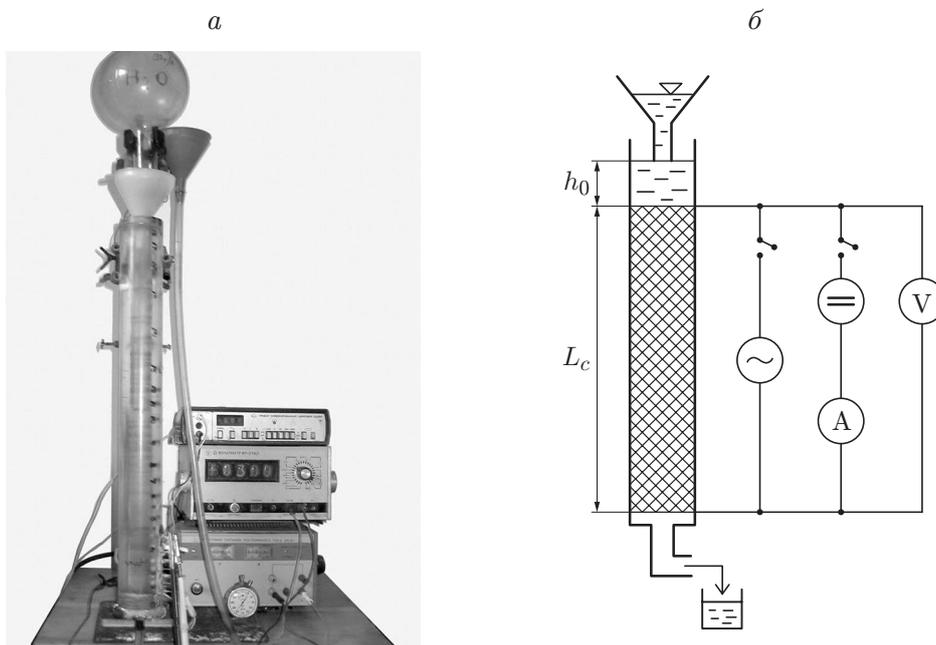


Рис. 1. Общий вид (а) и схема (б) экспериментальной установки (L_c — длина заполненной глиной нижней части трубки; h_0 — высота столба воды в трубке)

лабораторных экспериментов с образцами, содержащими частицы глины. Эксперименты позволяют получить оценку степени изменения фильтрационных свойств образцов при вытеснении электролитов пресной водой и определить величину возникающих при этом потенциалов самополяризации. Кроме того, обнаружено влияние на скорость фильтрации задаваемых на торцах образца внешних электрических потенциалов. Учет взаимосвязи гидродинамических и электрических полей важен при разработке методов интерпретации результатов скважинной электроразведки пластов.

1. Экспериментальная установка и материалы. Общий вид и схема установки представлены на рис. 1. Образец глинистого грунта помещался в трубку с внутренним диаметром, равным $2 \cdot 10^{-2}$ м, и внешним диаметром, равным $6 \cdot 10^{-2}$ м. Поровое пространство рабочего материала насыщалось раствором поваренной соли с концентрацией 10 или 30 г/л. Возникающие потенциалы самополяризации измерялись цифровым потенциометром. Внешние электрические поля создавались генераторами за счет разности соответствующих потенциалов на сетках, перекрывающих входное и выходное сечения образца. Расход жидкостей измерялся с помощью подводящей силиконовой трубки. Отрезок трубки длиной $1,9 \cdot 10^{-2}$ м вмещал объем жидкости, равный 10^{-6} м³. Эксперименты проводились при горизонтальном и вертикальном положениях рабочего образца.

2. Формулы для обработки экспериментальных данных. Рассмотрим случай вертикально расположенной трубки, нижняя часть которой длиной L_c заполнена глиной, а верхняя — раствором или пресной водой. Входное $x = 0$ и выходное $x = L_c$ сечения ограничены металлическими сетками. Напор вытесняющего флюида во входном сечении равен высоте h_0 столба воды. Часть поступающей в образец пресной воды расходуется на гидратацию частиц глины, в результате чего проточная пористость глины уменьшается вследствие набухания ее частиц. Полная математическая формулировка задачи инфильтрации воды в насыщенную электролитом глинистую породу рассмотрена в работе [10], в которой приведено численное решение этой задачи. Для того чтобы провести предварительную обработку результатов измерений, используем упрощенную модель процесса,

в которой внешняя диффузия растворенного вещества не учитывается, а процесс внутри-порового обмена считается бесконечно быстрым.

Выражение для полной пористости m глины, насыщенной относительно пресным раствором, представим в виде $m = m_e + m_i$, где m_i — уменьшение пористости глины за счет ее гидратации; m_e — эффективная, проточная пористость глины.

Система уравнений переноса и взаимодействия солей, растворенных в проточной и связанной с частицами глины воде, имеет вид

$$\frac{\partial}{\partial x} (vC) + \frac{\partial}{\partial t} (m_e C) + \frac{\partial}{\partial t} (m_i N) = 0, \quad \alpha_c \frac{\partial (m_i N)}{\partial t} = C - N. \quad (1)$$

Здесь C , N — концентрация солей в проточной и связанной воде соответственно; t , x , α_c — время, координата, отсчитываемая от входного сечения образца, и параметр кинетики обмена солями соответственно. Систему (1) необходимо дополнить законом сохранения массы растворителя (воды). Так как источники или стоки в образце отсутствуют, а частицы воды не исчезают и не возникают при переходе из свободного состояния в связанное и наоборот, то указанный закон записывается в виде

$$\frac{\partial}{\partial x} (\rho v) + \frac{\partial}{\partial t} (m\rho) = 0. \quad (2)$$

Плотность ρ может зависеть только от концентрации. В рассматриваемых опытах эта зависимость несущественна, а величина m постоянная. Поэтому, если полагать $\rho \approx \rho_0 = \text{const}$, то из уравнения (2) следует, что скорость v есть функция времени, не зависящая от координаты x .

Система уравнений (1) имеет семейство характеристик $x = \text{const}$ и $x - \int \frac{v(t)}{m_e} dt = \text{const}$. В случае бесконечно быстрой кинетики обмена ($\alpha_c = 0$) эта система вырождается в уравнение переноса

$$v \frac{\partial C}{\partial x} + m \frac{\partial C}{\partial t} = 0$$

с характеристиками $x - \tau/m = \text{const}$, где $\tau = \int v(t) dt$ — объемная скорость проникновения пресной воды в образец. В работе [15] показано, что выражение для концентрации солей в растворе, вытесняемом пресной водой в среде с двойной пористостью и с быстрой кинетикой обмена солями, в первом приближении может быть представлено в виде

$$C = \begin{cases} 0, & 0 \leq x \leq \tau/m, \\ C_0, & \tau/m < x \leq \tau/m_e^0, \\ C_0, & \tau/m_e^0 \leq x \leq L_c. \end{cases}$$

Зона с границами $x = 0$ и $x = x_f(\tau) = \tau/m$ соответствует промытой от растворенных солей части образца, в которой эффективная пористость m_e^1 меньше исходной транзитной пористости m_e^0 , поскольку в пресной воде степень гидратации частиц глины возрастает. В части образца $\tau/m_e^0 \leq x \leq L_c$, в которую не проникали частицы растворителя (воды), сохраняется начальное равновесное состояние растворов. В зоне активного перемешивания ($\tau/m < x \leq \tau/m_e^0$) фронт проникновения пресной воды $x = x_f^0(\tau) = \tau/m_e^0$ насыщается до состояния равновесия с раствором, связанным со скелетом пористой среды. Используя известную формулу Сликтера — Козени, отношение коэффициента фильтрации промытой зоны k_e к коэффициенту фильтрации k_c насыщенной электролитом зоны можно приближенно выразить формулой

$$\alpha_k = k_e/k_c = (m_e^1/m_e^0)^{3,5}.$$

Потеря напора в вертикально расположенном образце определяется законом Дарси

$$v(t) = -k(x) \left(\frac{\partial h}{\partial x} - 1 \right).$$

Для зон с постоянными коэффициентами фильтрации должны выполняться условия сопряжения потоков и кинематическое условие

$$k_c \left(\frac{h_f}{L_c - x_f} + \frac{\rho_s}{\rho_0} \right) = k_e \left(\frac{h_0 - h_f}{x_f} + 1 \right) = m \frac{dx_f}{dt} = v(t) \quad (3)$$

(h_f — напор на подвижной границе $x = x_f$). К этим соотношениям следует добавить начальное условие $x_f(0) = 0$. В случае горизонтально расположенного образца первое слагаемое в законе Дарси отсутствует.

При обработке экспериментальных данных можно пренебречь различием плотностей соленой и пресной воды, положив $\rho_s/\rho_0 \approx 1$. Из условий сопряжения потоков (3) после ряда преобразований получаем уравнение для определения отношения коэффициентов фильтрации $\alpha_k = k_e/k_c$:

$$(\bar{v}x_f + h_0 - L(\bar{v} - 1))\alpha_k = \bar{v}x_f.$$

Здесь

$$\bar{v} = \frac{v}{k_c} = \frac{m}{k_c} \frac{dx_f}{dt}.$$

Интегрируя это уравнение по переменной t с учетом начального условия для функции $x_f(t)$, для искомого параметра α_k получаем формулу

$$\alpha_k = x_f^2 / [x_f^2 - 2L_c x_f + (2k_c/m)(h_0 + L_c)t], \quad (4)$$

из которой, в частности, следует, что при малых значениях времени t безразмерная функция

$$\bar{x} = \frac{x_f}{L_c} = \frac{1}{A} \left(\sqrt{1 + 2k_c A \left(1 + \frac{h_0}{L_c}\right) \frac{t}{mL_c}} - 1 \right), \quad A = \frac{1}{\alpha_k} - 1$$

не зависит от параметра α_k , т. е.

$$\bar{x} \approx \frac{k_c}{mL_c} \left(\frac{h_0}{L_c} + 1 \right) t = \frac{v(0)t}{mL_c}.$$

Поэтому при определении параметра α_k по формуле (4) следует использовать данные, соответствующие конечной стадии вытеснения.

На предварительном этапе проведения экспериментов измеряются расход и скорость раствора при заданной постоянной разности напоров во входном и выходном сечениях образца. По данным измерений определяется величина k_c — коэффициент фильтрации глины, насыщенной электролитом. В зависимости от способа загрузки образца и концентрации соли в электролите этот коэффициент принимает значение в интервале $0,13 \div 0,33$ см/ч.

На рис. 2, а представлена зависимость расхода q от общего профильтрованного объема V_t при вытеснении раствора NaCl дистиллированной водой в эксперименте 1 (длина горизонтально расположенного образца $L_c = 6,5$ см, напор воды во входном сечении $h_0 = 34,5$ см, концентрация раствора $C = 30$ г/л, коэффициент фильтрации глины, насыщенной электролитом, $k_c = 0,32$ см/ч, полная пористость $m = 0,44$, время замещения раствора

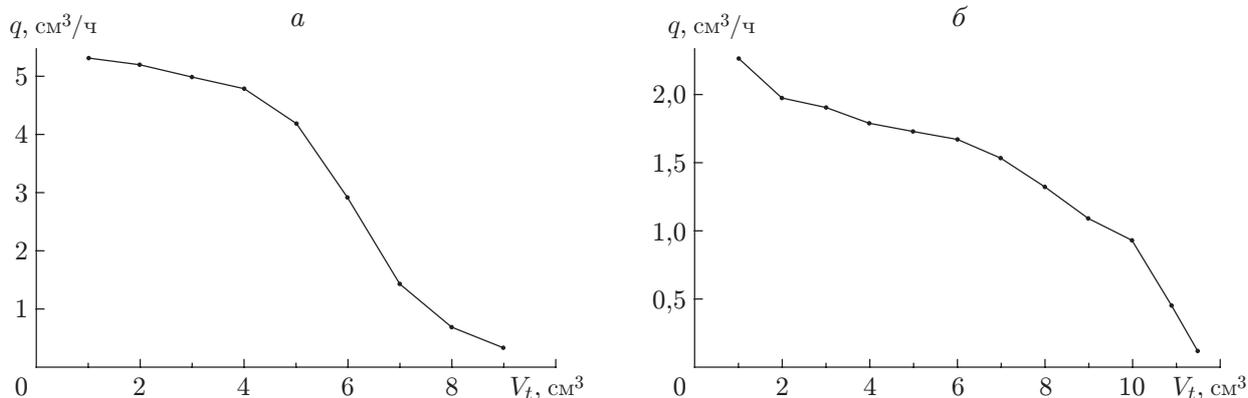


Рис. 2. Изменение расхода при вытеснении раствора пресной водой:
 а — эксперимент 1; б — эксперимент 2

$t = T \approx 6,52$ ч). Полагая $\bar{x} = 1$ и $t = T$, из аналогичной (4) формулы получаем

$$\alpha_k = \bar{x}^2 / \left(\bar{x}^2 - 2\bar{x} + \frac{2k_c}{mL_c} \frac{h_0}{L_c} T \right).$$

В рассматриваемом случае $\alpha_k = 0,147$, $k_e = 0,147 \cdot 0,32 = 0,047$ см/ч.

На рис. 2, б представлены результаты эксперимента 2 (длина вертикально расположенного образца из глины $L_c = 10,5$ см, $h_0 = 40,5$ см, $k_c = 0,148$ см/ч, $m = 0,35$, $T = 13,61$ ч, $C = 10$ г/л). Подставляя эти данные в формулу (4), находим значение параметра $\alpha_k = 0,23$, соответствующее значению $k_e = 0,23 \cdot 0,148 = 0,034$ см/ч.

Сравнение результатов экспериментов 1 и 2 показывает, что образцы глины с одинаковой текстурой, но с различной концентрацией насыщающих их электролитов характеризуются различными значениями общей пористости и коэффициентов фильтрации. Для измеренных значений пористости и начальных коэффициентов фильтрации получаем следующие оценки: $(m^{(2)}/m^{(1)})^{3,5} = (0,35/0,44)^{3,5} \approx 0,45$, $k_c^{(2)}/k_c^{(1)} = 0,148/0,32 = 0,46$ (верхний индекс в скобках соответствует номеру эксперимента). Полученный результат согласуется с изложенными выше физическими представлениями о характере процессов, протекающих в образце из глины в процессе замещения растворов с различной концентрацией.

3. Влияние внешнего электрического поля. На предварительном этапе определения коэффициента фильтрации образца в установившемся режиме разность электрических потенциалов, измеряемая во входном и выходном сечениях, была отрицательной и составляла несколько десятков милливольт.

В эксперименте 3 в условиях, сходных с условиями эксперимента 2, $\Delta\psi \in (-37, -22)$ мВ. В эксперименте 2 при движении раствора со скоростью $v = 0,59$ см/ч разность потенциалов на сетках равна $\Delta\psi = -173$ мВ. В момент начала проникновения пресной воды разность потенциалов становится положительной: при $V_t = 1$ см³ $\Delta\psi = 25$ мВ, при $V_t = 6$ см³ $\Delta\psi = 35$ мВ. Следует отметить, что наложение переменного по напряженности внешнего электрического поля не оказывает существенного влияния на скорость фильтрации.

Иная ситуация имеет место в случае, когда внешнее электрическое поле является постоянным. На рис. 3 показано изменение скорости при вытеснении раствора пресной водой в эксперименте 3 ($L_c = 8,5$ см, $h_0 = 43,5$ см, концентрация электролита $C = 10$ г/л). Из рис. 3 следует, что положительный потенциал $\Delta\psi = 3V$, приложенный во входном сечении образца при достижении значения $V_t = 10$ см³, вызывает существенное увеличение скоро-

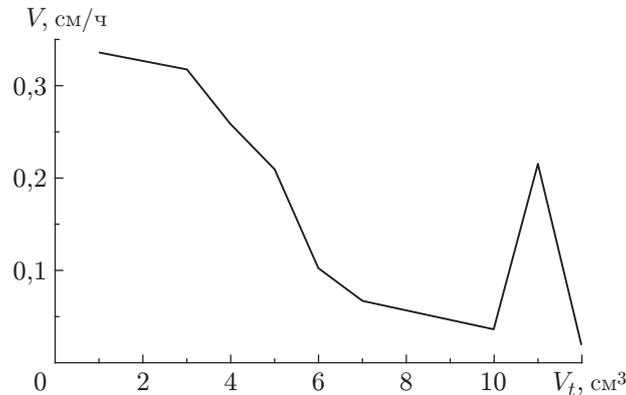


Рис. 3. Зависимость скорости вытеснения от общего объема вытекшей жидкости при вытеснении раствора пресной водой в эксперименте 3

сти вытеснения раствора. После отключения электрического поля скорость проникновения уменьшается до прежнего значения.

Уменьшение скорости вытеснения при постоянном напоре наблюдается во всех проведенных экспериментах. Более того, начиная с некоторого момента времени эта скорость может практически обращаться в нуль (подобно “начальному градиенту” для содержащих глину пород). Как показывают эксперименты, такого рода “начальный градиент” можно исключить, приложив постоянное электрическое поле.

В отсутствие диффузии и потоков свободных ионов через входное и выходное сечения образца из формулы для полного потока \mathbf{j}_i i -го иона

$$\mathbf{j}_i = -u_i k T \nabla C_i - u_i e z_i C_i \nabla \psi + \mathbf{v} C_i$$

(слагаемые в правой части соответствуют диффузионному, электрокинетическому и конвективному переносам) получаем выражение для скорости v_{eo} , вызванной электроосмосом:

$$v_{eo} = u_i e z_i \Delta \psi / L_c.$$

Эта формула аналогична известной формуле Гельмгольца — Смолуховского для капиллярных каналов пористой среды. Подвижность u_i зависит от вида иона, фильтрационных характеристик среды и типа электролита. Фильтрационные и электрические характеристики можно учесть, представив коэффициент при градиенте потенциала в виде произведения коэффициента фильтрации и некоторого электрокинетического коэффициента $k_c k_\psi$. Тогда полную скорость вытеснения v под действием гидравлического уклона и электроосмоса можно представить в виде суммы скорости фильтрации v_f и скорости v_{eo} :

$$v = v_f \pm v_{eo} = k_c (h_0 / L_c + 1 \pm k_\psi \Delta \psi / L_c). \quad (5)$$

Здесь знак “+” соответствует электроосмосу в направлении скорости фильтрации, знак “−” — разнонаправленности скоростей. Подставляя в (5) результаты измерений, представленные на рис. 3, для коэффициента k_ψ получаем оценку $k_\psi \approx 1,08$ м/В.

Приравняв общую скорость v в формуле (5) к нулю, можно определить значение коэффициента k_ψ в условиях статического равновесия между силами фильтрационного движения под действием разности напоров $\Delta H = h_0 + L_c$ и электроосмоса с заданной разностью потенциалов $\Delta \psi$. Например, в эксперименте 2 разность потенциалов $\Delta \psi = 0,5$ В удерживает статически неподвижным столб воды с разностью напоров на торцах образца из глины $\Delta H = 0,51$ м. Приравняв к нулю общую скорость, получаем $k_\psi = 1,02$ м/В. Это значение несколько меньше оценки, полученной выше для условий движения ($v \neq 0$).

Заключение. Поскольку процессы фильтрации в породах, содержащих значительную долю глины, протекают медленно, накопление экспериментальных данных требует больших затрат времени. Результаты проведенных экспериментов свидетельствуют об уменьшении скорости проникновения пресной воды в насыщенный раствором электролита образец глинистого грунта. Уменьшение скорости, более существенное в конце процесса замещения раствора, обусловлено увеличением объема воды, переходящей в прочно связанное со скелетом породы состояние за счет гидратации (набухания) частиц глины. При этом знак разности потенциалов во входном и выходном сечениях образца меняется с отрицательного на положительный, что согласуется с представлениями о механизме возникновения потенциала самополяризации глинистой породы в результате проникновения в нее воды менее соленой, чем пластовая вода. Изменение знака потенциала в процессе бурения скважин может служить показателем доли частиц глины, содержащихся в породах, слагающих пласт, и изменения его фильтрационных характеристик.

При наличии градиента гидравлического напора на конечной стадии замещения электролита дистиллированной водой скорость фильтрации практически обращается в нуль. Движение возобновляется, если на торцах образца задано внешнее воздействие в виде соответствующей разности потенциалов постоянного электрического тока. Получены предварительные количественные оценки коэффициента электроосмоса в условиях движения флюида и в состоянии покоя.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Антонцев С. Н.** Фильтрация в прискважинной зоне пласта и проблемы интенсификации притока / С. Н. Антонцев, А. В. Доманский, В. И. Пеньковский. Новосибирск: Ин-т гидродинамики СО РАН, 1989.
2. **Данаев Н. Т.** Массоперенос в прискважинной зоне и электромагнитный каротаж пластов / Н. Т. Данаев, Н. К. Корсакова, В. И. Пеньковский. Алма-Ата: Каз. нац. ун-т, 2005.
3. **Gony G.** Sur la constitution de la charge electrique a la surface d'un electrolute // Ann. Phys. (Paris). 1910. Ser. 4. P. 457–468.
4. **Chapman D. L.** A contribution to the theory of electrocapillarity // Philos. Mag. 1913. V. 25. P. 475–481.
5. **Stern O.** Zur Theorie der electrolytischen Doppelschicht // Z. Electrochem. 1924. Bd 30. S. 508–516.
6. **Haan F. A. M. de.** The negative adsorption of anions (anion exclusion) in systems with interacting double layers // J. Phys. Chem. 1964. V. 68, N 10. P. 2970–2977.
7. **Kemper W. D., Sheinberg I., Quirk J. P.** Swelling pressure, electric potentials and ion concentration: their role in hydraulic and osmotic flow through clays // Soil Sci. Amer. Proc. 1972. V. 36, N 2. P. 229–236.
8. **Ravina I., Gur Y.** Application of the electrical double layer theory to predict ion adsorption in mixed ionic systems // Soil Sci. 1978. V. 125, N 4. P. 204–209.
9. **Quirk J. P., Schofield R. K.** The effect of electrolyte concentration on soil permeability // J. Soil Sci. 1955. V. 6, N 2. P. 163–178.
10. **Пеньковский В. И., Сабинин В. И.** Инфильтрация пресной воды в насыщенный электролитом глинистый грунт // Динамика сплошной среды: Сб. науч. тр. / АН СССР. Сиб. отд-ние. Ин-т гидродинамики. 1981. Вып. 52. С. 109–118.
11. **Пеньковский В. И.** Фильтрация солевого раствора в набухающем грунте // ПМТФ. 1981. № 5. С. 95–99.

12. **Корсакова Н. К., Пеньковский В. И.** Равновесная самополяризация глин // ПМТФ. 2007. Т. 48, № 5. С. 96–103.
13. **Ishido T., Mizutani H.** Experimental and theoretical basis of electrokinetic phenomena in rock-water systems and its applications to geophysics // J. Geophys. Res. B. 1981. V. 86. P. 1763–1775.
14. **Ishido T., Prirsheft J. W.** Numerical simulation of electrokinetic potentials associated with subsurface fluid flow // J. Geophys. Res. B. 1999. V. 104. P. 15247–15259.
15. **Пеньковский В. И.** К вопросу о математическом моделировании процесса рассоления грунтов // ПМТФ. 1975. № 5. С. 186–191.

*Поступила в редакцию 30/VI 2010 г.,
в окончательном варианте — 11/VIII 2011 г.*
