

вместно с данными работы [3] в виде единой диаграммы, позволяет сделать заключение, что предложенный метод носит общий характер.

Выводы. Выдвинут новый подход к объяснению кратковременной ползучести на основе локализации пластической деформации и течения в рамках кусочно-однородной модели слоистой среды. При совместном деформировании элементов квазислоистой структуры меди истинные напряжения в отдельных метастабильных спонтанно формирующихся слоях определяют кинетику процесса кратковременной ползучести элемента конструкции. Программа термостатического нагружения наконечника фурмы определяет характер распределения напряжений и температурных зон по сечению элемента конструкции. Анализ ползучести в течение теплосмены позволяет прогнозировать долговечность при заданных режимах эксплуатации оборудования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Работнов Ю.Н. Кратковременная ползучесть / Ю.Н. Работнов, С.Т. Милейко. М.: Наука, 1970. 224с.
2. Пресняков А.А. Локализация пластической деформации. Алма-Ата: Наука, 1981. 122 с.
3. Stowell E.Z., Thein Wah. A unified theory for creep buckling under normal loads. Journal of the Aero/Space Sciences. 1962.-29, №6. – P.658-661.
4. Исаченко В.П. Теплопередача / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сук

УДК 544.638:556.33/.34

Е.В.Семененко, д.т.н. (ИГТМ НАН Украины)

Н.А. Никифорова, к.т.н. (НМетАУ)

О.В. Витушко, к.т.н.

(ООО "ШАХТСТРОЙМОНТАЖ")

Л.Ю. Колодяжная, ст. преподаватель (НМетАУ)

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОКИНЕТИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ НА ФИЛЬТРАЦИЮ ЖИДКОСТИ В ГОРНЫХ ПОРОДАХ

Розглянуто вплив електрокінетичних явищ на фільтрацію рідини в гірських породах. Запропоновано рекомендації щодо використання вимірювань потенціалу течії для оцінки й порівняння стану гірських масивів та властивостей підземних вод

INFLUENCE OF ELECTROKINETIC PHENOMENA ON FLUID WEEPAGE IN ROCKS

Influence of electrokinetic phenomena on fluid weepage in rocks is considered. Recommendations about application of streaming potential measuring for rating and comparison of massifs state and groundwater behavior are offered

При проведении горных работ нельзя не учитывать фильтрацию подземных вод через горные породы и грунты. Поскольку фильтрация происходит в результате возникновения градиента давления в горной породе, а любая природная вода содержит растворенные электролиты и обладает электропроводностью, фильтрация в горных породах неизбежно сопровождается возникновением электрокинетических явлений. Электрокинетические явления определяют многие особенности

фильтрации жидкостей через пористые среды. Эти особенности связаны с электрофизическими свойствами как пористой среды, так и насыщающей жидкости. Например, электрокинетические явления, вызванные течением подземных вод, могут вызывать значительное изменение электрического или магнитного полей вблизи района, находящегося до или после очага землетрясения [1], что можно использовать для предсказания землетрясений. Электрокинетические явления, как будет показано ниже, оказывают также существенное влияние на скорость фильтрации жидкости, что в настоящее время при расчетах не учитывается.

Причиной электрокинетических явлений является наличие двойного электрического слоя (ДЭС) на границе раздела твердой и жидкой фаз. Среди нескольких возможных моделей двойного электрического слоя общепринятой является модель Штерна, усовершенствованная многими авторами [1 – 3].

Предположим, что твердая поверхность заряжена положительно, тогда к ней притягиваются отрицательно заряженные ионы, и тонкий слой раствора электролита вблизи поверхности приобретает отрицательный заряд (рис.1). При всех условиях поверхность раздела как целое является электрически нейтральной; результирующая плотность заряда на твердой поверхности должна быть равна по величине и противоположна по знаку результирующей плотности заряда со стороны раствора. Электрически нейтральным является и раствор за пределами ДЭС.

Согласно модели Штерна, часть противоположно заряженных ионов (противоионов) из раствора удерживается твердой поверхностью (адсорбционный слой, или слой Гельмгольца толщиной δ), а оставшиеся противоионы диффузно распространяются в раствор. Диффузная часть ДЭС (диффузный слой Гуи) соответствует ионам, находящимся под комбинированным влиянием упорядочивающих электрических и разупорядочивающих тепловых сил. Частично фиксированную часть ДЭС толщиной $(\Delta - \delta)$ (см. рис. 1) называют слоем Штерна. Между заряженной твердой поверхностью и внешней границей ДЭС в растворе существует разность потенциалов E_0 . По мере удаления от поверхности абсолютная величина потенциала E уменьшается. Изменение потенциала в растворе как функция расстояния от твердой поверхности показано на рис.1.

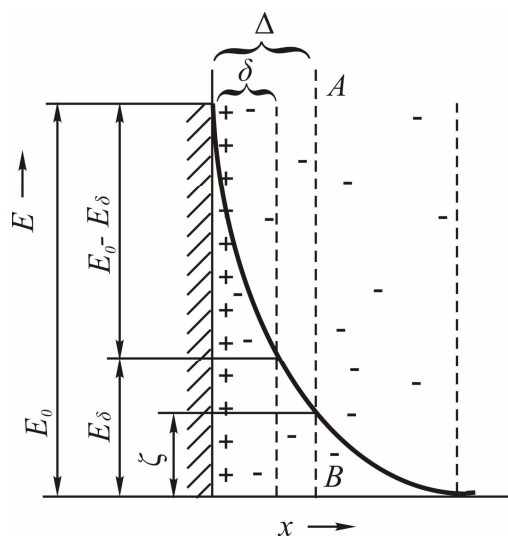
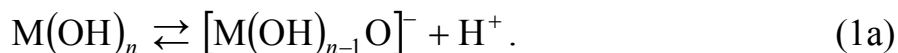
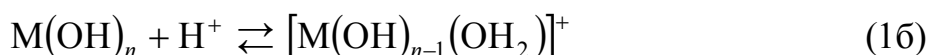


Рис. 1 – Модель Штерна двойного электрического слоя

Существует несколько механизмов образования ДЭС. Во-первых, заряд на твердой поверхности может возникать в результате ионизации поверхностных молекул твердого вещества. Известно, что нерастворимые оксиды в водных растворах приобретают поверхностный электрический заряд в результате гидратации поверхности, следующей за диссоциацией поверхностных гидроксогрупп [1–3]. Отрицательный поверхностный заряд возникает за счет диссоциации поверхностных гидроксогрупп с отщеплением ионов H^+ :



Положительный заряд поверхности лучше всего объясняется присоединением протона к нейтральной поверхности:



Таким образом, H^+ и OH^- являются потенциалопределяющими ионами, и заряд поверхности на оксиде зависит от концентрации протонов (рН раствора; $pH = -\lg c_{H^+}$, где c_{H^+} – концентрация ионов водорода).

Во-вторых, заряд на поверхности может возникнуть в результате избирательной адсорбции ионов. Поверхность адсорбирует ион, более близкий ей по природе. В-третьих, ДЭС может образоваться за счет адсорбции на твердой поверхности полярных молекул. В соответствии с правилом Кена, положительно заряжается та фаза, которая имеет большую диэлектрическую проницаемость.

Если между твердой поверхностью и электролитом существует относительное движение, становится возможным сдвинуть внешнюю, более диффузную часть двойного слоя относительно внутренней, более прочно связанной. Плоскость, на которой происходит такой сдвиг, называется плоскостью скольжения (плоскость АВ на рис. 1, находящаяся на расстоянии Δ от поверхности), а потенциал на плоскости скольжения называется ζ - потенциалом, или электрокинетическим потенциалом. Существует множество явлений, при которых два слоя, расположенных рядом с плоскостью скольжения, движутся друг относительно друга. По причинно-следственным признакам электрокинетические явления можно разделить на две группы. К первой группе относят явления, при которых относительное движение фаз обусловлено наличием внешнего электрического поля; это электроосмос и электрофорез. Ко второй группе относятся явления, при которых возникновение электрической разности потенциалов вызывается относительным движением фаз. Это потенциал течения и потенциал седиментации. Многочисленные исследования [1 – 7 и др.] показали, что основной физической величиной во всех электрокинетических явлениях является ζ - потенциал. Дзета-потенциал, отражая свойства двойного электрического слоя, характеризует природу фаз и межфазного взаимодействия. Так как плоскость скольжения может находиться на разном расстоянии от межфазной по-

верхности, а это расстояние зависит от скорости движения фаз, вязкости среды, природы фаз и других факторов, то соответственно от всех этих факторов зависит и значение электрокинетического потенциала. Все факторы, влияющие на толщину диффузного слоя, вызывают изменение ζ - потенциала.

Говоря о фильтрации подземных вод в горных породах, следует рассматривать возникновение потенциала течения. При продавливании жидкости через пористую среду (горную породу) происходит деформация ДЭС, и ионы диффузного слоя смещаются в направлении потока жидкости. В результате движения зарядов вдоль поверхности возникают поверхностный ток и разность потенциалов на концах капилляров породы; эта разность потенциалов, в свою очередь, приводит к появлению тока проводимости в обратном направлении. Разность потенциалов возрастает до установления равенства этих токов и в стационарных условиях становится постоянной. Эту разность потенциалов и называют потенциалом течения.

Для обобщенной пористой среды обычно принимают капиллярную модель, в которой предполагается, что пористая среда состоит из пучка капилляров, пронизывающих пористую среду насквозь. Такая модель дает хорошее представление о многих пористых средах, с которыми приходится сталкиваться на практике, например, о подземных запасах горных пород, песчаном дне, осадках на фильтрах и т.п. Она является достаточной для аппроксимации в первом приближении, поскольку потенциал течения не зависит от размера пористой диафрагмы и количества фильтруемой жидкости, но пропорционален объемной скорости фильтрации [1, 2]. Течение жидкости в капилляре является ламинарным, и гидравлический радиус намного больше толщины ДЭС (порядка 10 нм в обычных случаях).

Основные уравнения для описания электрокинетических эффектов в пористой среде имеют вид [1]

$$I = -(\eta \cdot t^{-2} \sigma_f + t^{-2} S \cdot \sigma_s) \Delta E + \eta \cdot t^{-2} (\varepsilon \zeta / \mu) \Delta P; \quad (3)$$

$$J = \eta \cdot t^{-2} (\varepsilon \zeta / \mu) \Delta E - (K / \mu) \Delta P, \quad (4)$$

где I – плотность электрического тока; J – объемный расход жидкости; η – пористость; t – извилистость; σ_f и σ_s – удельная электропроводность жидкости в капиллярах ($\text{Ом}^{-1} \text{м}^{-1}$) и удельная поверхностная проводимость, Ом^{-1} (добавочная удельная электрическая проводимость жидкости в капиллярной системе по сравнению с объемной проводимостью жидкости, вызываемая повышением концентрации ионов около поверхности), соответственно; S – удельная внутренняя площадь (м^{-1}); ε – диэлектрическая константа жидкости (Ф/м); μ – вязкость жидкости ($\text{Па} \cdot \text{с}$); K – проницаемость (м^2).

Принимается, что электропроводность твердого вещества намного меньше, чем электропроводность жидкости в поре.

В большинстве методов определения ζ - потенциала используются электрокинетические явления. Если твердые частицы стационарно удерживаются между

двумя электродами, и электролит приводится в движение через сыпучую массу фиксированной разностью давления ΔP , то потенциал течения от одного электрода к другому ΔE может быть использован для расчета ζ - потенциала по формуле

$$\zeta = \frac{(\eta \cdot t^{-2} \sigma_f + t^{-2} S \cdot \sigma_s) \mu \Delta E}{\eta \cdot t^{-2} \varepsilon \Delta P} \quad (5)$$

Влияние различных факторов на ζ - потенциал. На рис. 2 показана зависимость от рН ζ - потенциала некоторых минералов в растворе KNO_3 по данным [1]. Сильная зависимость ζ - потенциала горных пород от рН свидетельствует о том, что для систем минерал-вода, как и для простых систем оксид-вода, потенциалопределяющими являются ионы H^+ и OH^- . Исследования [1, 4] показывают, что ζ - потенциал многих минералов зависит также от температуры, причем с повышением температуры он возрастает по абсолютной величине. Кроме того, как показано на рис. 1, ζ - потенциал зависит не только от потенциала поверхности E_0 , но и является чувствительным к распределению потенциала вблизи поверхности. Чем выше концентрация электролита, тем более резким является падение потенциала с увеличением расстояния. Следовательно, с повышением концентрации электролита ζ - потенциал уменьшается по абсолютной величине.

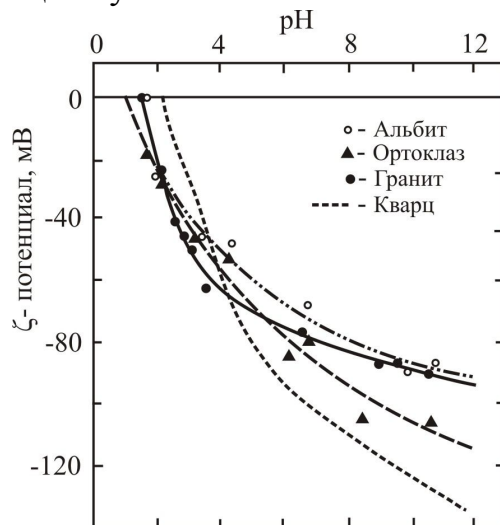


Рис. 2 – Зависимость ζ - потенциала некоторых минералов от рН в водном растворе 10^{-3} N KNO_3 . Температура 45°C .

Таким образом, изменение температурных условий и состава подземных вод оказывает существенное влияние на величину ζ - потенциала минералов и горных пород, а, значит, и на условия фильтрации подземных вод в горных породах, на прочность и устойчивость горных массивов. Кроме того, поскольку в формулу (5) для расчета ζ - потенциала на основании измерения потенциала течения входят проницаемость горной породы и извилистость пор, представляется целесообразным использовать данные измерений потенциала течения для характеристики горных массивов и их оценки с точки зрения прочности и особенностей фильтрации.

Электровязкостный эффект. При установившемся течении под приложенным градиентом давления ΔP в отсутствие внешнего электрического поля объемная скорость течения может быть найдена по формуле [5]

$$V = \frac{\pi a^4 \Delta P}{8\mu} - \frac{\varepsilon^2 \cdot \zeta^2 a^2 (1-G) F \Delta P}{16\pi \cdot \sigma \cdot \mu^2}, \quad (6)$$

где a – радиус капилляра;

$$G = \frac{2}{(\kappa a)^2 \Psi_s} \cdot \int_0^{\kappa a} R \cdot \Psi(R) dR; \quad (7)$$

$$R = \kappa r; \kappa = \left(\frac{8\pi \cdot n_0 \cdot e_0^2}{\varepsilon \cdot k \cdot T} \right)^{\frac{1}{2}}; \quad (8)$$

Ψ_s – безразмерный ζ - потенциал; $\Psi(R)$ – безразмерный потенциал в любой точке капилляра, возникающий единственно благодаря наличию ДЭС; r – расстояние от оси капилляра; e_0 – заряд протона; n_0 – концентрация соответственно катионов или анионов вдали от заряженной поверхности; k – константа Больцмана; T – абсолютная температура;

$$F = \frac{\frac{1}{2}(\kappa a)^2 (1-G)}{\int_0^{\kappa a} R \cosh \Psi(R) dR + \beta^* \int_0^{\kappa a} R \left(\frac{d\Psi(R)}{dR} \right)^2 dR}; \quad (9)$$

$\beta^* = \frac{\varepsilon^2 k^2 T^2 \kappa^2}{16\pi^2 \mu \cdot \sigma \cdot e_0^2}$ – безразмерный параметр, зависящий только от свойств электролита.

Из формулы (6) видно, что возникновение потенциала течения приводит к уменьшению скорости фильтрации, которое может быть весьма значительным. Поскольку этот эффект проявляется как появление кажущейся вязкости $\mu_a > \mu$, его называют электровязкостным эффектом, или эффектом электровязкостного торможения. В работе [5] электровязкостный эффект рассматривался как следствие возникновения индуцированного потенциала обратного течения без учета зависимости внутренней вязкости от поля ДЭС. Однако автор работы [7], измеряя торможение в узких капиллярах, обнаружил, что скорость течения дистиллированной воды в порах радиусом 0.05 мкм была на 20% меньше, чем скорость течения раствора соли. Он приписывал это аномально высокой вязкости в непосредственной близости к стенкам капилляра, причиной которой является интенсивное электрическое поле в ДЭС.

Выводы. Изменение температурных условий и состава подземных вод оказывает существенное влияние на величину ζ - потенциала минералов и горных пород, а, значит, и на условия фильтрации подземных вод в горных породах, на прочность и устойчивость горных массивов. При изучении свойств горных массивов можно рекомендовать производить измерения потенциала течения в горных породах с применением стандартного вспомогательного электролита и использовать эти данные для характеристики горных массивов и их оценки с точки зрения прочности и особенностей фильтрации. При расчете скорости фильтрации подземных вод в горных массивах и грунтах и оценке их прочности следует учитывать существенное различие в скорости течения воды и растворов электролитов в микрокапиллярах. Для характеристики и сравнения вод различного состава можно рекомендовать производить измерения потенциала их течения через стандартные стеклянные капилляры. При расчете скорости фильтрации подземных вод в горных породах следует также учитывать возникновение потенциала течения и сопровождающий его электровязкостный эффект, замедляющий фильтрацию. При расчете требуемой мощности для перекачивания электролитов через пористую среду следует предусматривать необходимость дополнительного напора насосов для преодоления эффекта электровязкостного торможения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. T. Ishido, H. Mizutani. Experimental and theoretical basis of electrokinetic phenomena in rock-water systems and its applications to geophysics / Journal of Geophysical Research.—Vol. 86, No. B3, 1981. — P. 1763 – 1775.
2. Воюцкий С.С. Курс коллоидной химии. Изд. 2-е, перераб. и доп.— М., «Химия», 1976.— 512 с.
3. Фролов Ю.Г. Курс коллоидной химии (Поверхностные явления и дисперсные системы): учебн. [для студ. хим.-техн. спец. вузов]. — М.: Химия, 1982. — 400 с.
4. Somasundaran P., Kulkarni R.D. A new streaming potential apparatus and study of temperature effects using it / Journal of Colloid and Interface Science. — Vol. 45, 1973. — P. 591 – 600.
5. S. Levine, J.R. Marriott, G. Neale, N. Epstein. Theory of electrokinetic flow in fine cylindrical capillaries at high zeta-potentials / Journal of Colloid and Interface Science. — Vol. 52, No. 1, 1975. — P. 136 – 149.
6. Rice C.L, Whitehead R.J. Electrokinetic Flow in a Narrow Cylindrical Capillary. / Journal of Physical Chemistry, 1965. — Vol. 69, No. 11. — P. 4017-4024.
7. Henniker J.C. Retardation of flow in narrow capillaries / Journal of Colloid Science. — Vol. 7, 1952. — P. 443 – 446.

УДК 622.673.1:621.778.27

К.С. Заболотный, д.т.н.,
О.В. Панченко, к.т.н.,
М.В. Полушина, к.т.н.
(Державний ВНЗ «НГУ»)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ КРУЧЕННЯ ГУМОТРОСОВОГО КАНАТА ПРИ БАГАТОШАРОВОМУ НАМОТУВАННІ

В статье приведены экспериментальные исследования кручения резинометаллического каната при многослойной намотке, подтверждающие результаты достоверности теоретических исследований резинометаллического шарнира при расчете жесткости тела намотки