

## Влияние электрокинетических процессов на фильтрацию жидкостей и газа в пористой среде

A.M. Mamed-zade, D.T.N.

НИИ "Геотехнологические проблемы нефти, газа и Химия"

e-mail: shmika@rambler.ru

### Məsəməli mühitdə maye və qazın süzülməsinə elektrokinetik proseslərin təsiri

A.M. Mammad-zada, D.T.N.

"Neftin, qazın geotexnoloji problemləri və Kimya" ETİ

**Açar sözlər:** elektrokinetik hadisələr, elektroforez, elektroosmoz, axın potensialı.

Məqalədə elektrokinetik hadisələr – elektroforez, elektroosmoz və bunlarla əlaqəli yüküklərin mövcudluğu nəzərə alınmaqla, maye və qazın məsəməli mühitdə hərəkəti təhlil olunur. Bu fenomenlər dispers sistemlərin fazalan arasındakı qovşaqlarda elektrik cüt qatının olması ilə əlaqədardır. Elektrokinetik hadisələr aşağıdakı daxildir: elektroforez, elektroosmoz, axın potensialı (Quincke təsiri), çökmə potensialı (Dorn effekti).

Maye və qazın məsəməli mühitdə hərəkət etməsi üçün, məsəməli mühitin xüsusiyyətləri və onları doymuş mayelər, habelə elektrokinetik hadisələrə təsvir olunan bir-biri ilə qarşılıqlı təsirləri nəzərə alınmaqla düsturlar alınır. Həmin düsturlar laboratoriya tədqiqatlarının nəticələri ilə qiymətləndirilmişdir.

### Effect of electro-kinetic processes on filtration of fluids and gas in porous medium

A.M. Mamed-zade, Dr. in Tech. Sc.

"Geotechnological Problems of Oil, Gas and Chemistry" SRI

**Keywords:** electro-kinetic phenomena, electro-phoresis, electro-osmosis, flow potential.

The paper reviews the fluid and gas flow in the porous medium considering electro-kinetic phenomena – electro-phoresis and electro-osmosis, as well as the charges associated with them. These phenomena are due to the double electric layer on the border of division of disperse system phases. Electro-kinetic phenomena are follows: electro-phoresis, electro-osmosis, flow potential (Quincke effect) and sedimentation potential (Dorn effect).

The formulas for the motion of fluid and gas in porous medium considering the properties of porous medium and saturating them fluids, as well as the interaction between them, which is described with electro-kinematic phenomena, have been obtained.

Obtained formulas have been evaluated via the results of laboratory researches.

**Ключевые слова:** электрокинетические явления, электрофорез, электроосмос, потенциал протекания.

DOI.10.37474/0365-8554/2021-2-16-21

В статье рассматривается движение жидкости в пористой среде. Такое исследование необходимо произвести, так как существующая теория не полностью отражает действительность. Применение её в реальном производстве приводит к существенным расхождениям и большим материальным и экономическим потерям.

Анри Филибер Гаспар Дарси (Henry Philibert Gaspard Darcy) французский инженер-гидравлик в 1856 г. открыл закон "...для песка одного качества, пропускаемый им расход прямо пропорционален напору и обратно пропорционален толщине фильтрующего слоя (грунта)". Закон Дарси широко применяется в нефтедобыче. Современная математическая запись закона Дарси при движении жидкости вдоль оси  $Ox$  такая [1]:

$$Q = \frac{k_0 S (p_1 - p_2)}{\mu l}, \quad (1)$$

где  $Q$  – расход жидкости через пористую среду;  $k_0$  – проницаемость образца пористой среды по воздуху;  $p_1$  – давление на входе в образец пористой среды;  $p_2$  – давление на выходе из образца пористой среды;  $S$  – площадь сечения образца пористой среды;  $\mu$  – вязкость фильтруемой жидкости через образец пористой среды;  $l$  – длина образца пористой среды.

Академик А.Х. Мирзаджанзаде в 1953 г. осуществил обобщение закона Дарси о характере течения неньютоновской нефти, введя слагаемое – начальный градиент давления. Такая формула хорошо описывала течение вязко-пластичных систем: нефти, содержащие парафин; асфальтены, глинистые растворы и т.д.

Закон Дарси и обобщение А.Х. Мирзаджанзаде учитывали свойства насыщающих жидкостей и породы, однако не учитывали их взаимное влияние в процессе движения жидкости в пористой среде. Ниже нами приводится результат, учитывающий как свойства насыщающих жидкостей и породы, так и их взаимное влияние. Справедливости ради, следует указать, что академик А.Х. Мирзаджанзаде знал и пропагандировал, что пористая среда влияет на течение флюидов. Им был установлен эффект проявления начального градиента давления (неньютоновские свойства) при течении газа (ньютоновская система) в глинистой пористой среде.

Начиная с 1974 г., нами были проведены исследования по влиянию магнитного поля на процессы фильтрации и вытеснения нефти из пористой среды. После тщательной проверки инновационных результатов в научных нефтяных центрах СССР, первые публикации автором были осуществлены в 1977 г. Влияние магнитного поля на фильтрацию жидкости в пористой среде нами объяснялось электрокинетическими явлениями в породе [2, 3].

Впервые электрокинетические явления – электрофорез и электроосмос, а также связанные с ними наличие зарядов у коллоидов, были описаны профессором московского университета Фридрихом Рейссом в 1807 г., однако опубликовано об этих открытиях было только в 1809 г. [4]. Изучение этих явлений стало во второй половине XIX в. содержанием одного из важнейших разделов коллоидной химии [5].

**Электрокинетические явления** (от электро- и древнегреческого κίνησις – "движение") – физические явления переноса (движения) дисперсной фазы, либо дисперсионной среды коллоидной системы относительно друг друга, которые происходят под действием приложенного электрического поля. Эти явления обусловлены наличием двойного электрического слоя на границе раздела фаз дисперсных систем. К электрокинетическим явлениям относятся:

- электрофорез;
- электроосмос;
- потенциал протекания (эффект Квинке);
- потенциал седиментации (эффект Дорна) [6].

Лабораторные исследования и анализ результатов по влиянию магнитного поля на фильтрацию жидкости в пористой среде опу-

бликованы в работе [2], а лабораторные и промысловые исследования и анализ результатов опубликованы в литературе [3]. Было получено, что при регулировании напряженности магнитного поля поверхности породы в зависимости от величины напряженности магнитного поля можно либо увеличить скорость фильтрации и извлечение количества нефти, либо уменьшить.

В 1980 г. на совещании по повышению нефтеотдачи пластов в Производственном объединении "Татнефть" в городе Казань автором был сделан доклад о закачке намагниченной воды в пласт. Этот метод позволил увеличить добычу нефти в среднем по месторождению на 30 % – это существенный результат. После моего доклада, геофизики объединения обратились к главному геологу ПО "Татнефть" Р.Х. Муслимову с вопросом: "Почему проницаемость пласта, определенная геофизическими методами (различного вида каротажа) существенно больше, чем определенная по формуле Дарси?". Я изложил свой взгляд на этот процесс.

Мною предложен был следующий сценарий поведения потока жидкости в пористой среде.

До начала разработки нефтяного месторождения поверхность пористой среды пласта обладает начальной напряженностью магнитного поля. Оно, в основном, определяется адсорбционным слоем поверхности породы, который зависит от состава породы и свойств насыщающей жидкости (в основном – вязкости); а также зависит от координат и глубины залегания пласта. В начале движения нефтяного потока порода обладает начальной проницаемостью  $k_0$  и начальным расходом жидкости через пористую среду  $Q_0$ .

После начала добычи нефти в породе движется жидкость, которая создает потенциал протекания (эффект Квинке). Поверхность пористой среды подзарядается потенциалом до определенного значения, которое зависит от электрической емкости породы (аналогично емкости конденсатора). Избыток потенциала излучается поверхностью пористой среды в виде электромагнитного поля, которое препятствует движению жидкости и приводит к уменьшению проницаемости породы.

Это удовлетворило любопытство специалистов; однако мною подосознательной происходил поиск подтверждения этой схемы фильтрации результатами лабораторных исследований.

В работе [7] приводятся результаты фильтрации дегазированной девонской нефти через образец песчанника. Эти результаты показали, что в начале эксперимента расход жидкости через пористую среду высокий, через некоторое время расход существенно уменьшился.

Вышеизложенное показывает, что в закон Дарси необходимо ввести слагаемое, учитывающее электромагнитную силу. Следуя литературе [8] если заряд  $q$  движется, то на него помимо электрической силы действует магнитная сила, поэтому полная электромагнитная сила, действующая на движущийся заряд, запишется в виде:

$$\vec{F} = q\vec{E} + q\vec{v}\vec{B}. \quad (2)$$

Так заряд  $q$  движется вдоль оси  $OX$ , а  $H$  направлен перпендикулярно  $OX$ , в формуле (2) произведем замену обозначения  $B$  на  $H$  [3]. Проекцию (2) на ось  $OX$  можно записать в виде

$$F = qE + qvH. \quad (3)$$

Преобразуем математическое выражение закона Дарси (1) таким образом, чтобы в нем участвовали силы, тогда можно будет учесть электромагнитную силу (3)

$$Q = \nu S, \quad (4)$$

где  $\nu$  – проекция скорости  $V$  на ось  $OX$ , направленную параллельно движению жидкости.

$$p_1 = \frac{F_1}{S}, \quad (5)$$

$$p_2 = \frac{F_2}{S}. \quad (6)$$

Подставим (4) – (6) в соотношение (1) получим:

$$\nu S = \frac{k_0 \left( \frac{K_1}{S} - \frac{K_1}{S} \right)}{\mu l}, \quad (7)$$

$$\nu S = \frac{k_0 (F_1 - F_2)}{\mu l}, \quad (8)$$

$$\frac{\nu S \mu l}{k_0} = F_1 - F_2. \quad (9)$$

Подставим (3) в (9) получим:

$$\frac{\nu S \mu l}{k_0} = F_1 - F_2 + qE + qvH. \quad (10)$$

Это уравнение преобразуем следующим образом

$$\nu \left( \frac{S \mu l}{k_0} - qH \right) = F_1 - F_2 + qE, \quad (11)$$

$$\nu \left( \frac{S \mu l}{k_0} - qH \right) \frac{1}{S} = (F_1 - F_2 + qE) \frac{1}{S}, \quad (12)$$

$$\nu \left( \frac{\nu l}{k_0} - \frac{qH}{S} \right) = \left( \frac{F_1}{S} - \frac{F_2}{S} + \frac{qE}{S} \right). \quad (13)$$

Умножим обе части равенства (13) на  $S$  и учтем (4), (5), (6), получим:

$$Q \left( \frac{\mu l}{k_0} - \frac{qH}{S} \right) = (p_1 - p_2 + \frac{qE}{S}) S. \quad (14)$$

Разделим (14) на значение в скобке при  $Q$  получим:

$$Q = \frac{S(p_1 - p_2) + qE}{\frac{\mu l}{k_0} - \frac{qH}{S}}. \quad (15)$$

Выражение (15) представляет обобщенный закон фильтрации жидкости в гидрофильной пористой среде.

Величины  $q$ ,  $E$ ,  $H$  определяются из эксперимента в процессе фильтрации [3].

При этом

$$q = \frac{j}{l},$$

где  $j$  – сила тока,  $l$  – время: момент измерения силы тока от начала фильтрации.

$$E = \frac{U}{l},$$

где  $U$  – разность потенциала на входе и выходе из образца породы,  $l$  – длина образца.

$H$  определяется по методике, приведенной в работе [3].

Для течения жидкости в гидрофобной пористой среде  $E = 0$  и  $H = 0$  выражение (15) превращается в закон Дарси для жидкостей:

$$Q = \frac{k_0 S (p_1 - p_2)}{\mu l}. \quad (16)$$

Закон Дарси справедлив для течения жидкости в гидрофобной пористой среде.

При решении конкретной задачи течения какой-либо жидкости в определенной пористой среде помимо уравнения фильтрации (15) необходимо также учесть уравнения Максвелла, показывающие взаимосвязь между напряженностью электрического и магнитного полей. Система уравнений запишется следующим образом:

$$\nu \left( \frac{\mu l}{k_0} - \frac{qH}{S} \right) = (p_1 - p_2 + \frac{qE}{S}), \quad (17)$$

$$\operatorname{div} \vec{V} = 0, \quad (18)$$

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{j}, \quad (19)$$

$$\operatorname{div} \vec{H} = 0, \quad (20)$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} = 0, \quad (21)$$

$$\operatorname{div} \vec{E} = 0, \quad (22)$$

$$\vec{j} = \sigma [\vec{E} + \mu_0 (\vec{V} \times \vec{H})]. \quad (23)$$

В этой системе неизвестные:  $V, p, H, E, j$ . При движении жидкости вдоль оси  $OX$ :  $V_x = V, V_y = 0, V_z = V, V_x = 0$ .

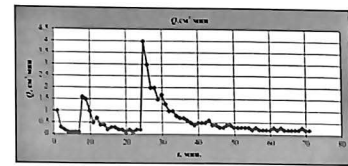
Из уравнения (20) следует, что вектор  $\vec{H}$  вдоль оси  $OY$  постоянный и равен  $H_0$  поэтому и температура системы будет постоянной. Следовательно её можно не учитывать при решении задачи.

Проверку применимости формулы (15) осуществляли математической обработкой результатов лабораторных исследований, приведенных в работе [7].

Так как в формуле (15) участвуют,  $k_0, q, E, H$ , в исследовании [7] они не учитывались, то нами из работы [3] взято для песка:  $E = 0.58$  В/м, а значение  $H = 51740$  А/м. Значение  $k_0$  равно значению проницаемости образца по воздуху, который равняется  $0.182$  мкм<sup>2</sup> [7]. Значение  $q$  для испытуемой нефти неизвестно, однако его значение можно определить одним из трех графиков, полученных из трех опытов (рис. 1) с помощью уравнения (15).

Вычислим значение  $q$  для опыта 2 при следующих данных (рисунок):

$$Q_2 = 0.1 \left[ \frac{\text{см}^3}{\text{мин}} \right] = \frac{0.1 \cdot 10^6}{60 \cdot 10^6} = 1.66 \cdot 10^{-9} \left[ \frac{\text{м}^3}{\text{с}} \right];$$



Зависимость расхода жидкости от времени: 1 опыт 1–7 мин.; 2 опыт 8–24 мин.; 3 опыт 25–71 мин.

$$\Delta p = 4 \left[ \frac{\text{кг}}{\text{см}^2} \right] = 4 \left[ \frac{10^4}{10^4} \right] = 4 \cdot 10^4 \left[ \frac{\text{кг}}{\text{м}^2} \right];$$

$$l = 50 \text{ [мм]} = 5 \cdot 10^{-2} \text{ [м]}; \quad d = 40 \text{ [мм]} = 4 \cdot 0.182 \cdot 10^{-2} \text{ [м]} = 4 \cdot 10^{-2} \text{ [м]};$$

$$S = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{3.14 \cdot 4^2 \cdot (10^{-2})^2}{4} = 12.56 \cdot 10^{-4} \text{ [м}^2\text{]} = 1.256 \cdot 10^{-3} \text{ [м}^2\text{]};$$

$$\mu = 10.8 \text{ сПз} = 10.8 \cdot 10^{-3} \text{ пуаз}; \quad k = 0.182 \text{ Д} = 0.182 \cdot 10^{-12} \text{ [м}^2\text{]} = 1.82 \cdot 10^{-13} \text{ [м}^2\text{]};$$

$$H = 5.174 \cdot 10^4 \left[ \frac{\text{А}}{\text{м}} \right]; \quad E = 0.58 \left[ \frac{\text{Вольт}}{\text{м}} \right];$$

для песчаной пористой среды.

$$Q_2 = \frac{1.256 \cdot 10^{-3} \cdot 4 \cdot 10^4 + q \cdot 0.58}{\frac{1.08 \cdot 10^{-2} \cdot 5 \cdot 10^{-2}}{1.82 \cdot 10^{-13}} - \frac{q \cdot 5.174 \cdot 10^4}{1.256 \cdot 10^{-11}}} = 1.66 \cdot 10^{-9};$$

$$\frac{50.24 + q \cdot 0.58}{3 \cdot 10^9 - q \cdot 4.1 \cdot 10^7} = 1.66 \cdot 10^{-9} \left[ \frac{\text{м}^3}{\text{с}} \right];$$

$$50.24 + q \cdot 0.58 = 1.66 \cdot 10^9 (3 \cdot 10^9 - q \cdot 4.1 \cdot 10^7);$$

$$50.24 + q \cdot 0.58 = 5 - q \cdot 6.8 \cdot 10^2; \quad 45.24 = -0.648q; \quad q = -69.81$$

Вычислим значение  $Q_3$  с использованием формулы (15):

Из рис. 1 следует, что в этом случае  $\Delta p = 10$  [кг/см<sup>2</sup>] =  $10$  [10<sup>4</sup>/10<sup>4</sup>] =  $10^4$  [кг/м<sup>2</sup>];

$$Q_3 = \frac{1.256 \cdot 10^{-3} \cdot 10^5 - 69.81 \cdot 0.58}{\frac{1.08 \cdot 10^{-2} \cdot 5 \cdot 10^{-2}}{1.82 \cdot 10^{-13}} + \frac{69.81 \cdot 5.174 \cdot 10^4}{1.256 \cdot 10^{-11}}} =$$

$$= \frac{125.6 - 40.5}{3 \cdot 10^9 + 69.81 \cdot 4.1 \cdot 10^7} = \frac{125.6 - 40.5}{3 \cdot 10^9 + 2.87 \cdot 10^9} =$$

$$= 1.45 \cdot 10^{-9} \left[ \frac{\text{M}^3}{\text{c}} \right] = 0.087 \left[ \frac{\text{cm}^3}{\text{мин}} \right].$$

Сравнивая расчетное значение  $Q_3 = 0.087$  [см<sup>3</sup>/мин] с реальным  $Q_3 = 0.1$  [см<sup>3</sup>/мин], видим расхождение на 13 %, что удовлетворительно для применения в практике.

Сравним реальное значение  $Q_3 = 0.1$  [см<sup>3</sup>/мин] со значением, полученным из расчета по формуле Дарси (16):

$$Q_3 = \frac{1.82 \cdot 10^{-13} \cdot 1.256 \cdot 10^{-3} \cdot 10^4}{1.08 \cdot 10^{-3} \cdot 5 \cdot 10^{-2}} = \frac{2.2859 \cdot 10^{-11}}{5.4 \cdot 10^{-4}} = 0.42 \cdot 10^{-7} \left[ \frac{\text{M}^3}{\text{c}} \right] = 2.52 \left[ \frac{\text{cm}^3}{\text{мин}} \right].$$

Это в 25.2 раза больше реального значения. Следовательно, расчеты по формуле (15) предпочтительнее, чем по формуле Дарси (16). При движении газа в пористой среде математическая запись закона Дарси [1] вдоль оси OX такая:

$$Q = \frac{k_0 S (p_1^2 - p_2^2)}{2 p_0 \mu l} \quad (24)$$

Для жидкостей, как было показано выше, в процессе их движения в пористой среде наблюдается появление электрических и магнитных полей, которые влияют на движение. Аналогичные процессы происходят при движении газа. Для учета этих электрокинетических явлений преобразуем формулу (24), подставив в неё (4–6), получим:

$$\nu S = \frac{k_0 S \left( \frac{F_1^2}{S^2} - \frac{F_2^2}{S^2} \right)}{2 p_0 \mu l} \quad (25)$$

$$\nu = \frac{k_0 (F_1^2 - F_2^2)}{2 p_0 \mu S^2} \quad (26)$$

$$\frac{2 p_0 \mu S^2 \nu}{k_0} = F_1^2 - F_2^2 \quad (27)$$

Подставим (3) в (27) получим:

$$\frac{2 p_0 \mu S^2 \nu}{k_0} = F_1^2 - F_2^2 + qE + q\nu H \quad (28)$$

Это уравнение преобразуем следующим образом:

$$\nu \left( \frac{2 p_0 \mu S^2}{k_0} - qH \right) = F_1^2 - F_2^2 + qE, \quad (29)$$

$$\nu \left( \frac{2 p_0 \mu S^2}{k_0} - qH \right) \frac{1}{S^2} = (F_1^2 - F_2^2 + qE) \frac{1}{S^2}, \quad (30)$$

$$\nu \left( \frac{2 p_0 \mu}{k_0} - \frac{qH}{S^2} \right) = \left( \frac{F_1^2}{S^2} - \frac{F_2^2}{S^2} + \frac{qE}{S^2} \right). \quad (31)$$

Умножим обе части равенства (31) на  $S$  получим:

$$\nu S \left( \frac{2 p_0 \mu}{k_0} - \frac{qH}{S^2} \right) = \left( p_1^2 - p_2^2 + \frac{qE}{S^2} \right) S. \quad (32)$$

Равенство (32) разделим на значение в скобке при  $Q$  получим:

$$Q = - \frac{S(p_1^2 - p_2^2) + \frac{qE}{S}}{\frac{2 p_0 \mu l}{k_0} - \frac{qH}{S^2}}. \quad (33)$$

Для течения газов в гидрофобной пористой среде  $E = 0$  и  $H = 0$  выражение (33) превращается в закон Дарси для газов (24).

При решении конкретной задачи течения какого-либо газа в определенной пористой среде помимо уравнения фильтрации (33) необходимо также учесть уравнение Максвелла, показывающее взаимосвязь между напряженностью электрического и магнитного полей. Система уравнений запишется аналогично системе (17–23), только вместо уравнения (17) надо записать уравнение (34)

$$\nu \left( \frac{2 p_0 \mu l}{k_0} - \frac{qH}{S^2} \right) = \left( \frac{p_1^2 - p_2^2}{S^2} - p \right). \quad (34)$$

$$\text{div} \vec{V} = 0, \quad (35)$$

$$\text{rot} \vec{H} = \vec{j}, \quad (36)$$

$$\text{div} \vec{H} = 0, \quad (37)$$

$$\text{rot} \vec{E} = 0, \quad (38)$$

$$\text{div} \vec{E} = 0, \quad (39)$$

$$\vec{j} = \sigma [\vec{E} + \mu_0 (\vec{V} \times \vec{H})]. \quad (40)$$

В этой системе неизвестные:  $V, p, H, E, j$ .

При движении жидкости вдоль оси OX:  $V_x = V, V_y = 0, V_z = V(y) = \nu$ .

вдоль оси OY постоянный и равен  $H_0$ , поэтому и температура системы будет постоянной.

Из уравнения (37) следует, что вектор  $H$

#### Список литературы

1. Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений / под редакцией Н.М.Муравьева. – М.: Недра, 1970, 448 с.
2. Mirzadzhanzade A.Kh., Mammad-zade A.M. Effect of clay minerals on fluid filtration in a porous medium.(Article). Lithos, 24 (1990) Elsevier Science Publishers, B.V., Amsterdam, pp. 251-260.
3. Mamed-zade A.M. Nanotekhnologiy in nefteдобыче. – Баку, 2010, 268 с.
4. Физуровский Н.А. Очерк общей истории химии. – М.: Наука, 1979, с. 445-477.
5. Фридрихсберг Д.А. Курс коллоидной химии. – Л.: Химия, 1974, с. 18-352.
6. Интернет "Википедия".
7. Логинов Б.Г., Блазевич В.А. Гидравлический разрыв пласта. – М.: Недра, 1966, с. 29-64.
8. Оррир Дж. Физика, т. 1 (перевод с английского). – М.: Мир, 1981, 279 с.

#### References

1. Razrabotka i ekspluatatsiya neftyanykh i gazovykh mestorozhdeniy / pod redaktsiyey I.M. Muravyova. – M.: Nedra, 1970, 448 s.
2. Mirzadzhanzade A.Kh., Mammad-zade A.M. Effect of clay minerals on fluid filtration in a porous medium. (Article). Lithos, 24 (1990) Elsevier Science Publishers, B.V., Amsterdam, pp. 251-260.
3. Mamed-zade A.M. Nanotekhnologii v nefteдобыче. – Baku, 2010, 268 s.
4. Fizurovskiy N.A. Ocherk obshchey istorii khimii. – M.: Nauka, 1979, s. 445-477.
5. Fridrikhsberg D.A. Kurs kolloidnoy khimii. – L.: Khimia, 1974, s. 18-352.
6. Internet "Wikipedia".
7. Loginov B.G., Blazhevich V.A. Gidravlicheskiy razryv plasta. – M.: Nedra, 1966, s. 29-64.
8. Orriy Dzh. Fizika, t. 1 (perevod s angliyskogo). – M.: Mir, 279 s.