

УДК 621.317

## ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЕФЕКТУ ЕЛЕКТРОКІНЕТИЧНОГО ГАЛЬМУВАННЯ ФІЛЬТРАЦІЇ ВУГЛЕВОДНІВ ЧЕРЕЗ ПОРОДИ-КОЛЕКТОРИ

О.Ф. Козак

Управління магістральних газопроводів “Прикарпаттрансгаз”

вул.Незалежності, 48, м. Івано-Франківськ, 76000, тел.: (034) 597664

*На основі теорії електрокінетичного явища потенціалу протікання отримано рівняння для визначення швидкості флюїду в тонкому капілярі, що враховує наявність ефекту електрокінетичного гальмування. Здійснено кількісний і якісний аналіз чинників у рівнянні, котрі впливають на ефект електрокінетичного гальмування вуглеводнів під час фільтрації через гірничі привибійні породи-колектори продуктивних свердловин, та окреслені шляхи мінімізації впливу цього ефекту.*

*Ключові слова: електрокінетичне гальмування, потенціал протікання, фільтрація, породи-колектори, рівняння, швидкість.*

*На основани теорії електрокінетического явления потенциала протекания получено уравнение для определения скорости флюида в тонком капилляре, которое учитывает наличие эффекта электрокінетического торможения. Выполнен количественный и качественный анализ факторов в уравнении, влияющих на эффект электрокінетического торможения углеводородов во время фильтрации через горные призабойные породи-колекторы продуктивных скважин, и намечены пути минимизации влияния этого эффекта.*

*Ключевые слова: электрокінетическое торможение, потенциал протекания, фильтрация, породи-колекторы, уравнения, скорость.*

*The equation for calculation the fluid flow velocity in a narrow capillary grounded on the theory of electrokinetic streaming potential phenomenon is developed. It takes into account the electrokinetic slowing down effect. The qualitative and quantitative analysis of the equation values, which influence the electrokinetic slowing down effect of hydrocarbons during the capillary percolation through the bottomhole reservoir rocks of the producing wells is carried out. The approaches to minimize this effect are determined.*

*Key words: electrokinetic slowing down effect, streaming potential, percolation, reservoir rocks, equations, velocity.*

Зростання щорічних обсягів видобування вуглеводнів – нафти і природного газу у всьому світі є передумовою ймовірного вичерпання їх розвіданих запасів в земній корі протягом тривалості життя одного покоління людей. Тому проблема найбільш повної нафтогазоконденсатовіддачі пластів з часом набуває все більшої актуальності.

В процесі фільтрації флюїдів через гірничі породи-колектори утворюється подвійний електричний шар на межі твердого тіла з флюїдом, внаслідок чого виникає електрокінетичне явище – потенціал протікання. Рух флюїду зміщує іони дифузної частини подвійного електричного шару і виносить в напрямку руху надлишок іонів одного знаку так, що вздовж поверхні каналу виникає конвективний потік цих іонів. Різниця електричних потенціалів, що утворюється

вздовж напрямку фільтрації, зумовлює зворотний відносно напрямку фільтрації об'ємний електроміграційно-електроосмотичний рух флюїду в капілярах та порах породи. Зазначений ефект, що має назву електрокінетичного гальмування, зменшує швидкість фільтрації флюїду, чим погіршує фільтраційні властивості порід-колекторів та негативно впливає на нафтогазоконденсатовіддачу продуктивних пластів.

Окрім цього, під час розробки, особливо нафтових родовищ із застосуванням різноманітних методів підвищення нафтовіддачі пластів, явище потенціалу протікання спричиняє відчутний вплив на супутні процеси і явища в пластах: адсорбцію і десорбцію хімічних реагентів, тепломасоперенос, фазові переходи, руйнування структури розчинів, хімічні реакції та перетворення речовин, інверсію

змочуваності, відкладання солей тощо. Сукупно це складає сутність механізмів нафтовіддачі пласта, що в зазначеній комплексній взаємодії недостатньо вивчене, і впродовж останнього десятиліття привертає все більшу увагу вітчизняних та закордонних науковців [1, 2, 3]. Зокрема, компанія “Шлюмберже” з метою визначення і моніторингу на основі потенціалу протікання проникності та інших супутніх характеристик порід-колекторів здійснила широкомасштабний експеримент на вертикальній нагнітальній та на горизонтальній продуктивних свердловинах нафтового родовища в штаті Індіана, США [4].

В даній роботі зроблена спроба теоретичним шляхом знайти основні впливові чинники ефекту електрокінетичного гальмування та з'ясувати їх роль і взаємний зв'язок.

Нехай ньютонівська нестиглива рідина з властивостями бінарного симетричного (1:1) електроліту рухається під дією створеного ззовні градієнта тиску через пористе середовище у вигляді безлічі прямих тонких циліндричних капілярів.

Розглянемо усталену стаціонарну ламінарну течію цієї рідини в одному з капілярів пористого середовища, припустивши, що радіус капіляра  $R$ , як і радіуси решти капілярів пористого середовища, суттєво перевищує товщину подвійного електричного шару.

Прийемо, що у досліджуваному об'ємі капіляра (рис. 1) діелектрична проникність  $\varepsilon$ , коефіцієнт динамічної в'язкості  $\mu$  рідини у всіх точках зазначеного об'єму мають однакові значення, а в'язкість рідини не залежить від локальної концентрації електроліту.

Припустимо, що внутрішня поверхня стінки капіляра з властивостями діелектрика заряджена позитивно, а сам заряд на поверхні розміщений рівномірно та неперервно. Так як за стаціонарних умов система має стан електронейтральності і загальний струм у капілярі дорівнює нулю, то знак заряду на поверхні стінки капіляра не впливає на наступний розв'язок задачі.

Між перерізами (I-I) та (II-II) (рис. 1) абсолютний тиск рідини змінюється від  $P_1$  до  $P_2$ , а електричний потенціал від  $\Phi_1$  до  $\Phi_2$ .

Електричний потенціал  $\phi(r, x)$  будь-якої точки  $a$  між перерізами (I-I) та (II-II) (рис. 1) може бути поданий згідно з принципом суперпозиції так:

$$\phi(r, x) = \psi(r) + \phi_0 - xE_x, \quad (1)$$

де  $\psi(r)$  – потенціал подвійного електричного шару в рівноважному стані (в радіальному напрямку) в нерухомій рідині та за відсутності накладеного ззовні електричного поля;  $\Phi_0$  –

потенціал електричного поля, що діє аксіально, при  $x = 0$ ;  $E_x = -\partial\phi/\partial x$  – напруженість електричного поля в напрямку  $x$ , В/м, що є сталою величиною за умови стаціонарності ламінарної течії бінарного симетричного електроліту;  $r$  – змінна в напрямку радіуса капіляра  $R$ .

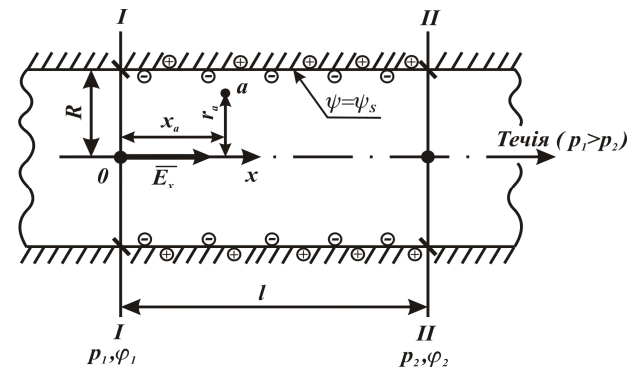


Рисунок 1 – Схема руху рідини з властивостями електроліту в капілярі під дією створеного ззовні градієнта тиску

За наявності симетричності розглядуваного явища потенціалу протікання відносно осі капіляра кількісні характеристики явища в циліндричних координатах не залежать від азимутального кута  $\theta$ .

Функція (1) задовольняє рівняння Пуассона в циліндричних координатах [5]:

$$\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left( r \cdot \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} = -\frac{\rho_e}{\varepsilon \cdot \varepsilon_0}, \quad (2)$$

де  $\rho_e$  – об'ємна густина зарядів, Кл/м<sup>3</sup>;  $\varepsilon$ ,  $\varepsilon_0$  – діелектричні проникності рідини та вакууму.

Очевидно, що з (1) випливає:

$$\frac{\partial \phi}{\partial r} = (\psi(r))'_r + (\phi_0 - x \cdot E_x)'_r = \frac{\partial \psi}{\partial r};$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} = (\psi(r))'_x + (\phi_0 - x \cdot E_x)'_x = -E_x,$$

бо  $E_x$  – стала;

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} = (-E_x)' = 0.$$

Тому рівняння (2) набуває вигляду:

$$\frac{1}{r} \cdot \frac{d}{d r} \left( r \cdot \frac{d \psi}{d r} \right) = -\frac{\rho_e}{\varepsilon \cdot \varepsilon_0}. \quad (3)$$

Приймаючи зміну концентрації іонів у

подвійному електричному шарі за розподілом Больцмана та використовуючи апроксимацію Дебая-Гюккеля [5], диференціальне рівняння (3) зводиться до вигляду:

$$\frac{1}{r} \cdot \frac{d}{dr} \left( r \cdot \frac{d\psi}{dr} \right) = \alpha^2 \cdot \psi, \quad (4)$$

оскільки

$$\rho_e = -2n_\infty \cdot \frac{e^2 \psi}{kT} = -\varepsilon \varepsilon_0 \cdot \alpha^2 \cdot \psi, \quad (5)$$

а  $\alpha$  розраховується як для бінарного симетричного електроліту ( $z = 1$ ):

$$\alpha = \left( \frac{2 \cdot e^2 \cdot z^2 \cdot n_\infty}{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot k \cdot T} \right)^{0.5}, \quad (6)$$

де  $e$  – елементарний заряд електрона, Кл;  $z$  – валентність електроліту;  $n_\infty$  – вміст іонів валентності  $z$  у виділеному для дослідження об'ємі;  $k$  – стала Больцмана, Дж/К;  $T$  – абсолютна температура, К.

Після диференціювання у рівнянні (4) маємо, що

$$\frac{d^2 \psi}{dr^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{d\psi}{dr} - \alpha^2 \cdot \psi = 0. \quad (7)$$

Граничні умови до (7) такі:

$$\text{при } r = R, \text{ то } \psi = \psi_s,$$

де  $\psi_s$  – потенціал подвійного електричного шару на внутрішній поверхні стінки капіляра;

при  $r = 0$ , то  $d\psi/dr = 0$ .

Розв'язок рівняння (7) у вигляді степеневого ряду Маклорена дає наступний результат:

$$\psi = a_0 \cdot \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(\alpha \cdot r)^{2m}}{2^{2m} \cdot (m!)^2} = a_0 \cdot y^0(\alpha \cdot r), \quad (8)$$

де  $y^0(\alpha \cdot r) = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(\alpha \cdot r)^{2m}}{2^{2m} \cdot (m!)^2}$  – модифікована

функція Бесселя нульового порядку;  $a_0$  – довільна стала. Її знаходимо з граничної умови:

при  $r = R$ , то  $\psi = \psi_s$ .

Із (8) випливає:

$$\psi_s = a_0 \cdot y^0(\alpha \cdot R), \text{ звідки } a_0 = \psi_s / y^0(\alpha \cdot R).$$

З урахуванням цього маємо:

$$\psi = \psi_s \frac{y^0(\alpha \cdot r)}{y^0(\alpha \cdot R)}. \quad (9)$$

Підставивши значення потенціалу  $\psi$  за рівнянням (9) до (5), остаточно отримуємо, що

$$\rho_e = -\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot \alpha^2 \cdot \psi_s \frac{y^0(\alpha \cdot r)}{y^0(\alpha \cdot R)}. \quad (10)$$

Відзначимо, що цей розв'язок базується на підпорядкованості електричних параметрів розподілу Больцмана та на припущенні рівності нулю радіального масового потоку іонів.

Для знаходження залежності швидкості рідини  $w_x$  від радіуса  $r$  скористаємось тим, що ламінарний рух рідини в капілярі має усталений стаціонарний характер за малих значень критерія Рейнольдса. Це означає, що швидкість руху та профіль швидкості не залежать від осьової координати  $x$ , градієнт тиску в капілярі  $dp/dx$  є величиною сталою (закон Пуазейля), як і напруженість електричного поля  $E_x$ . У циліндричних координатах за наявності осьової симетрії течії модифіковане диференціальне рівняння Нав'є-Стокса, що враховує наявність електричних сил, має такий вигляд [5]:

$$\mu \cdot \frac{1}{r} \cdot \frac{d}{dr} \left( r \cdot \frac{dw_x}{dr} \right) = \frac{dp}{dx} + \rho_e \frac{\partial \phi}{\partial x}. \quad (11)$$

З урахуванням (11) та того, що  $E_x = -(\partial \phi / \partial x) = const$ , маємо:

$$\mu \cdot \frac{1}{r} \cdot \frac{d}{dr} \left( r \cdot \frac{dw_x}{dr} \right) = G_x + E_x \cdot \varepsilon \varepsilon_0 \cdot \psi_s \cdot \alpha^2 \cdot \frac{y^0(\alpha \cdot r)}{y^0(\alpha \cdot R)}, \quad (12)$$

де градієнт тиску рідини у капілярі для спрощення запису позначено  $G_x = -(dp/dx)$ .

Граничними умовами до диференціального рівняння (12) є:

$$\text{при } r = R, \text{ то } w_x = 0; \quad (13)$$

$$\text{при } r = 0, \text{ то } \frac{dw_x}{dr} = 0. \quad (14)$$

Для розв'язку рівняння (12) подамо швидкість  $w_x$  у вигляді суми:

$$w_x = w_1 + w_2,$$

де  $w_1$  та  $w_2$  – розв'язки відповідно таких рівнянь:

$$\mu \cdot \frac{1}{r} \cdot \left( r \cdot \frac{d^2 w_1}{dr^2} + \frac{dw_1}{dr} \right) = -G_x, \quad (15)$$

та

$$\mu \cdot \frac{1}{r} \left( r \cdot \frac{d^2 w_2}{dr^2} + \frac{dw_2}{dr} \right) = E_x \cdot \varepsilon \varepsilon_0 \cdot \Psi_s \cdot \alpha^2 \cdot \frac{y^0(\alpha \cdot r)}{y^0(\alpha \cdot R)}. \quad (16)$$

Розв'язки рівняння (15) шукаємо у вигляді:

$$w_1 = A \cdot r^\alpha + C, \quad (17)$$

де  $A, C$  – довільні константи.

Підставивши (17) до (15), шляхом диференціювання отримуємо:

$$\mu \cdot \frac{1}{r} \left( r \cdot A \cdot \alpha (\alpha - 1) \cdot r^{\alpha-2} + A \cdot \alpha \cdot r^{\alpha-1} \right) = -G_x,$$

$$\mu \cdot A \cdot \alpha^2 \cdot r^{\alpha-2} = -G_x,$$

так як  $G_x = const$ , то останнє можливе за такої умови:

$$\begin{cases} \alpha - 2 = 0 \\ A = -\frac{G_x}{\mu \cdot \alpha^2} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \alpha = 2 \\ A = -\frac{G_x}{4\mu} \end{cases}.$$

З урахуванням значень  $\alpha, A$  та рівняння (17), маємо:

$$w_1 = -\frac{G_x}{4\mu} r^2 + C. \quad (18)$$

Рівняння (16) розв'язується за аналогією до розв'язку рівняння (7):

$$w_2 = -E_x \cdot \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot \Psi_s}{\mu \cdot y^0(\alpha \cdot R)} \cdot (y^0(\alpha \cdot R) - y^0(\alpha \cdot r)). \quad (19)$$

Отже,

$$w_x = w_1 + w_2 = C - \frac{G_x \cdot r^2}{4\mu} - E_x \cdot \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot \Psi_s}{\mu \cdot y^0(\alpha \cdot R)} \cdot (y^0(\alpha \cdot R) - y^0(\alpha \cdot r)). \quad (20)$$

Константу  $C$  знаходимо за граничною умовою (13), щоб вона задовольняла не тільки рівняння (17), але й (20)

$$0 = C - \frac{G_x \cdot R^2}{4\mu} - E_x \cdot \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot \Psi_s}{\mu \cdot y^0(\alpha \cdot R)} \cdot (y^0(\alpha \cdot R) - y^0(\alpha \cdot R)) = C - \frac{G_x \cdot R^2}{4\mu},$$

звідки 
$$C = \frac{G_x \cdot R^2}{4\mu}.$$

Тоді з (20) маємо:

$$w_x(r) = \frac{G_x}{4\mu} (R^2 - r^2) - E_x \cdot \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot \Psi_s}{\mu \cdot y^0(\alpha \cdot R)} \cdot (y^0(\alpha \cdot R) - y^0(\alpha \cdot r)). \quad (21)$$

Перший член правої частини рівняння (21) засвідчує параболічний характер зміни швидкості руху рідини в радіальному напрямку, що відповідає закону ламінарного руху Пуазейля, другий член – відтворює вплив електрокінетичного явища потенціалу протікання на швидкість  $w_x(r)$  рідини. Тому швидкість  $w_x$  за рахунок другого члена в рівнянні (21) є меншою за швидкість, яку можна було б досягнути за законом Пуазейля в розглядуваному капілярі за відсутності явища потенціалу протікання під час накладеного ззовні одного і того ж перепаду тиску.

Цей висновок дає підстави теоретично трактувати сутність ефекту електрокінетичного гальмування фільтрації флюїдів в порах і капілярах колекторів як зменшення швидкості фільтрації флюїдів, спричинене явищем потенціалу протікання, а не як появу “протитиску”, створеного електроміграційною протитечею флюїдів завдяки різниці потенціалів явища потенціалу протікання.

За стисло наведеним на початку статті механізмом явища потенціалу протікання електроміграційний протирух флюїду може відбуватися тільки в межах товщини подвійного електричного шару, що сягає максимум до одного мікрона у випадку води [5, 6], а не по всьому поперечному перерізу капіляра. Цей рух може створити перепад тиску в прямому розумінні і в капілярі діє тільки накладений ззовні перепад тиску.

На користь саме такої фізичної сутності ефекту електрокінетичного гальмування свідчать результати дослідів І.Жукова і П.Крюкова: для здійснення рівнозначного за ефектом електроосмотичного протируху в кварцовій діафрагмі з радіусом капілярів 0,53 мкм потрібно було прикласти потенціал у 272 рази більший за потенціал протікання [6].

Розглянемо роль впливових на ефект електрокінетичного гальмування чинників, що присутні в рівнянні (21).

Напруженість електричного поля  $E_x$  в теперішній час ще не піддається визначенню аналітичним шляхом у зв'язку з відсутністю надійної теорії. В більшості випадків її розраховують через експериментальне значення потенціалу протікання  $\Delta\phi$ , що визначається такою залежністю [7]:

$$\Delta\varphi = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot \Psi_s}{\mu \cdot \gamma} \cdot K \cdot \Delta P, \quad (22)$$

де  $K$  – корекційний фактор, який знаходиться в межах від 0 до 1 і прямує до 1 за умови, що добуток  $(\alpha \cdot R)$  прямує до нуля;  $\gamma$  – електропровідність рідини, См/м.

Виконані розрахунки за рівнянням (21) для випадку  $r = 0$  показують, що під час фільтрації дистильованої води через капіляри чи пори радіусом від 30 до 5 мкм, діапазон яких є характерним для руху вуглеводневих рідин в породах-колекторах [8], за умов  $\Delta\varphi/\Delta p = 100$  мВ/кПа та  $T = 293$  К,  $\varepsilon = 80,1$ ,  $\mu = 1,005 \cdot 10^{-3}$  Па·с,  $\gamma = 4,85 \cdot 10^{-6}$  См/м значення частки швидкості за другим членом рівняння (21) є практично не впливовим порівняно з першим членом рівняння.

Але у випадку фільтрації води за значень напруженості електричного поля  $1 \cdot 10^3$  кВ/м і більше другий член в рівнянні (21) стає співставимим з першим членом.

Такі значення напруженості електричного поля можуть досягатися в системах з мало полярними рідинами з причини мізерності величини електроміграційного струму під час фільтрації з градієнтами тиску до (10-20) МПа/м. Стационарний стан системи у цьому випадку встановлюється лише за великих значень потенціалу протікання, котрі на 5÷10 порядків перевищують значення потенціалу протікання для рідинних систем з водою [5, 6].

Діелектрична проникність  $\varepsilon$ , як одна з основних характеристик полярності рідин, для різноманітних компонентів технологічних рідин нафтогазової промисловості коливається в широких межах [9]: від мінімальних значень 2÷4 – нафта, нафтопродукти, до максимального 80,1 – вода (за температури 20 °С). В процесі зміни діелектричної проникності вуглеводневої продукції від максимальних до мінімальних значень знижуватиметься міра дисоціації розчинених молекул і, як наслідок, зменшиться кількість утворених під час дисоціації іонів та електроміграційний струм.

Потенціал подвійного електричного шару на внутрішній поверхні капіляра  $\Psi_s$  в реальних умовах фільтрації флюїдів через породи-колектори в теперішній час не піддається аналітичному визначенню з тих же причин, що й напруженість електричного поля. Тому ще на початку двадцятого сторіччя Смолуховський та Фрейндліх замість  $\Psi_s$  до всіх рівнянь, що стосуються електролітичних явищ, внесли  $\zeta$ -потенціал – електричний потенціал подвійного електричного шару в площині ковзання, котра

розділяє щільну та дифузну частини шару [5, 6]. Завше його визначають за рівнянням (22) на основі експериментальних значень  $\Delta\varphi$ . Але це не означає, що таким чином знаходять істинні значення  $\zeta$ -потенціалу. Адже до рівняння (22) також входять  $\varepsilon$ ,  $\mu$ ,  $\gamma$ , котрі у подвійному електричному шарі гублять свою визначеність з причини надзвичайно високих значень напруженості електричного поля – до  $1 \cdot 10^6$  В/см у щільній частині шару [5]. Природньо, що за такої високої напруженості деякі фізичні та хімічні властивості рідини повинні змінюватися, бо в щільному шарі молекули розчинника сильно орієнтовані. Сучасна теорія не враховує змін зазначених параметрів і для розрахунку  $\zeta$ -потенціалу доводиться використовувати їхні табличні значення, що справедливі для необмеженого об'єму фази без подвійного електричного шару і що вносить відповідні похибки. Останні, за даними окремих дослідників [5, 6], можуть бути достатньо великими.

У тонкопорових породах-колекторах ( $R < 5$  мкм) електропровідність рідини в капілярах чи порах є більшою за її електропровідність у необмеженому об'ємі за рахунок надлишкових іонів подвійного електричного шару. Це явище, що носить назву поверхневої провідності [4, 5], посилюється, коли товщина подвійного електричного шару та радіус капілярів чи пор стають величинами одного порядку.

За цих умов також зростає в'язкість рідини в межах подвійного електричного шару [2, 3].

Поверхнева провідність зменшує як величину потенціалу протікання, так і ефект електрокінетичного гальмування, а збільшення в'язкості рідини в подвійному електричному шарі навпаки – посилює ефект електрокінетичного гальмування [2, 3].

Відкладення солей в породах-колекторах, кислотне оброблення привибійної зони продуктивних свердловин також зменшуватимуть значення потенціалу протікання через зростання питомої електропровідності флюїдів та, як наслідок, нівелюватимуть дію електрокінетичного гальмування.

Отже, отримане рівняння (21) для знаходження швидкості рідини в тонкому одинарному капілярі містить основоположні теоретичні принципи оцінки величини ефекту електрокінетичного гальмування. Надійна оцінка впливу цього ефекту на швидкість фільтрації флюїдів через породи-колектори в теперішній час вимагає проведення відповідних натурних експериментів на зразок здійснених, як вже зазначалося вище, компанією “Шлюмберже” [4].

## ВИСНОВКИ

Отримане на основі теорії електрокінетичного явища потенціалу протікання рівняння для визначення швидкості флюїду в тонкому прямому капілярі дає змогу аналітичним шляхом кількісно і якісно оцінити ефект електрокінетичного гальмування в процесі фільтрації вуглеводневих флюїдів через породи-колектори. Здійснений аналіз чинників у рівнянні (21), що впливають на величину ефекту електрокінетичного гальмування, окреслює шляхи мінімізації впливу цього ефекту під час припливу вуглеводневої продукції через пори і капіляри привибійних порід-колекторів продуктивних свердловин.

1. Кісіль І.С. Електрокінетичні явища в процесі видобутку нафти і газу / І.С.Кісіль, І.М.Храпач // *Методи та прилади контролю якості*. – 2000. – № 6. – С. 43-45. 2. Gong, Lei. Resistance effect of electric double layer on liquid flow in microchannel / Lei Gong, Jian-kanq Wu // *Applied Mathematics and Mechanics*. – 2006. – V. 27, № 10. – P. 1391-1398. 3. Xuan, Xiangchun. Streaming potential and electroviscous effect in heterogeneous microchannels / X. Xuan // *Microfluidics and Nanofluidics*. – 2008. – V. 4, № 5. – P. 457-462. 4. Streaming Potential Applications in Oil Fields / M.-Y. Chen,

B.Raghuraman, J.Bryant, M.Supp (Schlumberger): *Annual Technical Conferens and Exhibition held in San Antonio (Texas USA), 24-27 September 2006*. – Режим доступу: [www.spe.org/atce/2006/technical/documents/spe1021061.pdf](http://www.spe.org/atce/2006/technical/documents/spe1021061.pdf)– 5. Newman, John S. *Electrochemical systems* / John Newman and Karen E.Thomas – Alyea. – [3rd ed.]. – New Jersey: Published by John Wiley & Sons. Inc. 2004. – 648 p. 6. *Электрокинетические свойства капиллярных систем* [О.Н.Григоров, З.П.Козьмина, А.В.Маркович, Д.А.Фридрихсберг]. – М.–Л.: Издательство академии наук СССР, 1956. – 352 с. 7. Козак О.Ф. *Визначення якості розчину диетиленгліколю за методом потенціалу протікання* // *Методи та прилади контролю якості*. – 2010. – № 24. – С. 40-45. 8. Ханин А.А. *Породы-коллекторы нефти и газа и их изучение* / А.А.Ханин. – М.: Недра, 1969. – 368 с. 9. Гордон А. *Спутник химика* / А.Гордон, Р.Форд; пер. с англ. Е.Л.Розенберга, С.И.Коппель. – М.: Мир, 1976. – 424 с.

**Поступила в редакцію 19.10.2012р.**

**Рекомендував до друку докт. техн. наук,  
проф. Кісіль І. С.**