

КІНЕТИКА КОЛЬМАТАЦІЇ ТРІЩИН ДИСПЕРСНИМИ ФАЗАМИ З РІЗНОЮ СЕДИМЕНТАЦІЄЮ ЗА НЕРІВНОВАЖНИХ І РІВНОВАЖНИХ УМОВ (СТОСОВНО ДО СПОСОБУ СТВОРЕННЯ ПОТОКОВІДХИЛЮВАЛЬНИХ БАР'ЄРІВ У МІЖСВЕРДЛОВИННИХ ЗОНАХ НАФТОВИХ ПОКЛАДІВ)

¹В.С.Бойко, ²Р.В. Бойко

¹ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15., тел. (03422) 994196
public@nung.edu.ua

²ГПУ „Львівгазвидобування” ДК „Укргазвидобування”, 79026, м. Львів, вул. І. Рубчака, 27,
тел (0322) 233664, e-mail: R. Boyko@LGV.com.ua

Создание потокоотклоняющих барьеров в межскважинных зонах нефтяных залежей является современным и одним из наиболее эффективных способов регулирования процесса добычи нефти и повышения нефтегазоизвлечения из недр. Освещены результаты исследований кольматации трещин, вскрыты закономерности кольматации трещин дисперсными фазами с разной седиментацией (плавучестью) при неравновесных и равновесных условиях с формулированием направлений практического применения их.

Одним із ефективних способів регулювання розробки нафтових покладів і підвищення нафтогазовилучення є спосіб створення потоковідхилювальних (чи потоковирівнювальних) бар'єрів у міжсвердловинних зонах (на відстані від свердловин у глибині пласта) [1,2], що дає змогу керувати потоками витіснюваних (пластових) флюїдів і витіснювальних рідин (води, водних розчинів полімерів, луґу тощо) та зменшувати передчасну обводненість видобуваної вуглеводневої продукції [3]. За наявності природних чи штучно розкритих тріщин у гірській породі газонафтонасиченого колектора цей спосіб повинен базуватися на використанні дисперсних систем з апріорі заданими розмірами частинок дисперсної фази у певному інтервалі їх зміни (із заданою керованою дисперсністю) [4]. Дослідження кольматції (заповнення) тріщин піском за рівноважних умов розглянуто в роботах [5, 6, 7], а за нерівноважних умов з використанням пом'якшувача започатковано в роботах [2, 8]. Метою даної роботи є узагальнене висвітлення і узгодження результатів цих досліджень та виявлення закономірностей кольматції тріщин дисперсними фазами з різною седиментацією (плавучістю) за нерівноважних і рівноважних умов та обґрунтування напрямків практичного використання їх, знання яких є необхідним для проектування технологічних параметрів і управління процесом створення таких бар'єрів.

Під час руху вільнозв'язаної дисперсної системи – суспензії – кожному її компоненту притаманні свої швидкість і траєкторія руху [2]. Вектор швидкості \vec{v} руху частинки (гранули) дисперсної системи можна розкласти на дві

Making the flow deviation of barriers in crosshole zones of oil pools is modern and one of the most effective methods of process regulation the oil production and increasing oil-and-gas extraction from the entrails. There have been illustrated the results of researching crack mudding, and opened the regularity of crack mudding by dispersed phases with different sedimentation under disbalanced and balanced conditions with directions formulating its practical use.

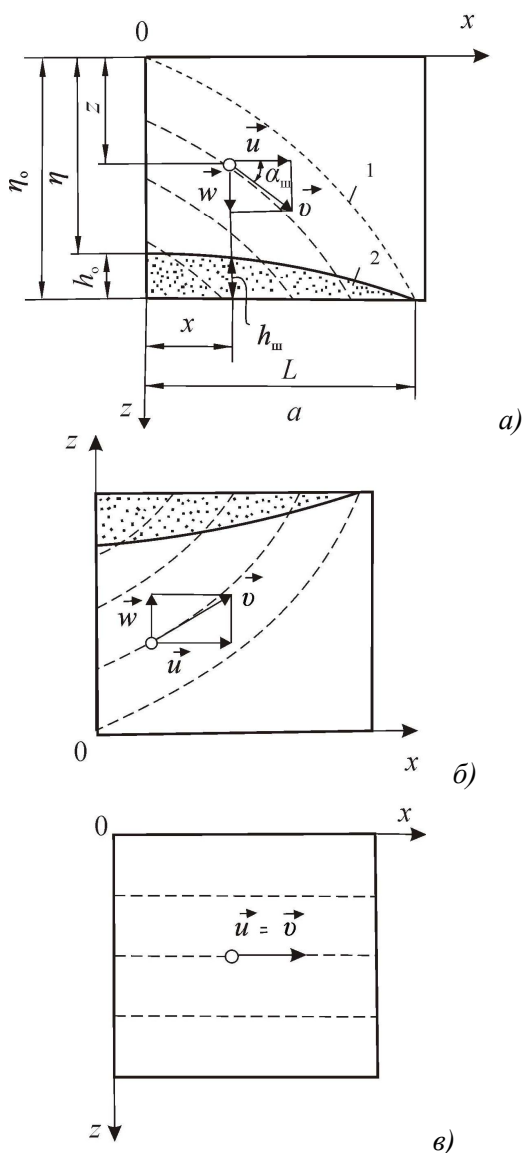
складові, рівні горизонтальній швидкості руху носія (дисперсійного середовища) \vec{u} і вертикальній швидкості додатної (чи від'ємної) седиментації \vec{w} , тобто

$$v = \frac{u}{\cos \beta_{\text{шв}}} = \frac{u}{\cos \left(\arctg \left| \frac{\vec{w}}{\vec{u}} \right| \right)}, \quad (1)$$

де $\beta_{\text{шв}}$ – кут між векторами швидкостей \vec{u} і \vec{v} .

Звідси маємо, що перенесення гранул у тріщині на велику відстань можна забезпечити збільшенням витрати носія (швидкості u) і зменшенням швидкості седиментації w (*гідродинамічний критерій перенесення гранул*). У разі постійної початкової висоти тріщини η_0 тільки у випадку нульової плавучості (різниця густин гранул і рідини $\Delta\rho = \rho_r - \rho_p = 0$), коли швидкість седиментації $w = 0$, тоді відповідно до гідродинамічного критерію глибина (відстань) L перенесення гранул може бути „необмеженою” (див. рис. 1, в). Щоб забезпечити „необмежену” глибину перенесення гранул у тріщині, треба для апріорі заданих гранул (точніше, до їх густини) підібрати відповідну густину носія, або навпаки, а тоді $\Delta\rho = 0$. При ненульовій плавучості гранул ($|\Delta\rho| > 0$, $|w| > 0$) утворення шару відбувається (див. рис. 1, а, б) або біля покрівлі (частинки спливають), або біля підшви (дна) тріщини (частинки осідають) внаслідок прилипання гранул до стінок тріщини (адгезія) і прилипання одної гранули до іншої (когезія) як результат тертя.

Аналізуючи результати відомих досліджень кольматції пористого середовища, наприклад [9], процес утворення (накопичення) зернистого



$a - \rho_z > \rho_p$; $b - \rho_z < \rho_p$; $c - \rho_z = \rho_p$;
 1 – траєкторія руху частинок;
 2 – зернистий шар

Рисунок 1 – Схеми переміщення гранул у тріщині й утворення зернистого шару за різних співвідношень густин гранул ρ_p і рідини ρ_p

шару в тріщині, розглядаємо як сумарний результат двох явищ – кольматації і декольматації. Під кольматацією розуміємо концентрування гранул у зернистому шарі (намивання шару) в результаті самовільного їх переходу (спливання, осідання) з об'єму дисперсної системи, а під декольматацією – зворотний процес (розмивання шару потоком).

Априорі припускаємо, що інтенсивність намивання товщини шару є пропорційною питомій витраті $w_0\phi$ гранул, яка припадає на одиницю площі поперечного перерізу потоку у вертикальному напрямі (седиментаційному потоку), і об'ємному недонасиченню тріщини зернистим шаром $(1 - \zeta)$, а інтенсивність розмивання шару – початковій швидкості потоку u_0 ($u_0 = q/(\eta_0\delta)$) і насиченості тріщини шаром ζ , де:

w_0 – швидкість додатньої (осідання) чи від'ємної (спливання) седиментації гранул; ϕ – об'ємна концентрація частинок у дисперсній системі ($\phi = \text{const}$); ζ – об'ємна насиченість тріщини зернистим шаром (об'ємна частка шару в тріщині); u_0 – початкова швидкість потоку; q – об'ємна витрата дисперсної системи через тріщину ($q = q_0 = \text{const}$); δ, η_0 – розкриття (ширина) і початкова висота прохідного перерізу вертикальної тріщини.

Підсумовуючи алгебраїчно ці інтенсивності завдяки дії двох протилежних процесів, одержуємо диференціальне рівняння кінетики кольматації тріщини (утворення зернистого шару в тріщині):

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = \frac{a_1 w_0 \phi}{3_0} (1 - \zeta) - \frac{a_2 u_0}{3_0} \zeta, \quad (2)$$

де: $\frac{\partial \zeta}{\partial t} = \eta_0 \frac{\partial h_{\text{ш}}}{\partial t}$; $h_{\text{ш}}$ – товщина зернистого шару; a_1, a_2 – постійні дослідні коефіцієнти.

Відзначимо справедливості закону діючих мас у даному випадку, коли кольматація є пропорційною насиченості рухомими гранулами (α), а декольматація – насиченості зернистим шаром (ζ), оскільки $\phi(1 - \zeta) = \alpha$ і $\zeta = \frac{1}{1 - m_{\text{ш}}} \beta$,

де: α – об'ємна насиченість тріщини рухомими гранулами; β – об'ємна насиченість тріщини гранулами, які вже осіли (чи сплили); $m_{\text{ш}}$ – коефіцієнт пористості утвореного шару.

Рівняння (2) в такому записі, як виявилось, є найбільш загальним кінетичним рівнянням кольматації і пористого середовища та може бути одержано, якщо цей процес вважати випадковим і описувати рівняннями стохастичних процесів [10]. Воно свідчить, що кольматація практично відбувається протягом певного проміжку часу, після якого настає рівновага за заданої концентрації ϕ гранул у суспензії, тобто рівняння описує процес кольматації в нерівноважних умовах.

Дане рівняння кінетики кольматації тріщини легко зводиться до безрозмірного вигляду:

$$\frac{\partial \pi_1}{\partial \pi_3} = a_1(1 - \pi_1) - a_2 \pi_1 \pi_2 \quad (3)$$

або

$$\frac{1}{a_1} \frac{\partial \pi_1}{\partial \pi_3} = 1 - (1 + a_3 \pi_2) \pi_1, \quad (4)$$

розв'язок якого за початкової умови $\pi_1 = 0$ при $\pi_3 = 0$ (або $\zeta = 0$ при $t = 0$) для елемента тріщини (зміна концентрації ϕ вздовж тріщини) має вигляд

$$\pi_1 = (1 + a_3 \pi_2)^{-1} \{1 - \exp[-a_1 \pi_3 (1 + a_3 \pi_2)]\}, \quad (5)$$

де

$$\pi_1 = \zeta = \frac{h}{\eta_0}; \quad \pi_2 = \frac{u_0}{w_0 \phi}; \quad \pi_3 = \frac{w_0 \phi t}{\eta_0};$$

$$a_3 = \frac{a_2}{a_1}. \quad (6)$$

Величини π_1 і π_2 є симплексами відповідно геометричної і фізичної подібностей, а π_3 – критерієм гомохронності.

Згідно з π -теореомою процес кольматації також описано такими ж трьома комплексами – π_1, π_2, π_3 , на основі факторного експерименту на фізичній моделі з використанням пом'якшувача (матеріал з від'ємною седиментацією) встановлено емпіричну залежність між ними і визначено, що $a_1 = 1,84; a_3 = 3,9 \cdot 10^{-4}; a_2 = 7,2 \cdot 10^4$, а адекватність отриманого рівняння перевірено за критерієм Фішера [8]. Введення емпіричних коефіцієнтів у модель кольматації викликано феноменологічним підходом, що є звичним у гідродинаміці в'язких рідин і суспензій.

Модель (5) ми доповнили на основі експериментальних досліджень із заповнення (закріплення) вертикальних тріщин піском, котрий характеризується додатньою седиментацією у воді (осідання). Ці дослідження стосовно гідророзриву продуктивного пласта виконав Ю.В.Желтов [5, 6, 7], а залежність процесу намивання шару подав від гідравлічної потужності потоку [7] (добуток витрати і динамічного коефіцієнта в'язкості дисперсійного середовища). Дослідами встановлено, що в практично можливих умовах здійснення гідророзриву тривалість росту нерухомого шару до критичної величини (припинення росту) обчислюється хвилинами і десятками хвилин; тому в більшості випадків за час проведення фактичної операції гідророзриву цілком досягаються критичні умови [6]. Результати дослідів представлено для критичних (тобто рівноважних) умов у безрозмірних величинах (у наших позначеннях):

$$\pi_{1кр} = \frac{h_{кр}}{\eta_0}; \quad \varphi; \quad \pi_4 = \frac{d}{\delta}; \quad \pi'_2 = \frac{Q_p \mu_p}{\Delta \rho g \delta \eta_0^3}, \quad (7)$$

де: d – середній ефективний діаметр зерен піску; Q_p – об'ємна витрата рідини (дисперсійного середовища); μ_p – динамічний коефіцієнт в'язкості рідини; $\Delta \rho$ – різниця густин частинок піску і рідини; g – прискорення вільного падіння.

Комплекс π'_2 ми перетворили до вигляду:

$$\pi'_2 = \frac{Q(1-\varphi)}{\delta \eta_0} \frac{d^2}{g d^2 \Delta \rho \cdot 18 \eta_0^2} = \frac{u_0(1-\varphi)}{w_0(1-\varphi)^n} \frac{d^2}{18 \eta_0^2} = \frac{u_0}{w_0} \frac{d^2(1-\varphi)^{n+1}}{18 \eta_0^2} = \pi_2 \frac{d^2 \varphi(1-\varphi)^{n+1}}{18 \eta_0^2}, \quad (8)$$

де: $Q_p = Q(1-\varphi); u_0 = \frac{Q}{\delta \eta_0}; w_0 = w_{ст}(1-\varphi)^n;$

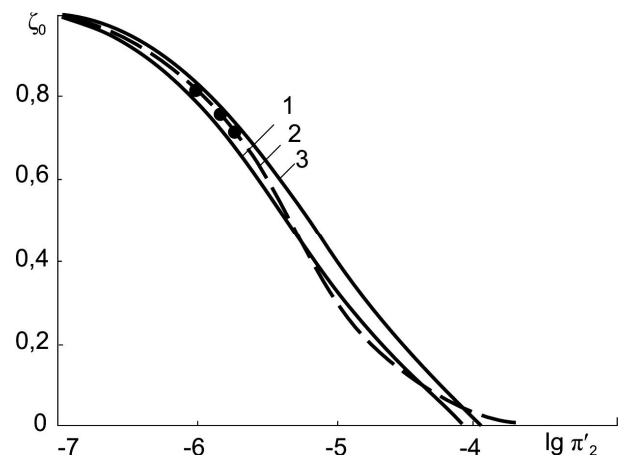
$w_{ст} = \frac{g d^2 \Delta \rho}{18 \mu_p}$ – швидкість седиментації за

Стоксом (окремої частинки); n – показник степені за П.В. Лященком, який враховує стиснене осідання частинок (за даними різних авторів у залежності від режиму обтікання частинок рідиною величина n змінюється в межах 2,25-4,8) [11].

У роботах Ю.В.Желтова введено також параметр $\pi_4 = d / \delta$, де d – середній ефективний діаметр частинок суспензії, а ми припускали, що $d \ll \delta$. Якщо відповідно ввести в нашу модель параметр π_4 , то це дає змогу нам записати уточнений параметр (симплекс структурної подібності)

$$\pi_2'' = \pi_2 \frac{0,1565 \delta d \varphi (1-\varphi)^{n+1}}{18 \eta_0^2}. \quad (9)$$

Тоді експериментальні дані [8] нами були перераховані за $n = 4$ по параметру π_2'' і перенесені на графік Ю.В. Желтова. Цей графік відтворюється на рис. 2, на який додатково нанесено пунктирну лінію, що побудована згідно з нашим рівнянням (5), перерахована в координатах Ю.В. Желтова і містить у собі експериментальні точки стосовно пом'якшувача (матеріал із від'ємною седиментацією). Лінії 1, 2, 3 відповідають концентрації потоку, яка дорівнює 0,002-0,004; 0,0029 і 0,004-0,006 [8], а рух тільки таких малокоцентрованих суспензій є можливим у пористих і тріщинуватих середовищах [12]. Звідси нами встановлено задовільне співпадання результатів нашої роботи [8] стосовно пом'якшувача (матеріал з від'ємною седиментацією) з експериментальними даними Ю.В. Желтова [5, 7], які одержано для рівноважних умов намивання піску (матеріал із додатньою седиментацією), чим підтверджено кінетичну модель (2).



1 – 0,002-0,004; 2 – 0,00209; 3 – 0,004-0,006 (суцільні лінії перенесено із роботи Ю.В.Желтова [5, 7] за даними експериментального вивчення закріплення вертикальної тріщини піском; пунктирна лінія побудова згідно з рівнянням (3) і включає експериментальні точки стосовно пом'якшувача)

Рисунок 2 – Залежність рівноважної насиченості ζ_0 тріщини зернистим шаром від критерію π'_2 для різних значень концентрації φ потоку

У тріщині, як розглядалося вище, одночасно існують два протилежні процеси – накопичення і розмивання шару (кольматації і декольматації). При досягненні швидкістю потоку величини деякої швидкості потоку, яку названо

критичною $u_{кр}$, темп накопичення стає рівним темпу розмивання – ріст товщини шару припиняється, а висота шару набуває значини критичної висоти $h_{кр}$. Тоді критичну швидкість потоку можна записати так:

$$u_{кр} = \frac{q}{\delta(\eta_0 - h_{кр})}. \quad (10)$$

Якщо припустити, що $q = \text{const}$, то із умови постійності витрати

$$q = u_0 \eta_0 \delta = u_{кр} \delta (\eta_0 - h_{кр}) \quad (11)$$

знаходимо

$$u_{кр} = \frac{u_0}{1 - \zeta_{кр}} = u_0 \left(1 + \frac{1}{a_3 \pi_2} \right) = u_0 \left(1 + \frac{w_0 \varphi}{a_3 u_0} \right) = u_0 + a_3^{-1} w_0 \varphi. \quad (12)$$

Отже, маємо теоретично одержаний висновок: критична швидкість дисперсної системи в тріщині є лінійною функцією концентрації суспензії.

Ю.В.Желтов експериментально для потоку в тріщині [8] і С.І.Кріль експериментально з теоретичним обґрунтуванням для потоку в циліндричній трубі встановили, що з ростом концентрації критична швидкість збільшується. Нами вперше встановлено теоретичну лінійну залежність критичної швидкості дисперсної системи в тріщині (прямокутному каналі) від концентрації суспензії (із параметрами – u_0 , w_0 , a_3 , які легко піддаються визначенню).

Рівняння (3) або (5) описують (в диференціальній або інтегральній формах) кінетику кольматації, тобто зміну ступеня кольматації (величини об'ємної насиченості тріщини зернистим шаром) з часом t в елементі тріщини. Іншими словами, ці рівняння характеризують процес в умовах нерівноважності, коли швидкості кольматації і декольматації не рівні між собою. При $\pi \rightarrow \infty$ (або $t \rightarrow \infty$) настає рівновага в системі і швидкості їх зміни у двох протилежних напрямках є рівними між собою.

Якщо розглядати тривалі процеси тампонування тріщин пласта, то нерівноважними ефектами кольматації можна нехтувати і відповідно припускати, що розподіл гранул між шаром і дисперсною системою є рівноважним, а отже, інтенсивності кольматації і декольматації рівні між собою, тобто $\partial \zeta / \partial t = 0$. Тоді для рівноважних умов із рівняння кінетики (2) при $\partial \zeta / \partial t = 0$ або із рівняння (5) при $\pi_3 \rightarrow \infty$ маємо рівняння типу рівняння ізотерми нелінійної сорбції Ленгмюра [13] (при граничній сорбційній ємності, рівній одиниці):

$$\zeta(\varphi) = \frac{1}{1 + \alpha_3 \pi_2}, \quad (13)$$

або

$$\zeta(\varphi) = \frac{\alpha_a \varphi}{1 + \alpha_a \varphi}, \quad (14)$$

де: $\alpha_a = a_1 w_0 / a_2 u_0$ – константа адсорбційної рівноваги, яка характеризує співвідношення в даному випадку між архімедовою і гідродинамічною силами (чи між коефіцієнтами кольматації і декольматації), а на цій підставі коефіцієнт $a_1 w_0 / \eta_0$ можна назвати коефіцієнтом кольматації, а коефіцієнт $a_2 u_0 / \eta_0$ – коефіцієнтом декольматації.

Звідси випливає, що за малих концентрацій гранул у суспензії ($\varphi \ll 1$, точніше $b_a \varphi \ll 1$), залежність $\zeta(\varphi)$ має прямолінійний характер і зводиться до рівняння ізотерми лінійної сорбції Генрі:

$$\zeta(\varphi) = b_a \varphi, \quad (15)$$

де b_a набуває поняття константи Генрі [14].

Зрозуміло, що у випадку нульової плавучості, коли $w_0 = 0$ і $\alpha_a = 0$, насиченість кольматувальним шаром $\zeta = 0$. При $\pi_2 \rightarrow 0$, коли швидкість седиментаційного потоку $w_0 \varphi \rightarrow \infty$, або початкова швидкість потоку $u_0 \rightarrow 0$, насиченість $\zeta \rightarrow 1$.

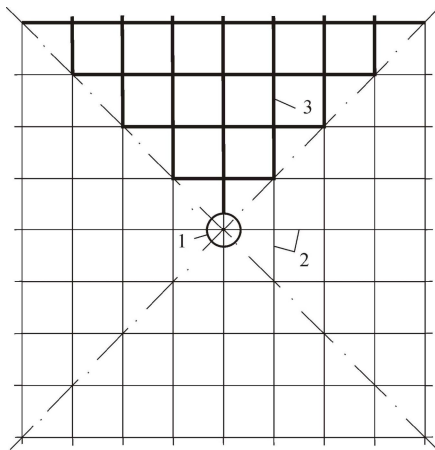
Отже, між процесами кольматації і сорбції, як між двома масообмінними процесами, відмічається аналогія. Це дало нам змогу складний процес утворення зернистого шару в багатьох тріщинах пласта звести до процесу сорбції дисперсної фази тріщинуватим середовищем з нелінійною ізотермою сорбції. Тобто з урахуванням експериментальних досліджень намивання гранул складний процес утворення зернистого шару в багатьох тріщинах, які характеризуються різною величиною розкриття і, як результат, різною насиченістю ослими гранулами, доцільно розглядати як процес сорбції дисперсної фази тріщинуватим середовищем з нелінійною ізотермою, розуміючи сукупність різнорозмірних (полірозмірних) тріщин як суцільне середовище. Тоді рівняння кінетики кольматації (22) можна записати як рівняння кінетики сорбції Ленгмюра, яке використовується при вивченні фільтрації водних розчинів активних домішок, наприклад поліакриламід, стосовно до фізико-хімічних методів підвищення нафтовилучення [14], у вигляді

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = \alpha_c (\varphi - \alpha_p \zeta), \quad (16)$$

де: $\alpha_c = a_1 w_0 (1 - \zeta) / \eta_0$ – коефіцієнт швидкості сорбції; $\alpha_p = a_2 u_0 / [a_1 w_0 (1 - \zeta)]$ – коефіцієнт розподілу речовини (дисперсної фази), причому ці коефіцієнти в даному випадку є не постійними величинами, як це зазвичай припускається, а функціями швидкостей і насиченості тріщин пласта зернистим шаром.

Для переходу до радіальної течії пропонуємо модель розгалужених вертикальних тріщин (рис. 3), коли при деякому збільшенні радіуса одна тріщина розділяється (розгалужується) на дві чи більше тріщин, однак їх густота в пласті залишається сталою (по площі або об'єму). Така модель дає змогу дискретну зміну витрати потоку в тріщинах вздовж радіуса замінити не-

перервною і, відповідно, використовувати апарат диференціального і інтегрального числення.



1 – контур свердловини;
2 – сітка перпендикулярних тріщин;
3 – умовна гілка розгалуження тріщини

Рисунок 3 – Схема моделі вертикальних тріщин, що розгалужуються (в плані), стосовно радіальної течії

Таким чином, запропонована модель кінетики кольтатації вертикальних тріщин дисперсною фазою підтверджена експериментами з використанням речовин як з додатною, так і з від’ємною седиментацією. Вона дає змогу звести складний процес кольтатації багатьох тріщин до процесу сорбції дисперсної фази тріщинувато-пористим середовищем з нелінійною ізотермою Ленгмюра, а відтак застосувати теорію фільтрації рідини з активними домішками для розв’язування проблеми тампонування каналів проривання води до свердловин. Встановлено теоретичну лінійну залежність критичної швидкості дисперсної системи в прямокутному каналі від концентрації суспензії. Виявлені закономірності можна переносити й на інші процеси, пов’язані з потоками дисперсних систем у трубах чи каналах різного поперечного перерізу.

Література

1 Способ разработки нефтяной залежи / В.С. Бойко и др. – Авт. свид. 1103622 СССР. МКИ Е 21 В 43/20. Заявлено 19.05.83, №3591781/22-03; зарегистр. 01.07.88.
2 Бойко В.С. Научные основы интенсификации нефтегазодобычи из неоднородных пластов с применением дисперсных систем: Диссертация ... доктора техн. наук: 05.15.06. – Ивано-Франковск-Москва: ИФИНГ – МИНХ им. И.М. Губкина, 1989. – 460 с.
3 Інтенсифікація роботи обводненої нафтової свердловини / В.С. Бойко та ін. // Нафтова і газова промисловість. – 2000. – № 4. – С. 32-33.
4 Бойко В.С. Регулювання розробки газонафтових покладів шляхом закачування дисперсних систем // Нафтова і газова промисловість. – 1992. – № 2. – С. 39-42.

5 Желтов Ю.П. Закрепление вертикальных трещин, образованных при гидравлическом разрыве пласта // Новости нефтяной и газовой техники. Нефтепромысловое дело: Сб. статей. – М.: ГОСИНТИ, 1961. – №4. – С. 17-19.

6 Желтов Ю.В. Исследования по механизму образования и закрепления трещин при гидравлическом разрыве пласта: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.315. – М., 1961. – 14 с.

7 Желтов Ю.В. О закреплении песком трещин, образованных при гидроразрыве пласта // Экспериментальные исследования в области разработки глубоких нефтяных и газовых месторождений. – М.: Наука, 1964. – С. 84-96. (Тр. ИГ и РГИ).

8 Бойко В.С., Купер І.М. Експериментальне вивчення процесу намівання зернистого шару у вертикальній тріщині // Нафтова і газова промисловість. – 1993. – №1. – С. 31-34.

9 Орнатский Н.В., Сергеев Е.М., Шехтман Ю.М. Исследование процесса кольтатации песков. – М.: Изд. МГУ, 1955. – 182 с.

10 Litwiniyszyn J. On Some Mathematical Models of the Suspension flow in Porous Medium // Chemical Engineering Science. – 1967. – Vol. 22. – P. 1315-1324.

11 Експлуатація свердловин у нестійких колекторах: Монографія / В.С. Бойко, І.А. Франчук, С.І. Іванов, Р.В. Бойко. – К.: Книгодрук, 2004. – 400 с.

12 Бойко Р.В. Імовірнісно-допустима концентрація суспензії для качки у пористе середовище // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ: Респ. міжвід. наук.-техн. зб. – Вип. 30. – Івано-Франківськ: ІФДТУНГ, 1993. – С. 91-96.

13 Фролов Ю.Г. Курс коллоидной химии. Поверхностные явления и дисперсные системы. – М.: Химия, 1982. – 400 с.

14 Бойко В.С., Бойко Р.В. Підземна гідрогазомеханіка: Підручник. – Львів: Апріорі, 2005. – 452 с.