

НАФТОГАЗОВА ІНЖЕНЕРІЯ

УДК 622.276.1/7

КОЛЬМАТАЦІЯ ТРІЩИН ДРІБНОДИСПЕРСНИМ МАТЕРІАЛОМ ПРИ ТАМПУВАННІ ТРІЩИНУВАТО-ПОРИСТОГО СЕРЕДОВИЩА ЯК ПРОЦЕС НЕЛІНІЙНОЇ АДСОРБЦІЇ ЛЕНГМЮРА

¹В.С. Бойко, ²Р.В. Бойко¹ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 994196, e-mail: public@nimg.edu.ua²УМГ "Львівтрансгаз", м. Львів, вул. Рубчака, 3, тел./факс (0322) 633233, e-mail: Rvas256@gmail.com

Стосовно нового напрямку регіонального (міжсвердловинного) регулювання фільтраційних потоків у покладах вуглеводнів і підземних сховищ газу та відповідно до технології тампонування тріщин у колекторах вуглеводнів із використанням суспензії дрібнодисперсних матеріалів (гранул) розроблено математичну модель кінетики кольматації тріщин гранулами на основі положень фізикоїдної хімії та експериментальних досліджень із гідродинаміки суспензії. У безрозмірному вигляді модель описує залежність симплексів геометричної, фізичної та структурної подібності і критерію гомохронності. Модель кінетики обґрунтована власними експериментами за нерівноважних умов та експериментами за критичних (рівноважних) умов, результати яких опубліковано в літературі стосовно гідророзриву пласта з використанням дисперсних систем як з додатною, так і з від'ємною седиментацією. Адекватність розв'язку диференціального рівняння моделі та експериментальних даних підтверджено критерієм Фішера. Встановлено теоретичну залежність критичної швидкості дисперсної системи від концентрації суспензії, оцінено роль сил аутогезії і адгезії, виведено рівняння критичної насиченості тріщини зернистим шаром. Модель дала змогу звести складний процес кольматації різнорозмірних багатьох тріщин до процесу адсорбції дисперсної фази тріщинувато-пористим середовищем з нелінійною ізотермою Ленгмюра, а відтак застосувати відому теорію фільтрації рідини з активними домішками для розв'язування задачі тампонування каналів проривання води до свердловин. Модель може бути застосована і для опису інших фізично подібних процесів.

Ключові слова: гідродинаміка суспензій, адсорбція, нафтовий поклад, газовий поклад, підземне сховище газу, обводнення свердловин, регулювання фільтраційних потоків.

Применительно к новому направлению (междускважинного) регулирования фильтрационных потоков в залежах углеводородов и подземных хранилищах газа в соответствии с технологией тампонирования трещин в коллекторах углеводородов с использованием мелкодисперсных материалов (гранул) разработана математическая модель кинетики кольматации трещин гранулами на основе положений физикоїдної химии и экспериментальных исследований с гидродинамикой суспензий. В безразмерном виде модель описывает зависимость симплексов геометрического, физического и структурного подобия и критерия гомохронности. Модель кинетики обоснована собственными экспериментами при неравновесных условиях и экспериментами при критических (равновесных) условиях, результаты, которых опубликованы в литературе применительно к гидроразрыву пласта, с использованием дисперсных систем как с положительной, так и с отрицательной седиментацией. Адекватность решения дифференциального уравнения модели и экспериментальных данных подтверждено критерием Фишера. Установлена теоретическая зависимость критической скорости дисперсной системы от концентрации суспензии. Оценена роль сил аутогезии и адгезии, выведено уравнение критической насыщенности трещины зернистым слоем. Модель позволяет свести сложный процесс кольматации многих разноразмерных трещин к процессу адсорбции дисперсной фазы трещиновато-пористой средой с нелинейной изотермой Ленгмюра, а затем применить известную теорию фильтрации жидкости с активными примесями для решения задачи тампонирования каналов прорыва воды к скважинам. Модель может быть применена и для описания других физически однообразных процессов.

Ключевые слова: гидродинамика суспензий, адсорбция, нефтяная залежь, газовая залежь, подземное хранилище газа, обводнение скважин, регулирование фильтрационных потоков.

Concerning the new conception of regional (interwell) filtration flows regulation in hydrocarbon deposits and underground storage facilities and in accordance with the fracture well plugging technology in hydrocarbon reservoirs with the usage of slurry fine-dispersed materials (pellets), the kinetics mathematic model of fracture colmatation with pellets, based on the principles of physical and colloid chemistry and experimental studies in hydrodynamics of slurry has been worked out. The model in the non-dimensional form describes the dependence of geometric, physical and structural similarity simplexes and homochronism criterion. The kinetics model is grounded by own experiments under nonequilibrium conditions and experiments under equilibrium ones, and the results of which have been published in scientific sources related to hydraulic fracturing. The solution adequacy of the differential equation of the model and experimental data has been confirmed by Fisher's criterion.

The theoretical dependence of the dispersed system critical rate on the slurry concentration has been established as well as the impact of autoadhesion and adhesion forces has been estimated, the equation of critical saturation of fracture with granulated layer has been proved. The model enabled to lead the complicated process of multidimensional numerous fractures to the process of the process of dispersed phase adsorption by with fractured porous medium with nonlinear Langmuir's isotherm, therefore the well known theory of fluid filtration with active impurities for solving the problem of plugging channels water penetration to the wells should be used. The model can be also applied for the description of other physically similar processes.

Key words: hydrodynamics of slurries, adsorption, oil reservoir, gas reservoir, underground gas storage facility, water drowning, filtration flows regulation.

Вступ. В Україні, як і у світі загалом, на сьогодні велими актуальною є проблема підвищення ефективності видобування нафти і газу та роботи підземних сховищ газу.

Більшість нафтових газових родовищ вступили чи вступають у пізні стадії розробки, які характеризуються закономірним інтенсивним обводнюванням свердловин і пластів. Але передчасне обводнення свердловин витіснювальною водою і пластів (обводнення, яке не пов'язане з процесом повного вироблення покладу і відбору заданої кількості газу із сховища) призводить до прогресуючого зменшення поточного дебіту нафти і газу, зниження коефіцієнта кінцевого нафтогазоконденсатовилучення із пластів і викликає великі непродуктивні витрати на видобування, транспортування, підготовляння та утилізацію супутньої води і пов'язані з нею ускладнення в роботі нафтогазопромислового обладнання (корозія, відкладання солей, утворення емульсій і тощо [1]).

Проблема обводнення нафтових, газових і газоконденсатних свердловин та експлуатації їх обводненою продукцією є надзвичайно актуальною в даний час для нафтової і газової галузі. Ми виділяємо закономірне, передчасне й аварійне обводнення газових і нафтових свердловин. Ізолювання припливу води доцільно виконувати у випадках передчасного й аварійного обводнень, оскільки такі обводнення призводять до значного зниження поточного видобутку нафти і газу та кінцевого нафтогазоконденсатовилучення та спричиняють великі економічні, екологічні, енергетичні та ресурсні втрати. У решті випадків можна тільки обмежити приплив води, оскільки ізолювати її повністю за збереження припливу газу та нафти неможливо і практичної необхідності в цьому немає. Вирішення проблеми запобігання та усунення обводнювань є одним із напрямків ресурсо-і енергоощадного розвитку економіки держави [2].

Останнім часом як різновид поцесу обмеження передчасного припливу води розроблено новий напрям регіонального (міжсвердловинного) регулювання фільтраційних потоків у продуктивному пласті, переміщення флюїдів (у т.ч. і води) вуглеводневим пластом шляхом

створення потоковідхилювальних (потоковирівнювальних) бар'єрів керованими (із властивостями здійснювати вибірково тампонування щодо різних каналів фільтрації і підлягати дії керування) дисперсними системами у міжсвердловинних зонах пласта, на відміну від локального діяння на привибійну зону [1].

Аналіз досліджень і публікацій. Колекторам нафтових та газових родовищ і підземних сховищ газу (окрім сипких) тією чи іншою мірою характерна тріщинуватість [3]. Тріщини порівняно із порами гірських порід мають набагато більшу проникність [4]. На початкових стадіях видобування вуглеводнів вони відіграють позитивну роль, забезпечуючи великі поточні дебіти, однак пізніше виступають каналами передчасного і неконтрольованого прориву витіснювальних агентів (пластової чи запомповуваної води тощо). Для регулювання процесу видобування флюїдів і зменшення відбору витіснювальних агентів розроблено технологію (в різних модифікаціях) вибіркового і керованого тампонування тріщин за відсутності кольматації малопроникних тріщин і пор [1] із використанням суспензії дрібнодисперсних матеріалів (зерен, гранул). Рідинні тампонувальні матеріали проникають як у тріщини, так і в пори. Гранули можуть надходити тільки в такі канали (високопроникні тріщини), котрі відповідають геометричному (структурному) критерію. [1]. Необхідний фракційний склад тампонажних (ізоляційних) матеріалів визначається на основі імовірнісно-статистичної моделі співвідношення полірозмірного розкриття (ширини) тріщин та розмірів пор і діаметрів гранул, чим забезпечується тампонування високопроникних тріщин і відсутність кольматації решти тріщин і пор. Технологія впроваджена з високою ефективністю на ряді родовищ України [1].

Виділення невирішених питань. Для успішного проектування технології тампонування тріщин в колекторах вуглеводнів із використанням суспензії дрібнозернистих матеріалів (гранул) необхідно описати процес кольматації (наповнювання) тріщин тріщинувато-пористого середовища гранулами.

Мета роботи. Подати математичну модель кінетики кольматації тріщин гранулами, яка зводиться до раніше виведеної нами в підземній гідрогазомеханіці моделі сорбції активної домішки [4], на основі положень фізикоїдної хімії і власних та опублікованих експериментальних досліджень із гідродинаміки суспензій. А це дає змогу застосувати теорію фільтрації рідин з активними домішками (коли адсорбція описується відомими ізотермами нелінійної адсорбції Ленгмюра чи лінійної адсорбції Генрі [5]) для розв'язування задачі тампонування високопроникних тріщин тріщинувато-пористого середовища гранулами.

Висвітлення основного матеріалу. Аналізуючи результати відомих досліджень кольматації пористого середовища [6, 7, 8], процес утворення (накопичення) зернистого 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 – зворотній процес (розмивання шару потоком).

Апріорі 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 (швидкості седиментаційного 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 ω_0 – вертикальна швидкість додатньої (чи від'ємної) седиментації; ϕ – об'ємна концентрація частинок у дисперсній системі; ζ – об'ємна насиченість тріщини зернистим шаром (об'ємна частка шару в тріщині); q – об'ємна витрата суспензії (гранул і рідини) в тріщині; η_0 – висота прохідного прямокутного перерізу тріщини; δ – розкриття (ширина) тріщини.

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

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = \frac{a_1 w_0 \phi}{\eta_0} (1 - \zeta) - \frac{a_2 u_0}{\eta_0} \zeta, \quad (1)$$

де $\frac{\partial \zeta}{\partial t} = \eta_0 \frac{\partial h_{ш}}{\partial t}$;

t – час;

$h_{ш}$ – товщина зернистого шару;

a_1, a_2 – постійні дослідні коефіцієнти.

Відмітимо 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 $\zeta = \beta/(1 - m_{ш})$, де β – об'ємна насиченість трі-

щини гранулами, що вже осіли (чи спили); $m_{ш}$ – коефіцієнт пористості утвореного шару гранул.

Рівняння (1) у такому записі є також і найбільш загальним кінетичним рівнянням кольматації пористого середовища, а, як виявилось, воно може бути одержано, якщо цей процес вважати випадковим і описувати рівняннями стохастичних процесів [9].

Рівняння (1) вказує, що кольматація відбувається протягом певного проміжку часу, після якого настає рівновага за заданої концентрації ϕ гранул у суспензії, тобто описує процес кольматації в нерівноважних умовах.

Дане рівняння кінетики кольматації тріщини легко зводиться до безрозмірного вигляду:

$$\frac{\partial \pi_1}{\partial \pi_3} = a_1(1 - \pi_1) - a_2 \pi_1 \pi_2 \quad (2)$$

або

$$\frac{1}{a_1} \frac{\partial \pi_1}{\partial \pi_3} = 1 - (1 + a_3 \pi_2) \pi_1, \quad (3)$$

де

$$\pi_1 = \zeta = \frac{h_{ш}}{\eta_0}; \pi_2 = \frac{u_0}{w_0 \phi}; \pi_3 = \frac{w_0 \phi t}{\eta_0}; a_3 = \frac{a_2}{a_1}. \quad (4)$$

Величини π_1 і π_2 є симплексами відповідно геометричної і фізичної подібностей, а π_3 – критерієм гомохронності. Введення емпіричних коефіцієнтів у модель викликано феноменологічним підходом, що є звичайним у гідродинаміці в'язких рідин і суспензій [6, 11].

Згідно з початковою умовою $\pi_1 = 0$ при $\pi_3 = 0$ (або $\zeta = 0$ при $t = 0$) розв'язок лінійного рівняння (3) для елемента тріщини (зміна концентрації ϕ відбувається вздовж тріщини) набуває вигляду:

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

Стосовно до кольматації тріщини рівняння кінетики обґрунтовано експериментально [1, 11]. У ньому розкрито структуру коефіцієнтів (множників), які можуть бути названі коефіцієнтами кольматації ($a_1 w_0 / \eta$) і декольматації ($a_2 u_0 / \eta_0$), тобто обґрунтовано отриману математичну модель кінетики процесу кольматації (наповнювання) вертикальної тріщини у вигляді (1) вільнодисперсною системою, яка переміщується, коли одночасно протікають процеси намивання і розмивання кольматувального шару, добре підтверджено експериментами.

Виходячи з викладеного вище, за визначальні параметри величини взято висоту намитого шару $h_{ш}$, початкову висоту тріщини η_0 , час намивання t , швидкість руху дисперсійного середовища u_0 , добуток $w_0 \phi$. Добуток $w_0 \phi$ – це седиментаційний потік, точніше швидкість седиментаційного потоку. Швидкість седиментації w_0 характеризує в сукупності розмір твердих частинок, їх густину, коефіцієнт динамічної в'язкості і густину дисперсійного середовища та за необхідності концентрацію гранул ϕ у ньому, тобто характеризує співвідношення сил тяжіння, інерції, тертя і підйимальної сили (чи

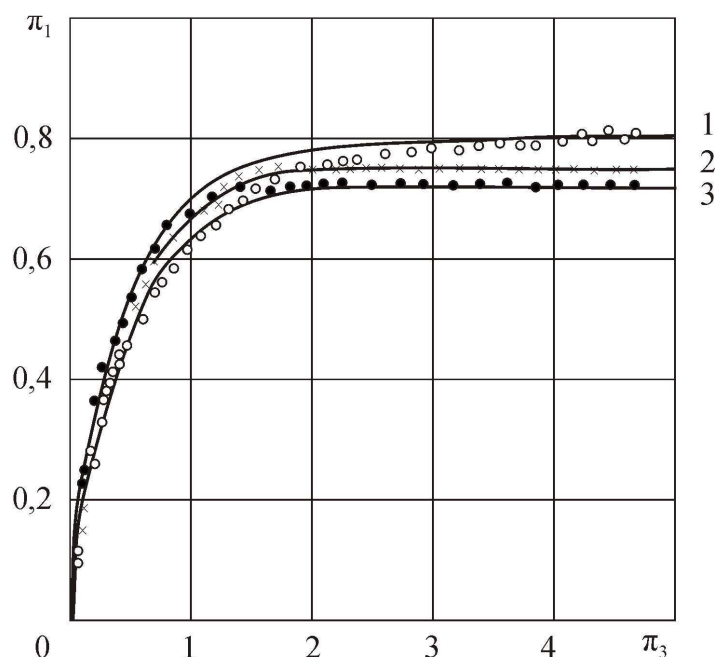


Рисунок 1 – Кінетика намивання шару дисперсної фази в тріщині за різних значень параметра π_2 : 657 (1); 922 (2); 1078 (3)

критеріїв Архімеда і Рейнольдса). Згідно з π -теоремою даний процес описано трьома безрозмірними комплексами π_1 , π_2 і π_3 у записі (1).

Планування дослідів, у виконанні яких брали участь І.М. Купер та Р.В. Грибовський, здійснювали для трифакторного експерименту, коли достатньо виконати 27 дослідів. Оскільки в ході експерименту вимірювання висоти намитого шару $h_{ш}$ і часу намивання його t не викликали труднощів, то фактична кількість дослідів була значно більшою. Дисперсна система була створена водою (водопровідною) і пом'якшувачем, котрий характеризується від'ємною седиментацією (спливанням) у воді. Швидкість седиментації w_0 для пом'якшувача розраховали як середньозважену за фракціями ($w_0 = 0,075$ м/с).

Для реалізації експериментів створили спеціальне лабораторне устаткування, яке містить модель тріщини і вузол приготування та подавання суспензії. Тріщину (щілину) змоделивали зазором між двома пластинками з металу і оргскла (висота 0,128 м, ширина $3 \cdot 10^{-3}$ м, довжина 0,95 м). Суспензію готували в ємності з механічною мішалкою. Подавання суспензії здійснювали з допомогою зануреного відцентрового електронасоса, який використовується в ультратермостатах УТ-15. На вал насоса встановили гвинт мішалки. Подавання насоса регулювали з допомогою вентиля, встановленого на лінії підведення суспензії в тріщину.

Методика проведення експерименту була такою. Спочатку систему заповнювали водою і встановлювали задану витрату рідини. Потім засипали пом'якшувач у ємність з мішалкою. Витрату суспензії вимірювали на виході з тріщини за допомогою бюретки і секундоміра. Пропомповування здійснювали за замкнутим циклом із періодичним контролюванням кон-

центрації дисперсної фази шляхом відбирання проб на виході із моделі (на залівній горловині). Концентрацію підтримували на заданому рівні ($2,1 \cdot 10^{-5}$ м³/м³) періодичним додаванням пом'якшувача. Оскільки в процесі намивання могла спостерігатися гідравлічна класифікація (розділення) гранул по фракціях у тріщині, то періодично (через кожні 20 хвилин намивання) здійснювали повну заміну суспензії. Тиск пропомповування контролювали за допомогою манометра.

Перенесення гранул і намивання шару спостерігали візуально, а розміри шару (товщину і довжину) встановлювали з допомогою шкал, котрі нанесені на прозору стінку тріщини.

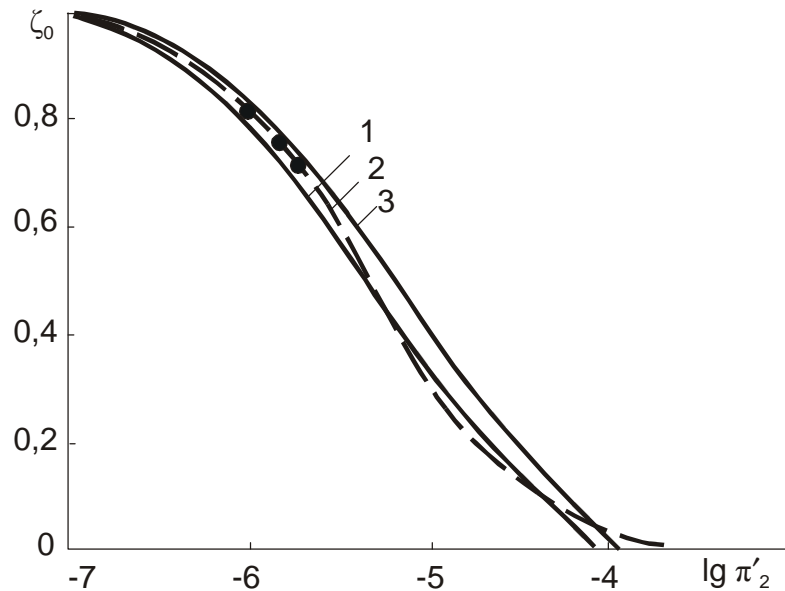
Результати дослідів з намивання шару пом'якшувача у вертикальній тріщині відображено на рис. 1.

Математичну залежність, яка описує результати експериментів, ми одержали на основі диференціального рівняння кінетики кольматції тріщини (1). Розв'язок його стосовно до моделювання, коли $q = \text{const}$, $\delta = \text{const}$, $\varphi = \text{const}$, за умови $\zeta = 0$ і $t = 0$ має вигляд (5).

Адекватність отриманого рівняння підтверджено критерієм Фішера при рівні значущості 0,05 і числі ступенів свободи 3.

У результаті апроксимації експериментальних ліній знайдено: $a_1 = 1,84$, $a_3 = 3,9 \cdot 10^{-4}$, $a_2 = 7,2 \cdot 10^{-4}$.

Модель 5 ми доповнили на основі опублікованих в літературі експериментальних досліджень із заповнення (закріплення) вертикальних тріщин піском, котрий характеризується додатньою седиментацією у воді (осідання), які стосовно до гідророзриву продуктивного пласта виконано в роботах [8, 12, 13], а залежність процесу намивання шару подано від гідравлічної потужності потоку [13] (добуток витрати і



1 – 0,002-0,004; 2 – 0,00209; 3 – 0,004-0,006.

(Суцільні лінії перенесено із роботи [12] з експериментального вивчення закріплення вертикальної тріщини піском; пунктирну лінію побудовано згідно із рівнянням (5), вона включає експериментальні точки стосовно до пом'якшувача за рівноважних умов)

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

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” [12] (переклад наш). Результати цих дослідів подаються для критичних (тобто рівноважних) умов у безрозмірних величинах (у наших позначеннях):

$$\pi_{1кр} = \frac{h_{кр}}{\eta_0}; \pi'_2 = \frac{Q_p \mu_p}{\Delta \rho g \delta \eta_0^3}; \varphi; \pi_4 = \frac{d}{\delta}, \quad (6)$$

де 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;

d – середній ефективний діаметр зерен піску.

Комплекс π'_2 ми перетворили до вигляду:

$$\begin{aligned} \pi'_2 &= \frac{Q(1-\varphi)}{\delta \eta_0} \frac{d^2}{\frac{g d^2 \Delta \rho}{18 \mu_p} \cdot 18 \eta_0^2} = \frac{u_0(1-\varphi)}{w_0(1-\varphi)^{-n}} \frac{d^2}{18 \eta_0^2} = \\ &= \frac{u_0}{w_0} \frac{d^2(1-\varphi)^{n+1}}{18 \eta_0^2} = \pi_2 \frac{d^2 \varphi(1-\varphi)^{n+1}}{18 \eta_0^2}, \end{aligned} \quad (7)$$

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 (одиначної частинки);

n – показник степені за П.В. Лященком, що враховує стиснене осідання частинок (за даними різних авторів у залежності від режиму обтікання частинок рідиною величина n змінюється в межах 2,25-4,8).

У роботах [8, 12, 13] введено також параметр $\pi_4 = d / \delta$, а ми припускали, що $d \ll \delta$. Введемо в нашу модель параметр π_4 . Аналізуючи рис. 2 і 3 роботи [12] із урахуванням роботи [13], приходимо до висновку, що задовільне співпадання ліній для різних π_4 за однакових значин φ досягається, якщо значину параметра π'_2 із рис. 3 помножити на π_4' / π_4'' і лінії перенести на рис. 2, де π_4' і π_4'' – значини симплексу π_4 , які дорівнюють відповідно 0,1565 (для рис. 2) і 0,0745 (для рис. 3). Це дало змогу нам записати уточнений параметр (симплекс структурної подібності)

$$\pi_2'' = \pi_2' \frac{0,1565 \delta}{d} \quad (8)$$

або

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

Тоді експериментальні дані [11] нами були перераховані при $n = 4$ за параметром π_2'' і перенесені на графік роботи [12]. Цей графік відтворюється на рис. 2, на який додатково нанесено пунктирну лінію, що побудована згідно з нашим рівнянням (5), перерахована в координатах роботи [12] і містить у собі експериментальні точки стосовно до пом'якшувача. Лінії 1, 2, 3 відповідають концентрації потоку, яка дорівнює 0,002-0,004; 0,0029 і 0,004-0,006. Рух тільки таких малокоцентрованих суспензій є можливим у пористих і тріщинуватих середовищах.

Звідси нами встановлено [8, 13] задовільне співпадання результатів нашої роботи з експериментальними даними робіт [7, 8], які одержано для рівноважних умов намівання піску (матеріал із додатною седиментацією), чим підтверджено кінетичну модель (5). Отже, в доповнення до відомих досліджень обґрунтовано новий симплекс структурної подібності, що враховує співвідношення діаметра частинок і розкриття тріщин. Це дало змогу досягнути задовільного співпадання наших експериментальних даних із даними робіт [8, 12, 13] при рівноважних умовах і розширити область застосування рівняння кінетики кольматації тріщин (3).

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 $h_{кр}$. 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, теоретично одержано рівняння: критична швидкість дисперсної системи в тріщині є лінійною функцією концентрації суспензії.

Ю.В.Желтов експериментально для потоку в тріщині і С.І.Кріль експериментально з теоретичним обґрунтуванням для потоку в трубі встановили, що з ростом концентрації критична швидкість збільшується [8].

Нами вперше встановлено теоретичну лінійну залежність критичної швидкості дисперсної системи в тріщині (прямокутному каналі) від концентрації суспензії.

Критичну швидкість потоку ми визначали для двох випадків, а саме за відсутності і за на-

явності шару, чим намагалися оцінити різницю сил адгезії і аутогезії. За відсутності шару в моделі мінімальна швидкість, за якої є можливим перенесення гранул без утворення шару постійної товщини, становила 0,48 м/с (концентрація суспензії $2,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{м}^3$). Коли в моделі утворився шар постійної товщини, то при трьох рівнях зміни комплексу π_2 ($u_0 = 0,10; 0,14; 0,17$ м/с) критична швидкість потоку $u_{кр}$, що розрахована за величиною витрати суспензії q , становила 0,50; 0,54 і 0,56 м/с. Це підтверджується також співвідношенням (12), яке одержано з умови постійності витрати суспензії q і показує, що критична швидкість потоку залежить від швидкості потоку u_0 за постійної концентрації суспензії і описується теретично виведеним рівнянням (9).

Із зіставлення цих експериментальних величин можна висувати, що сили аутогезії дещо переважають над силами адгезії. У цьому зв'язку вкажемо тільки на різницю молекулярно-поверхневої взаємодії частинок пом'якшувача з поверхнею тріщини в гірській породі і з металевою стінкою моделі тріщини. Тріщина в породі має еліптичну форму перерізу, тому слід вважати, що відбувається механічне затискання (защемлення) перших гранул, а подальший ріст шару відбувається під дією в основному сил аутогезії.

Рівняння (3) або (5) (в диференціальній або інтегральній формах) описує кінетику кольматації, тобто зміну 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 $\pi_3 \rightarrow \infty$ (або $t \rightarrow \infty$) настає рівновага в системі і швидкості її зміни у двох протилежних напрямках рівні 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 $\partial \zeta / dt = 0$.

Тоді для рівноважних (псевдорівноважних) умов із рівняння кінетики (1) при $\partial \zeta / dt = 0$ або із рівняння (5) при $\pi_3 \rightarrow \infty$ маємо рівняння типу рівняння ізотерми нелінійної адсорбції Ленгмюра (при граничній адсорбційній ємності, рівній одиниці):

$$\zeta(\varphi) = \frac{1}{1 + a_3 \pi_2} \quad (13)$$

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).

На цій підставі коефіцієнт $a_1 w_0 / \eta_0$ названо коефіцієнтом кольматації, а коефіцієнт $a_2 u_0 / \eta_0$ – коефіцієнтом декольматації.

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

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

де α_a набуває поняття константи Генрі [2, 4].

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 $\zeta \rightarrow 1$.

Із (5) за $\pi_3 \rightarrow \infty$ ($t \rightarrow \infty$) маємо, що критична величина насиченості тріщини зернистим шаром (об'ємна частка шару в тріщині):

$$\zeta_{кр} = (1 + a_3 \pi_2)^{-1} = \left(1 + a_3 \frac{u_0}{w_0 \varphi}\right)^{-1} = \left(1 + \frac{1}{\alpha_a \varphi}\right)^{-1}, \quad (16)$$

тобто $\zeta < 1$. А це означає, що тріщина не повністю заповнюється кольматувальним матеріалом.

У випадку використання пом'якшувача, котрий характеризується від'ємною седиментацією, критичне заповнення тріщини становить 70-75%, як це видно із рис. 1, де $\pi_1 = \zeta$.

Можна припустити, що використання суміші дисперсних матеріалів із різною седиментацією (наприклад, пом'якшувач і пісок чи, краще, гранульований магній) забезпечить повніше заповнення тріщин.

Таким чином, між процесами кольматації і адсорбції, як між двома масообмінними процесами, відмічається аналогія.

Це дало нам змогу звести процес утворення зернистого шару в тріщинах пласта до процесу адсорбції дисперсної фази з нелінійною (чи лінійною) ізотермою адсорбції.

З урахуванням експериментальних досліджень намивання гранул складний процес утворення зернистого шару в багатьох тріщинах, які характеризуються різною величиною розкриття і, як результат, різною насиченістю осілими гранулами, доцільно розглядати як процес адсорбції дисперсної фази тріщинуватим середовищем з нелінійною ізотермою, розуміючи сукупність різнорозмірних (полірозмірних) тріщин як суцільне середовище. Тоді рівняння кінетики кольматації (1) можна записати як рівняння кінетики адсорбції Ленгмюра, яке використовується при вивченні фільтрації водних розчинів активних домішок, наприклад поліакриламід, стосовно до фізико-хімічних методів підвищення нафтовилучення [4], у вигляді:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = \alpha_c (\varphi - \alpha_p \zeta), \quad (17)$$

де $\alpha_c = a_1 w_0 (1 - \zeta) / \eta_0$ – коефіцієнт швидкості адсорбції;

$\alpha_p = a_2 u_0 / [a_1 w_0 (1 - \zeta)]$ – коефіцієнт розподілу речовини (дисперсної фази), причому ці коефіцієнти в даному випадку є не постійними величинами, а функціями швидкостей і насиченості тріщин пласта зернистим шаром.

Адсорбційні процеси повинні розглядатися з урахуванням їх кінетики, тобто закономірності перебігу в часі, хоча часто впливом цього фактора нехтують і припускають миттєве настання адсорбційної рівноваги [4]. Використовуючи цей прийом, спільним розв'язуванням за умови кольматаційної рівноваги можна об'єднати рівняння руху, матеріального балансу і рівняння кінетики кольматації тріщин

Таким чином, запропонована модель кінетики кольматації вертикальних тріщин у часі підтверджена експериментами з використанням дисперсних систем як з додатньою (осідання), так і з від'ємною (спливання) седиментацією. Вона дає змогу звести складний процес кольматації 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 задачі тампонування каналів проривання води до свердловин.

Висновки. Одним із напрямків ресурсо- і енергоощадного розвитку економіки держави, підвищення ефективності видобування нафти і газу та роботи підземних сховищ газу є вирішення актуальної проблеми запобігання та усунення обводнювань свердловин. В останній час як різновид процесу обмеження припливу води і усунення передчасного обводнювання свердловин на родовищах вуглеводнів і підземних сховищах газу розроблено новий напрям регіонального (міжсвердловинного) регулювання фільтраційних потоків за технологією тампонування високопроникних тріщин у колекторах вуглеводнів із використанням суспензії дрібнодисперсних матеріалів (гранул). Для успішного проектування цієї технології необхідно описати процес кольматації (наповнювання) тріщин тріщинувато-пористого середовища гранулами. У даній роботі розроблено математичну модель кінетики (зміни величини наповнювання в часі) кольматації тріщин гранулами на основі положень фізикоїдної хімії і власних та опублікованих експериментальних досліджень із гідродинаміки суспензій. Модель записана у вигляді диференціального рівняння кінетики як сумарний результат двох явищ – кольматації і докольматації. Рівняння зведено до безрозмірного вигляду як залежності симплексів геометричної і фізичної подібності та критерію гомохронності. Стосовно до кольматації тріщин пом'якшувачем, котрий характеризується від'ємною седиментацією у воді, рівняння обґрунтовано власними експериментами,

визначено введені в модель емпіричні коефіцієнти, що є звичайним підходом у гідродинаміці суспензій. Тріщину (щілину) змоделивали зазором між двома пластинками з металу і оргскла. Перенесення гранул пом'якшувача і намівання шару спостерігали візуально, а розміри шару встановлювали з допомогою шкал. Адекватність розв'язку диференціального рівняння і експериментальних даних підтверджено критерієм Фішера. Модель доповнили на основі опублікованих у літературі експериментальних досліджень із заповнення тріщин піском, котрий характеризується додатною седиментацією у воді, для критичних (рівноважних) умов, при цьому в модель ще введено і обгрунтовано новий симплекс структурної подібності. Отримано задовільне співпадання результатів за обома серіями експериментів. Вперше встановлено теоретичну лінійну залежність критичної швидкості дисперсної системи в тріщині (прямокутному каналі) від концентрації суспензії. Виявлено, що сили аутогезії дещо переважають сили адгезії. Із рівняння кінетики отримано рівняння типу рівняння ізотерми нелінійної адсорбції Ленгмюра (при граничній адсорбційній ємності, рівній одиниці), яке за малих концентрацій гранул у суспензії зводиться до рівняння ізотерми лінійної адсорбції Генрі. Виведено рівняння критичної насиченої тріщини зернистим шаром (у випадку пом'якшувача вона становить 70-75%). Доцільним є дослідження кольмататії сумішею матеріалів із різною седиментацією. Розглядаючи тріщинуваті середовище із різнорозмірними тріщинами як суцільне середовище, рівняння кінетики адсорбції Ленгмюра у вигляді, який використовується при вивченні фільтрації водних розчинів активних домішок, а це уможливує застосувати відому теорію фільтрації рідин із активними домішками до тампонування тріщин тріщинуватого-пористого середовища гранулами, об'єднавши рівняння руху, матеріального балансу і кінетики кольмататії тріщин. Модель може бути застосована і для опису інших фізично подібних процесів.

Література

- 1 Обводнення газових і нафтових свердловин. У 3-х томах. за ред. В.С. Бойка / Бойко В.С., Бойко Р.В., Кеба Л.М., Семінський О.В. – Київ: Міжнародна економічна фундація, 2007. – 772 с. – Том 2. Створення потоковідхилювальних бар'єрів і технології ізоляції.
- 2 Желтов Ю.П. Разработка нефтяных месторождений / Ю.П. Желтов/ – Москва: Недра, 1986. – 332с.
- 3 Голф-Рахт Т.Д. Основы нефтепромышленной геологии и разработки трещиноватых коллекторов: пер. с англ; под ред. А.Г. Ковалева, Т.Д. Голф-Рахт – Москва: Недра, 1986. – 608 с.
- 4 Бойко В.С., Підземна гідрогазомеханіка / В.С. Бойко, Р.В. Бойко: – Львів: Априорі, 2005. – 452 с.
- 5 Фролов Ю.Г. Курс коллоидной химии. Поверхностные явления и дисперсные системы / Ю.Г. Фролов – Москва: Химия. 1962. – 400 с.

6 Минц Д.М. Теоретические основы технологии очистки воды / Д.М. Минц. – Москва: Изд. Лит по по стр.-ву, 1964. – 156 с.

7 Макрокинетика процессов в пористых средах / Ю.А. Чизмаджаев, В.Г. Маркин, М.Ф. Тарасевич, Ю.Г. Чирков. – Москва: Наука, 1971. – 364 с.

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

9 Желтов Ю.В. Закрепление вертикальных трещин, образованных при гидравлическом разрыве пласта // Новости нефтяной и газовой техники. Нефтепромышленное дело: Сб. статей. – 1961. – №4. – С. 17-19.

10 Litwiniszyn J. On some mathematical models of the suspension flow in porous medium // Chemical Engineering Science. – 1967. – Vol. 22. – P. 1315-1324.

11 Элементы гидравлики смесей / Файзуллаев Д.Ф., Гурбанов Р.С., Расизаде Я.М. – Ташкент: ФАН, 1970. – 376 с.

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

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

*Стаття надійшла до редакційної колегії
14.02.13*

*Рекомендована до друку
професором **Тарком Я.Б.**
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)
професором **Зезекалом І.Г.***

(ГО «Спілка наукових та інженерно-технічних фахівців «Прометей», м. Полтава)