

Техніка і технології

УДК 622.276.1/6

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ВИКОРИСТАННЯ КЕРОВАНИХ ДИСПЕРСНИХ СИСТЕМ ДЛЯ СТВОРЕННЯ ПОТОВОКВІДХИЛЮВАЛЬНИХ БАР'ЄРІВ У МІЖСВЕРДЛОВИННИХ ЗОНАХ ПОКЛАДУ: ГІДРОМЕХАНІЧНІ ЗАСАДИ І ТЕОРЕТИКО-ІМОВІРНІСНЕ ОБГРУНТУВАННЯ (частина 1)

В.С. Бойко¹, Р.В. Бойко², Р.В. Грибовський¹, В.М. Юрчишин¹, Р.Ф. Лагуш¹, Т.М. Пастухова¹

¹ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 994196, e-mail: public@nung.edu.ua

²ГПУ „Львівгазвидобування” ДК „Укргазвидобування”, 79026, м. Львів, вул. І. Рубчака, 27, тел. 8(0322) 233664, e-mail: R Boyko@LGV.com.ua

Разработано научную идею создания новых способов тампонирования высокопроводных трещин на расстоянии от скважины в глубине пласта (в межскважинных зонах). Обобщено теоретические основы таких способов

There have been elaborated the scientific idea of creation the new methods plugging high-conductanted cracks distanced from well in the bed depth (in crosshole zones). The theoretical bases of such methods are summarized.

У розвинутих країнах світу домінантою в розвитку енергетики є ресурсозбереження, точніше ресурсоощадність, як на стадіях видобування енергоресурсів і виробництва енергії, так і споживання. У нафтовидобувній галузі на сьогоднішній день найбільш ефективною технологією є заводнення нафтових родовищ попри відомі його негативні наслідки [1], зокрема передчасне некероване і швидкоплинне обводнювання видобувних свердловин через складність геологічної будови покладів (неоднорідність, тріщинуватість, розчленованість і переривчастість тощо), яке спричиняє безповоротне залишення нафти в покладі (у вигляді великооб'ємних „ціликів”), істотне зниження поточного видобутку (дебітів) нафти, великі енергетичні, ресурсні, економічні і екологічні втрати [2]. Досягнуте нафтовилучення у разі заводнення родовищ, колекторам яких притаманна тріщинуватість (а це понад половини світового видобутку нафти із них і близько 60% покладів вуглеводнів), є на 25-30% нижчим порівняно із пористими колекторами. Одним із авторів сформульовано гіпотезу, розроблено наукову ідею створення нових способів тампонування (закупорювання) високопровідних тріщин на відстані від свердловин у глибині пласта (у міжсвер-

дловинних зонах) і технологічного оформлення їх [2]. Тут обгрунтовано теоретичні основи таких способів.

Тріщинуваті колектори являють собою гірську породу, що розсічена системами тріщин на порізнені, відокремлені об'єми – блоки матриці (або просто матриці). Макротріщини (розкриття умовно понад 100 мкм) вибірково поширюються паралельно по густішій сітці мікротріщин і складають з ними єдину систему (в основному дві системи приблизно перпендикулярних вертикальних або близьких до них похилих тріщин). Система тріщин може бути регулярною або нерегулярною (хаотичною) і представлена в основному вертикальними тріщинами (рис. 1). Якщо густота мікротріщин змінюється від 10 до 1000 м⁻¹, що рівнозначно відстані між мікротріщинами (величина, обернена густоті) від 0,1 до 0,01 м, то густота макротріщин змінюється в основному від 1,0 до 10 м⁻¹ за відстані між макротріщинами від 1,0 до 0,1 м [3]. Часто переважає одна система з чітко вираженим напрямом (анізотропія тріщинуватості), що можна зобразити її як і „розу вітрів”. Характерний лінійний розмір блоків дорівнює оберненій величині густоти тріщин. Канали фільтрації в матриці представлені спектром пор різного по-

перечного розміру із середньою значиною близько 10-20 мкм, причому кожна пора вздовж простягання з'єднується з іншими такими ж порами в безлічі точок і в кожній із них чергуються звуження та розширення. Дослідники за даними різних досліджень і прямих вимірювань вважають, що в надрах на глибинах залягання покладів понад 2000 м розкриття мікротріщин у гірських породах становить 10-15 мкм, а розкриття макротріщин може сягати 1-2 мм і більше, іноді до кількох сантиметрів. Розрізняємо коефіцієнти проникності тріщин k'_1 (кожної тріщини зокрема), пор k'_2 (аналогічно), тріщинної k_1 (сукупності тріщин) і порової k_2 (сукупності пор чи, інакше, блоків матриці), причому коефіцієнт проникності тріщинувато-пористого середовища (пласта) $k = k_1 + k_2$. Аналіз свідчить, наприклад, для умов Долинського нафтового родовища, що $k'_1 \approx 1285 k'_2 \approx 1285 k_2$, а $k_1 \approx 3,2 k'_2 \approx 3,2 k_2$, тобто тріщинна проникність може бути зіставимою більшою чи меншою мірою з поровою проникністю, а проникність тріщин – у сотні разів більша від порової проникності [3]. Тому, безперечно, такі тріщини є шляхами передчасного проривання води до видобувних (нафтових, газових) свердловин і обводнювання їх продукції.

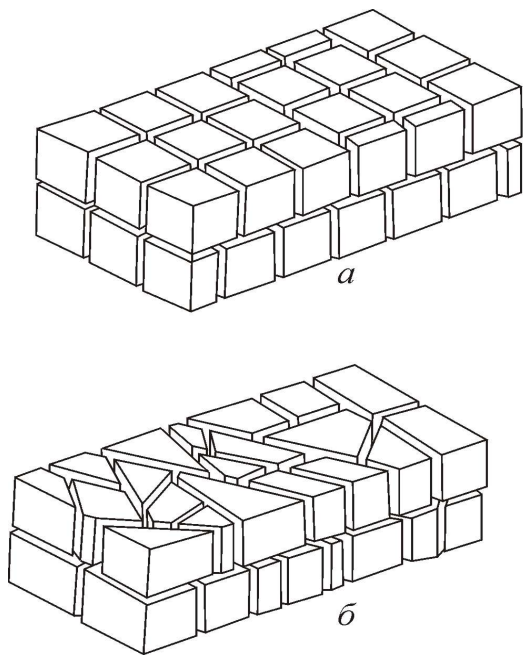


Рисунок 1 – Схеми елементів тріщинуватого пласта з регулярною (а) і нерегулярною (б) системами тріщин

Наукова ідея полягає в тому, що з метою зменшення об'ємів супутно видобутої води, усунення (ліквідації) чи недопущення передчасних проривань води, підвищення ефективності розробки родовищ з тріщинувато-пористими чи тріщинними колекторами необхідно забезпечити вирівнювання проникностей тріщин (шляхом зменшення) і порової (звичайно, шляхом збільшення). На сьогоднішній день придатним

до практичної реалізації (звичайно, в межах усього пласта, а не локально в привибійних зонах) і, мабуть, економічно виправданим є перший шлях. Отже, одним із шляхів вирішення такої проблеми є створення способів і технологій, які дали б змогу повністю чи частково виключити високопровідні (окрім низькопровідних) тріщини з процесу фільтрації [2], тобто забезпечити тампонування високопровідних тріщин (нижньою межею для них можна брати умову рівності коефіцієнтів проникності тріщин і порової проникності).

На основі вивчення робіт в областях ізоляції припливу пластових вод, регулювання профілю приймальності, селективного діяння на привибійну зону, боротьби з поглинанням у ході буріння свердловин, підтримування пластового тиску запомповуванням стічних вод (з механічними домішками) і вирівнювання швидкостей переміщення водонафтового контакту створенням потоковирівнювальних бар'єрів у глибині пласта ми прийшли до твердого переконання і сформулювали новий науковий напрям [2]. Суть його полягає в тому, що для регулювання процесу витіснення нафти з тріщинуватих колекторів, збільшення охоплення пласта заводненням та нафтовилучення, зменшення відборів води найбільш ефективним є використання дисперсних систем, переважно суспензій, тобто грубодисперсних систем з твердою дисперсною фазою (частинки розміром понад 0,01 мм) і рідинним дисперсійним середовищем. Як дисперсійне середовище суспензій можуть бути використані вода, вуглеводневі рідини, емульсії, розчини різних (наприклад, які вже використовувалися в нафтовидобуванні) речовин (ПАР, полімери, луѓи, кислоти та ін.).

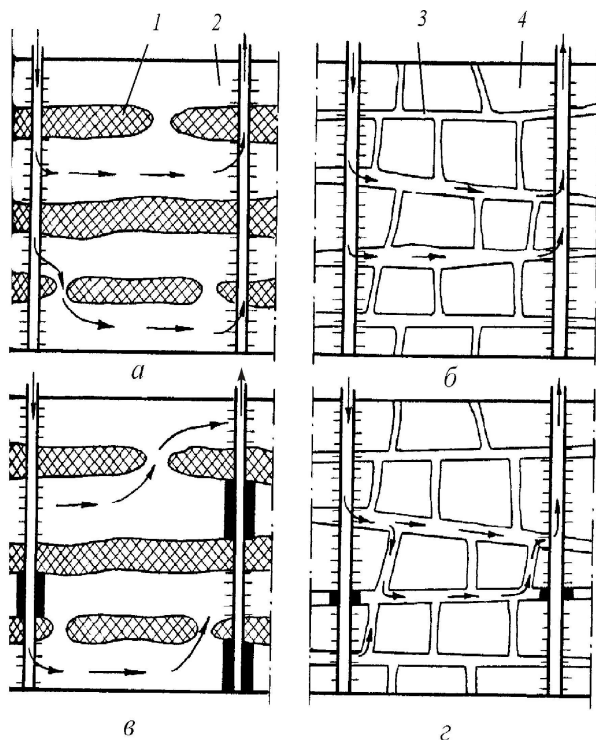
Фізично і гідродинамічно обґрунтованим для тампонування тільки високопровідних (з великим поперечним розкриттям, чи шириною) тріщин може бути використання виключно дисперсних систем.

Тампонування високопровідних каналів за відсутності тампонування решти каналів можливе в разі надходження тампонажного матеріалу тільки у високопроникні канали. Природне розділення можуть здійснювати в пласті самі тріщини. Рідинні тампонажні матеріали надходять у будь-які канали (пори, тріщини) пропорційно їх поперечним розмірам і відповідно проникностям. А дисперсні (гранульовані) матеріали (суспензії) можуть надходити тільки в такі канали, поперечний розмір яких є більшим розмірів їх гранул (частинок). У цьому полягає одна з переваг гранульованих тампонажних матеріалів, вибраних нами, порівняно з рідинними, які пізніше можуть утворювати гелі, емульсії, осади або тверде тіло.

Із позицій поставленої мети слід розрізняти *два принципових підходи до розв'язування проблеми тампонування тріщин*, а саме: а) локальне діяння на привибійну зону пласта; б) створення потоковідхилювальних бар'єрів на відстані від свердловин у глибині пласта (регіонально у міжсвердловинних зонах).

Технології локального діяння на привибійну зону пласта для регулювання потоків і зменшення відборів води стосовно до тріщинуватих колекторів розробляються багатьма авторами, у тому числі й нами, протягом останніх 25-30 років. Роботи виконуються в напрямку створення способів ізоляції припливу води у видобувних свердловинах, регулювання профілю приймальності води в нагнітальних свердловинах і тимчасового тампонування окремих високопроникних інтервалів і тріщин у процесі оброблення привибійної зони, наприклад, солянокислотним розчином. Їх аналіз міститься у низці монографій і оглядів [4].

Роботи в нагнітальних свердловинах вважаються ефективними, якщо вдалося зменшити надходження води в один вузький інтервал пласта і забезпечити або збільшити надходження її в інші інтервали. Ефективність робіт у видобувних свердловинах характеризується величиною додаткового видобутку нафти (поточного і накопиченого), зменшенням відбору води і тривалістю технологічного ефекту. Під час розглядання рис. 2 можна прийти до висновку, що з урахуванням шаруватої лінзоподібної будови і тріщинуватості пластів величина додаткового видобутку нафти і тривалість ефекту залежать від таких чинників: 1) розміру об'єму пласта, який охоплено розробкою; 2) величини обводненості продукції до ізоляції води.



1 – непроникні лінзи; 2 – проникні пласти;
3 – тріщини; 4 – блоки

Рисунок 2 – Схеми витіснення нафти водою в неоднорідному (а, в) і тріщинувато-пористому (б, з) пластах до (а, б) і після (в, з) локального діяння на привибійну зону

Розмір об'єму пласта, який охоплено розробкою, може визначатися радіусом зони там-

понування (чи питомим об'ємом тампонажного матеріалу на 1 м товщини розкритого розрізу) і товщиною продуктивних відкладів. Цей розмір може збільшуватися у випадку шаруватої лінзоподібної будови пласта, оскільки після відключення одного пропластка вода почне надходити в інший через літологічне „вікно”.

Якщо пористий пласт є літологічно витриманим і розсіченим системою тріщин (літологічно однорідний тріщинувато-пористий пласт), то після тампонування тріщин (природних чи штучних) як водопровідних каналів вода гідродинамічно буде витіснити нафту з матриць породи. У цьому випадку порівняно з шаруватим лінзоподібним пластом величина обводненості відіграє більш значну роль. Якщо процес капілярного просочування блоків навколо обробленої свердловини закінчується (див. рис. 2), то істотної ефективності оброблення не слід очікувати (як за додатковим видобутком нафти, так і за тривалістю).

У шаруватому тріщинувато-пористому пласті перерозподіл потоків води в матриці та інші пропластки визначить ефективність водоізоляційних робіт. В умовах різотріщинуватості чисто тріщинного та тріщинувато-пористого пластів ефективність робіт залежить від співвідношення відкритих і затампонованих тріщин.

Отже, можна зробити висновок, що з метою регулювання процесу заводнення і зменшення відборів води діяння слід піддавати пласт загалом, а не тільки привибійну зону, тобто тампонувати високопроникні канали в глибині пласта (регіонально) між нагнітальною і видобувними свердловинами (в міжсвердловинних зонах) запомповуванням великих об'ємів тампонувальних матеріалів.

Разом з тим, вважаємо, що способи локального діяння на привибійну зону пласта за умови обґрунтовано організованої технології також мають підстави для застосування. Вони дають змогу розв'язувати поточні завдання – задачі інтенсифікації видобування нафти з неосвоєних інтервалів пласта, відключення контурної і підшовної вод тощо. Багатьма авторами переконливо доведено, що в умовах розчленованого неоднорідного пласта діяння на привибійну зону, яке сприяє відновленню проникності і в ході цього не створює додаткових зон неоднорідності, забезпечує підвищення нафтовилучення [2]. Такий же висновок впливає з розглядання рис. 2.

Звідси приходимо до висновку, що роль цих методів діяння на привибійну зону в ході розв'язування задач раціональної розробки нафтових родовищ у даний час підвищується. У цьому випадку, враховуючи наявність зон і шарів різної проникності, різний ступінь тріщинуватості порід по площі і продуктивному розрізу, нами давно сформульовано висновок [2], що планування оброблянь привибійних зон (інтенсифікація та ізоляція припливу) необхідно здійснювати з позицій системного підходу до вибору об'єктів і технологій за схемою „поклад – зона покладу – продуктивний пропласток – пу-

стотний простір колектора – технологія – елементи технології (модифікації, реагенти)”, розглядаючи ці оброблення як ефективні методи регулювання процесу розробки родовищ з метою інтенсифікації поточного видобування нафти і газу і збільшення кінцевого нафтогазовидобутку.

Оскільки пористі і тріщинуваті пласти є зв'язанодисперсною системою, то маємо задачу вивчення взаємодії вільнодисперсної системи (наприклад, суспензії) зі зв'язанодисперсною системою, розв'язку якої з належним теоретичним обґрунтуванням у доступній нам літературі не виявлено. Звідси запропоновано ймовірно-статистичну модель надходження твердої полідисперсної фази суспензії в тріщинувато-пористі середовища і повноти кольматації каналів (тріщин) заданого розміру твердою фазою з урахуванням статистичних розподілів діаметрів частинок твердої фази і пор та розкриття тріщин. Оскільки речовини можуть бути дисперговані різною мірою, аж до молекулярного рівня, то цей розв'язок можна легко поширити на високопроникні пори пористого середовища, наприклад, стосовно до запомповування водного розчину полімеру, точніше, дисперсії полімеру в пористе середовище. Його можна застосовувати до багатьох процесів, пов'язаних з фільтруванням і фільтрацією.

Априорі зрозуміло, що дисперсна фаза може надходити тільки в такі канали, поперечний розмір яких є більшим розміру її частинок. Стосовно до кольматації (тампонування) тріщин тріщинувато-пористого середовища основною вимогою є відповідність дисперсної системи *геометричному критерію проникання дисперсної фази* в тріщини і відсутності кольматації пор блоків матриць. Якщо поставити жорстку вимогу відсутності кольматації пор, то відповідний геометричний критерій можна записати так:

$$d_{\min} > d_{\text{п max}} \quad (1)$$

або

$$d_{\min} > D_{\max} / a_y, \quad (2)$$

де: d_{\min} , $d_{\text{п max}}$, D_{\max} – мінімальний і максимальний діаметри відповідно частинок тампонувального матеріалу (суспензії), пор і скелетних зерен блоків матриці; a_y – коефіцієнт перерахунку від розмірів скелетних зерен до розмірів пор із урахуванням ущільнення (для фіктивного ґрунту дорівнює 2,4-6,4).

Але явище кольматації має ймовірнісний характер, а діаметри порових каналів і діаметри частинок тампонувального матеріалу, як випадкові величини, підлягають певним законам статистичного розподілу.

Враховуючи ймовірнісний характер розглядуваного явища, вважаємо більш обґрунтованою ймовірно-статистичну модель тампонування, що дає трактування геометричного критерію в розширеному розумінні з позицій надійності (або інакше вибірковості) і повноти тампонування високопроникних каналів з ура-

хуванням щільностей статистичного розподілу розмірів дисперсних частинок, пор і тріщин.

Під *надійністю тампонування* розуміємо відсутність кольматації пор та малопроникних тріщин і проникання дисперсної фази тільки у високопроникні тріщини. Оскільки діаметри порових каналів і діаметри частинок кольматувального матеріалу як випадкові величини є незалежними, то щільність розподілу їх системи дорівнює добутку щільностей розподілу кожної величини, яка входить до системи [5]. Тоді ймовірність порушення умови (2) запишемо так:

$$F_{\text{п}}(d' > d'_{\text{п}}) = \int_{-\infty}^{d' + \infty} \int_{-\infty}^{d'_{\text{п}} + \infty} f_1(d) f_2(d_{\text{п}}) dd \cdot dd_{\text{п}} = \\ = F_1(d') [1 - F_2(d'_{\text{п}})], \quad (3)$$

де: $f_1(d)$, $f_2(d_{\text{п}})$, $F_1(d)$, $F_2(d_{\text{п}})$ – щільності і функції розподілів діаметрів частинок (d) і пор ($d_{\text{п}}$); d' , $d'_{\text{п}}$ – діаметри частинок і пор, які отримують в окремих випадках відповідно мінімальну (d_{\min}) і максимальну (d_{\max}) значини (рис. 3), а взагалі $d'_{\text{п}}$ – найбільший діаметр пор, кольматація яких не допускається. При запису (3) взяли до уваги, що функції розподілів за мінус і плюс нескінченностей рівні відповідно нулю та одиниці, а також з позиції спільності подання рівнянь умовно припускали зміну фізичних розмірів частинок і пор у межах нескінченності.

Надійність відсутності кольматації пор визначаємо як ймовірність відповідної події з урахуванням (3) за формулою

$$P_{\text{п}}(d' > d'_{\text{п}}) = 1 - F_1(d') [1 - F_2(d'_{\text{п}})]. \quad (4)$$

З іншого боку частинки дисперсної фази повинні проникати в тріщини. Критерій проникання запишемо у вигляді:

$$d_{\max} < D_{\max} / a_c, \quad (5)$$

де: d_{\max} , δ_{\max} – максимальні розміри діаметра частинок дисперсної фази і розкриття тріщин пласта; a_c – коефіцієнт, що характеризує повноту врахування можливості аркоутворення (склепноутворення) частинок біля входу в тріщину, заклинювання одних частинок іншими в тріщині, ступінь окатаності (округлості) частинок і розмах статистичного розподілу діаметра частинок (його значину стосовно до гідрорзриву пласта і щільних фільтрів дослідники рекомендують брати рівною 1-3). З позицій ймовірно-статистичного підходу *надійність проникнення частинок у тріщини*, розширюючи критерій (5), аналогічно запишемо у вигляді:

$$P_{\text{тр}} \left(d'' < \frac{D''}{a_c} \right) = 1 - F_{\text{тр}} \left(d'' < \frac{D''}{a_c} \right) = \\ = 1 - \int_{d''}^{+\infty} f_1(d) dd \int_{D''/a_c}^{+\infty} f_3 \left(\frac{D}{a_c} \right) d \left(\frac{D}{a_c} \right) = \quad (6) \\ = 1 - [1 - F_1(d'')] \left[1 - F_3 \left(\frac{D''}{a_c} \right) \right],$$

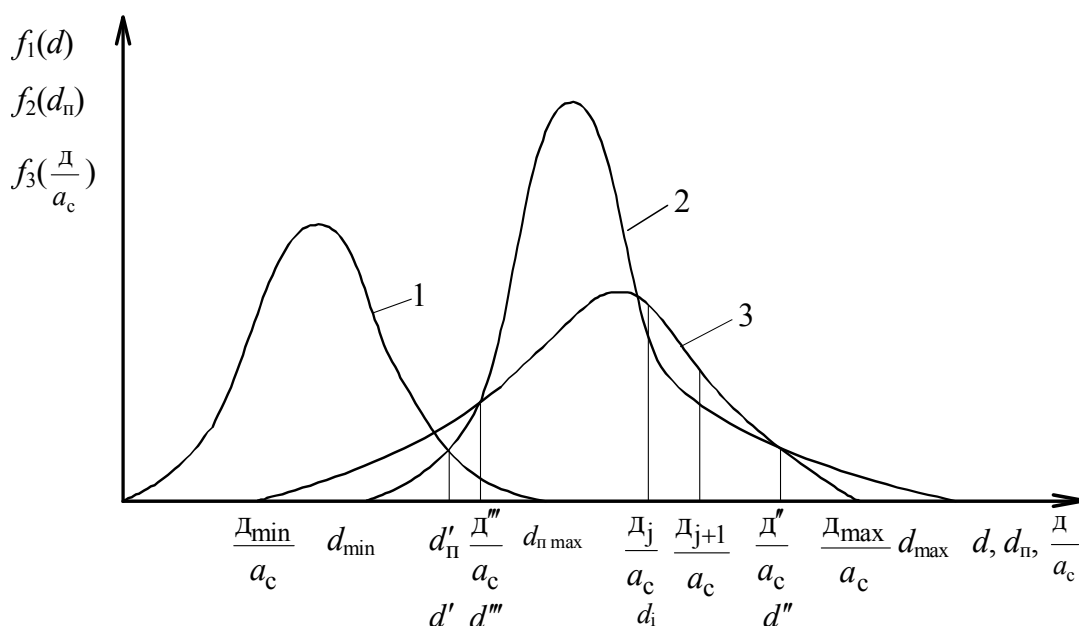


Рисунок 3 – Щільності розподілів (m^{-1}) діаметра пор $d_{п}$ в м (1), діаметра частинок кольматувального матеріалу d в м (2) і відношення розкриття тріщин δ в м до безрозмірного коефіцієнта a_c (3)

де: $f_3\left(\frac{D}{a_c}\right)$, $F_3\left(\frac{D}{a_c}\right)$, $F_{T1}\left(d'' < \frac{D''}{a_c}\right)$ – щільність і функція розподілу величини δ/a_c та ймовірність відсутності проникнення частинок у тріщини; d'' – діаметр частинок, що дорівнює величині δ''/a_c , причому d'' і δ'' кожний окремо або разом можуть бути найбільшими величинами d і δ .

Але частинки не повинні проникати в малопроникні тріщини. *Надійність відсутності кольматзації малопроникних тріщин* тоді подаємо так:

$$\begin{aligned} P_{T2}\left(d''' < \frac{D'''}{a_c}\right) &= 1 - F_{T2}\left(d''' < \frac{D'''}{a_c}\right) = \\ &= 1 - F_1(d) \Big|_{-\infty}^{d'''} \cdot F_3\left(\frac{D}{a_c}\right) \Big|_{-\infty}^{D/a_c} = \\ &= 1 - F_1(d''') F_3\left(\frac{D'''}{a_c}\right), \end{aligned} \quad (7)$$

де: $F_{T2}\left(d''' < \frac{D'''}{a_c}\right)$ – ймовірність відсутності проникнення частинок у малопроникні тріщини; d''' – найбільше розкриття тріщин, кольматация яких не допускається (межа між мало- і високопроникними тріщинами); d''' – діаметр частинок дисперсної фази, що дорівнює величині δ'''/a_c .

Оскільки відсутність кольматзації пор та малопроникних тріщин і проникання частинок у тріщини є незалежними подіями [5], то вводимо поняття *надійності вибіркового тампонування* (або *коефіцієнта коректування проникностей тріщин і пор*) як добуток цих ймовірностей згідно з (4), (6) і (7), тобто

$$P_{кп} = P_{п}(d' > d'_п) \cdot P_{T1}\left(d'' < \frac{D''}{a_c}\right) \cdot P_{T2}\left(d''' < \frac{D'''}{a_c}\right). \quad (8)$$

З другого боку процес створення потоковідхилювальних бар'єрів у тріщинувато-пористому пласті слід охарактеризувати повнотою тампонування тріщин відповідного розміру. Якщо тріщини певного розміру повністю заповнені дисперсними частинками тампонажного матеріалу і в них утворився непроникний шар цих частинок, то бар'єр, зрозуміло, буде потоковідхилювальним, а в ідеальному випадку, коли коефіцієнт проникності тріщин, які містять деяку кількість дисперсних частинок, стане рівним коефіцієнту проникності матриць породи (коефіцієнту проникності пор), бар'єр буде потоковирівнювальним.

Під *повнотою тампонування каналів* розуміємо ступінь заповнення високопроникних тріщин кольматувальними частинками. Для її визначення обчислимо спочатку ймовірність надходження частини дисперсної фази певного діаметра в тріщини відповідного розміру (такого ж розміру з урахуванням коефіцієнта a_c і більшого). Ця задача рівносильна визначенню ймовірності попадання випадкової точки (d , δ/a_c) у прямокутне поле R зі сторонами, паралельними головним осям розсіювання, оскільки величини є незалежними [5]. Тоді ймовірність попадання випадкової точки (d , δ''/a_c) у прямокутне поле R запишемо так:

$$\begin{aligned} P_{ij}((d, \delta/a_c) \in R) &= \\ &= \int_{d_i}^{d_{i+1}} \int_{\delta_j/a_c}^{\delta_{j+1}/a_c} f_1(d) f_3\left(\frac{D}{a_c}\right) dd \cdot d\left(\frac{D}{a_c}\right) = \\ &= [F_1(d_{i+1}) - F_1(d_i)] \left[F_3\left(\frac{D_{j+1}}{a_c}\right) - F_3\left(\frac{D_j}{a_c}\right) \right], \end{aligned} \quad (9)$$

де: $d_i, d_{i+1}, \delta_j/a_c, \delta_{j+1}/a_c$ – координати вершин прямокутника R на площині $d - \delta/a_c$. У геометричній інтерпретації функції розподілу являють собою площі під відповідними кривими від мінус нескінченності до заданого лінійного розміру, що спрощує практичне обчислення шуканої ймовірності.

Розбиваємо відрізки зміни d і δ/a_c на інтервали, надаючи їм відповідно біжучі номери i і j . Тоді частки об'ємів частинок (V_i) і тріщин (V_j) для цих інтервалів запишемо відношеннями:

$$V_i = \frac{\int_{-\infty}^{d_{i+1}} d^3 f_1(d) dd}{\int_{-\infty}^{+\infty} d^3 f_1(d) dd}; \quad V_j = \frac{\int_{-\infty}^{\delta_{j+1}} d f_4(d) dd}{\int_{-\infty}^{+\infty} d f_4(d) dd}. \quad (10)$$

Звідси повноту тампонування тріщин в інтервалі j частинками з інтервалу i та тампонування тріщин в інтервалі j частинками різного розміру (всіх інтервалів N) за дотримання умови надходження їх у тріщини даного інтервалу характеризуємо з урахуванням (9) і (10) частковим (α_{ij}) і загальним (α_j) коефіцієнтами тампонування тріщин відповідно:

$$\alpha_{ij} = \frac{(1 - m_n) V_T V_i P_{ij}}{(1 - m_{ш}) V_{TP} V_j}; \quad (11)$$

$$\alpha_j = \frac{(1 - m_n) V_T}{(1 - m_{ш}) V_{TP} V_j} \sum_{i=0}^N V_i P_{ij} \left| d_i < \frac{\delta_j}{a_c} \right.$$

де: $d_i < \frac{\delta_j}{a_c}$; V_T, V_{TP} – насипний об'єм тампонувальних частинок (дисперсної фази) і об'єм тріщин пласта в зоні тампонування; $m_n, m_{ш}$ – коефіцієнти пористості насипного об'єму частинок і їх шару в тріщинах; N – кількість інтервалів розбиття відрізка зміни діаметра частинок d .

Запропоновані залежності дають змогу визначати надійність вибіркового (апріорі заданого) тампонування $P_{кп}$ за (8) і повноту тампонування тріщин α_j за (11), коли відомими є статистичні розподіли $d, d_n, \delta, \delta/a_c$, або, що більш важливо, у разі прогнозування процесів тампонування, задаючись припустимими значинами $P_{кп}$ і α_j , підбирати для кожного інтервалу j високопроникних тріщин фракційний склад тампонажного матеріалу за розмірами і вмістом необхідних (певних розмірів) частинок, забезпечуючи високі і практично однакові значини загального коефіцієнта тампонування α_j для кожного інтервалу j високопроникних тріщин. Практично зіставимі розрахунки з підбору фракцій доцільно проводити за заданого коефіцієнта

та $\alpha_j = \frac{\alpha_j (1 - m_{ш}) V_{TP}}{(1 - m_n) V_T}$, взявши $V_T/V_{TP} = 1$, за співвідношенням:

$$\alpha_j' \left[F_3 \left(\frac{\delta_{j+1}}{a_c} \right) - F_3 \left(\frac{\delta_j}{a_c} \right) \right]^{-1} \frac{\int_{-\infty}^{\delta_{j+1}} d f_4(d) dd}{\int_{-\infty}^{+\infty} d f_4(d) dd} = \sum_{i=0}^N \frac{d_i}{\int_{-\infty}^{+\infty} d^3 f_1(d) dd} [F_1(d_{i+1}) - F_1(d_i)],$$

причому $d_i < \frac{\delta_j}{a_c}$.

Звідси під високопроникними тріщинами можна розуміти, наприклад, тріщини, проникність яких дорівнює проникності пор чи для яких $d/a_{ск} \geq d'$, причому d' відповідає надійності P_n .

Запропоновані залежності дають змогу надати процесу тампонування властивостей вибіркової (здійснювати відбір тріщин апріорі заданого розкриття) і керованості (підкорятися дії керування). Вони являють собою модель процесу вибіркового, керованого тампонування. Звідси дисперсні системи, які саморозподіляються каналами апріорі заданого розміру в результаті попереднього цілеспрямованого підбору їх фракційного складу (за розмірами і вмістом), або, інакше кажучи, які забезпечують такий процес, доцільно називати керованими дисперсними системами.

Рух суспензії в пористому середовищі є змішаною задачею гідродинаміки і описується в теорії фільтрування, вона на сьогодні достатньо мірою вважається розробленою, щоб можна було скористатися для створення технології регулювання процесу заводнення.

Фільтрування за механізмом процесу поділяють на два види: 1) із утворенням осаду (кірки) на поверхні пористого середовища; 2) із закупорюванням пор середовища.

Розрізняють три типи фільтрування із закупорюванням пор: 1) механічний – тверді частинки розміром не менше 30 мкм під дією сил тертя і тиску потоку затримуються у звуженнях середовища; 2) фізико-хімічний – частинки розміром від 0,1 до 30 мкм під дією ван-дер-ваальсових і електрокінетичних сил утримуються на поверхні пор; 3) колоїдний – частинки розміром менше 0,1 мкм утримуються на поверхні пор ван-дер-ваальсовими і електрокінетичними силами та внаслідок виникання хімічних зв'язків.

Отже, для забезпечення кольматації (ізоляції) пор пористого середовища дисперсною системою необхідно виконати умови геометричного і концентраційного критеріїв.

Під час вивчення процесу фільтрування води в системі водопостачання розглядалась так звана малокоцентрована суспензія, хоч межа між мало- і висококоцентрованими суспензіями не встановлювалась [6]. У процесі буріння

та капітального ремонту свердловин широко використовуються глинисті і цементні розчини, які відносяться до висококонцентрованих суспензій, хоч останній термін кількісно теж не обґрунтовувався. У системі підтримування пластового тиску маємо справу з малоконцентрованою водною суспензією механічних домішок, і виникає задача обґрунтування допустимої концентрації суспензії [7]. Однак ці задачі розглядалися на експериментальному рівні без належного теоретичного обґрунтування.

Апріорі зрозуміло, що поняття мало- чи висококонцентрована суспензія, питання кольматації пор і тріщин повинні розглядатися у зв'язку із розмірами каналів, по яких відбувається рух суспензії.

Дисперсна система, зокрема суспензія, характеризується обмеженою фільтрівністю. Розглядаючи, як і вище, діаметри частинок дисперсної фази і діаметри порових каналів чи розкриття тріщин випадковими величинами, які підлягають певним законам статистичного розподілу, розглянуто задачу ймовірнісно-статистичного визначення допустимої концентрації полідисперсних частинок у процесі запомпювання суспензії (полідисперсної системи) в поліметричні канали пористого середовища нафтового пласта [8, 9]. За такої концентрації відбуватиметься тільки закупорювання пор без утворення поверхневого осаду (кірки) на вході в пористе середовище.

Розглядаємо елементарний кубічний елемент пористого тіла (середовища) з одиничними розмірами, що характеризується коефіцієнтом пористості m . Нехай дисперсна система, зокрема суспензія, об'ємною концентрацією дисперсної фази c , подається через одну із граней такого елементарного кубічного елемента пористого тіла.

Пористе середовище подаємо системою паралельних капілярів радіусом r_1 , а частинки дисперсної фази мають радіус r_2 , причому розміри пор і частинок підлягають певним статистичним законам розподілу.

Число пор залежно від їх радіуса характеризується диференціальним законом розподілу $f_1'(r_1)$.

Число частинок дисперсної фази залежно від радіуса характеризується диференціальним законом розподілу $f_2'(r_2)$, тобто дисперсна система представлена полідисперсними частинками дисперсної фази.

На одну грань елементарного куба дисперсної системи припадає частинок (у разі розміщення їх у вузлах кубічної сітки):

$$N_3 = (\sqrt[3]{N_2})^2, \quad (13)$$

де N_2 – кількість полідисперсних частинок в одиниці об'єму дисперсної системи.

За допустимою концентрацією дисперсної системи беремо таку концентрацію c , за якої кожна частинка дисперсної системи має свій поровий канал (концентраційний критерій проникання дисперсної системи в пористе середовище), тобто

$$N_3(c) \leq N_1(m). \quad (14)$$

де N_1 – кількість полі розмірних пор вхідної грані з одиничною площею як функція коефіцієнта пористості m .

Із (14) знаходимо допустиму концентрацію частинок дисперсної фази.

Кольматація пор є можливою в тому випадку, коли будь-яка частинка дисперсної системи зможе уміститися в будь-який поровий канал, тобто за умови виконання геометричного (структурного) критерію: $r_{1\min} > r_{2\max}$. Така жорстка умова на практиці в більшості випадків не може бути виконаною, оскільки статистичні розподіли частинок і пор за розмірами перебиваються (див. рис. 3).

Тому структурний критерій необхідно записати залежно від рівня надійності його виконання. Так як ці дві випадкові величини – радіуси пор і частинок – є незалежними величинами, то щільність розподілу їх системи дорівнює добутку щільностей розподілів кожної величини, котра входить у систему (див. вище). Тоді ймовірність надходження частинок у пори запишемо так:

$$\begin{aligned} F_{\Pi}(r_1' > r_2') &= \int_{r_1'}^{+\infty} \int_{r_2'}^{+\infty} f_1(r_1) f_2(r_2) dr_1 dr_2 = \\ &= F_2(r_2') [1 - F_1(r_1')], \end{aligned} \quad (15)$$

де: $f_1'(r_1')$, $F_1(r_1)$, $f_2'(r_2)$, $F_2(r_2')$ – щільності і функції розподілів відповідно радіусів пор (r_1) і частинок (r_2); r_1' , r_2' – розміри пор і частинок, які зокрема набувають значин мінімальної ($r_{1\min}$) і максимальної ($r_{2\max}$). Тут узято до уваги, що функції розподілу при мінус і плюс нескінченностях рівні відповідно нулю і одиниці; з позицій узагальнення рівнянь умовно припустили зміну фізичних розмірів пор і частинок у межах нескінченностей.

Зауважимо, що диференціальні закони розподілу $f_1'(r_1)$ і $f_2'(r_2)$ числа пор та числа частинок пов'язані із щільностями розподілів радіусів пор $f_1(r_1)$ і частинок $f_2(r_2)$ залежностями:

$$f_1(r_1) = \frac{f_1'(r_1)}{N_1}; \quad (16)$$

$$f_2(r_2) = \frac{f_2'(r_2)}{N_2}. \quad (17)$$

Оскільки в пори проникне тільки певна, ймовірна, частка частинок, то концентраційний критерій запишемо у вигляді

$$F_{\Pi} N_3(c) \leq N_1(m), \quad (18)$$

а решта частинок утворюватиме поверхневий осад (кірку), внаслідок чого процес проникання частинок у пористе середовище згасатиме в часі. Звідси знаходимо допустиму концентрацію частинок дисперсної системи, за якої ще забезпечуватиметься проникання твердих час-

тинок у пористе середовище без утворення кірки на його зовнішній (вхідній) поверхні.

Якщо припустити справедливості, наприклад, нормального закону розподілу параметрів, то шукану допустиму концентрацію полідисперсної фази в суспензії отримуємо у вигляді

$$c \leq \frac{4mr_{20}(r_{20}^2 + 3\sigma_2^2)}{3F_{\Pi}} \sqrt{\frac{m}{\pi F_{\Pi}(r_{10}^2 + \sigma_1^2)^3}}, \quad (19)$$

де r_{10} , r_{20} – математичні сподівання радіусів пор і частинок; σ_1 , σ_2 – середньоквадратичні відхилення радіусів пор і частинок суспензії.

Зазначимо, що за $\sigma_1=0$, $\sigma_2=0$ і $F_{\Pi}=1$ одержується вираз допустимої концентрації для ідеалізованого випадку – монодисперсної системи, коли пори і частинки характеризуються середніми розмірами.

Дамо кількісну оцінку знайденої допустимої концентрації. Для знаходження r_1' і r_2' (за $r_1'=r_2'$) записуємо умову:

$$f_1(r_1') = f_2(r_2') \quad (20)$$

або

$$\sigma_1^{-1} e^{-\frac{(r_1'-r_{10})^2}{2y_1^2}} = \sigma_2^{-1} e^{-\frac{(r_2'-r_{20})^2}{2y_2^2}}. \quad (21)$$

Звідси одержуємо:

$$r_1' = r_2' = \frac{(r_{20}y_1^2 - r_{10}y_2^2)}{y_1^2 - y_2^2} + \left\{ \left(r_{20}y_1^2 - r_{10}y_2^2 \right)^2 - \left(y_1^2 - y_2^2 \right) \left[\left(r_{20}y_1^2 - r_{10}y_2^2 \right) - 2y_1^2 y_2^2 \ln \frac{y_1}{y_2} \right] \right\} \times \left(y_1^2 - y_2^2 \right)^{-1}. \quad (22)$$

Беремо $m = 0,1$; $r_{10} = 12 \cdot 10^{-6}$ м; $\sigma_1 = 5 \cdot 10^{-6}$ м, $r_{20} = r_{10} / 3$ (припускаємо із позицій можливого склепінноутворення на вході в пори); $\sigma_2 = 1,33 \cdot 10^{-6}$ м, тоді $r_1' = r_2' = 6 \cdot 10^{-6}$ м. Далі із статистичних таблиць [5] знаходимо:

$$F_1(r_1') = 0,0668; F_2(r_2') = 0,9336,$$

а відтак розраховуємо

$$F_{\Pi} = F_2(r_2') [1 - F_1(r_1')] = 0,871.$$

Тоді $c = 0,00123 \text{ м}^3/\text{м}^3$ або $c = 0,123\%$. Цій об'ємній концентрації відповідає масова концентрація

$$c' = \frac{c\rho_d}{1-c} = 2700 \text{ мг/л}, \quad (23)$$

де $\rho_d = 2200 \text{ кг/м}^3$ – густина матеріалу твердих домішок суспензії.

Якщо взяти $\sigma_1 = 0$, $\sigma_2 = 0$, то за цих же даних отримуємо $c = 1,04\%$.

У роботі [10] із простих геометричних міркувань за ідеалізованих умов допустиму об'ємну концентрацію оцінено величиною 0,75%, що свідчить про прийнятність нашого підходу.

Беремо також $r_{10} = 12 \cdot 10^{-6}$ м; $r_{20} = 4 \cdot 10^{-6}$ м ($r_{20} = r_{10} / 3$), $r_1' = r_2' = 8,4 \cdot 10^{-6}$ м за $\sigma_1 = 1,2 \cdot 10^{-6}$ м і $\sigma_2 = 1,47 \cdot 10^{-6}$ м. Тоді $F_{\Pi} = 1$, $c = 9,32 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{м}^3$, $c' = 0,2 \text{ мг/л}$, тобто для отримання високої ймовірності надходження частинок у пористе середовище (з наступною кольматацією пор) слід забезпечити дуже малі значини допустимої концентрації.

Отже, запропонована імовірно-статистична модель дає змогу теоретично обґрунтувати максимально допустиму концентрацію дисперсної фази в дисперсній системі, якою тампонується пористі канали проривання води (чи у воді, що використовується в системі підтримання пластового тиску) або мінімально допустиму концентрацію твердої фази в буровому розчині (без кольматації пор з утворенням поверхневої кірки).

Таким чином, у розвинутих країнах світу домігантою в розвитку енергетики є ресурсозбереження, точніше ресурсоощадність. У нафтовидобувній галузі найбільш ефективною технологією є заводнення нафтових родовищ попри відомі його негативні наслідки, зокрема передчасне некерване і швидкоплинне обводнення видобувних свердловин через складність будови покладів (неоднорідність, тріщинуватість тощо), яке спричиняє безповоротне залишення нафти в покладі (у вигляді великооб'ємних “ціликів”), істотне зниження поточного видобутку (дебітів) нафти, великі енергетичні, ресурсні, економічні і екологічні втрати. Нами сформульовано гіпотезу, розроблено наукову ідею створення нових способів тампонування високопрвідних тріщин у міжсвердловинних зонах нафтових покладів і технологічно оформлено їх. Для обґрунтування цього наукового напрямку і технологій необхідно було відповісти на низку питань, тобто розробити наукові засади способів і технологій.

Аналіз свідчить, наприклад, для умов Долинського нафтового родовища (на основі промислових даних Р.В. Мисьовича), що тріщинна проникність може бути зіставимою більшою чи меншою мірою з поровою проникністю, а проникність тріщин – у сотні разів більша від порової проникності. Тому, безперечно, такі тріщини є шляхами передчасних проривань води до видобувних свердловин і обводнювання їх продукції.

Наукова ідея полягає в тому, що з метою регулювання розробки родовища необхідно забезпечити вирівнювання проникностей, в першу чергу, тріщин (шляхом зменшення) і, відтак – порової (звичайно, шляхом збільшення). На сьогоднішній день придатним до практичної реалізації (звичайно, в межах усього пласта, а не локально в привибійних зонах) і, мабуть, економічно виправданим є перший шлях. Суть нового наукового напрямку полягає в тому, що для регулювання процесу витіснення нафти із тріщинуватих колекторів єдино прийнятним способом є використання дисперсних систем, а не рідинних тампонажних матеріалів, які пізніше можуть утворювати гелі, емульсії, осади або тверде тіло.

За відомих двох принципових підходів до вирішення проблеми тампонування тріщин діяння слід піддавати пласт загалом, а не тільки привибійну зону.

Основною вимогою до дисперсної системи є відповідність її геометричному критерію проникання дисперсної фази у високопровідні тріщини і відсутності кольматації малопродовідних тріщин і пор блоків матриць. Критерій розроблено з позицій теорії ймовірностей з урахуванням щільностей статистичних розподілів розмірів полідисперсних частинок дисперсної фази, полірозмірних пор і полірозмірних тріщин. Обґрунтовано поняття надійності вибіркового тампонування (коефіцієнта коректування проникностей тріщин і пор), повноти тампонування, тобто розроблено модель процесу вибіркового, керованого тампонування (такі системи названо керованими).

Розроблено з позицій теорії ймовірностей концентраційний критерій проникання (чи непроникання) дисперсної системи в пористе середовище і визначено допустиму концентрацію полідисперсної фази в суспензії.

Література

- 1 Желтов Ю.П. Разработка нефтяных месторождений. – М.: Недра, 1986. – 332 с.
- 2 Бойко В.С. Научные основы интенсификации нефтегазодобычи из неоднородных пластов с применением дисперсных систем: Дисс. ... д-ра техн. наук: 05.15.06. – Ивано-Франковск – М.: ИФИНГ – МИНХ и ГП им. И.М. Губкина, 1989. – 460 с.
- 3 Бойко В.С., Бойко Р.В. Підземна гідрогазомеханіка: Підручник. – Львів: Априорі, 2005. – 452 с.
- 4 Извлечение нефти из карбонатных коллекторов / М.Л. Сургучев, В.И. Колганов, А.В. Гавура, В.Г. Михневич, Б.И. Тульбович, О.Ф. Мартынцив. – М.: Недра, 1987. – 230 с.
- 5 Вентцель Е.С. Теория вероятностей. – М.: Наука, 1969. – 576 с.
- 6 Минц Д.М. Теоретические основы технологии очистки воды. – М.: Изд. лит. по стр-ву, 1964. – 156 с.
- 7 Подготовка и нагнетание воды для поддержания пластового давления на нефтяных месторождениях Башкирии / У.М. Байков и др. // Обзор. инф. Сер. Нефтепромысловое дело. – М.: ВНИИОЭНГ, 1984. – 44 с.
- 8 Бойко Р.В. Імовірно-допустима концентрація суспензії для закачки у пористе середовище // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ: Респ. міжвід. наук.-техн. зб. – Вип. 30. – Івано-Франківськ: ІФДТУНГ, 1993. – С. 91-96.
- 9 Бойко Р.В. Регулювання розробки нафтових родовищ застосуванням горизонтальних свердловин: Дис. ... канд. техн. наук: 05.15.06. – К.: ВАТ „УкрНГГ”, 1996. – 306 с.
- 10 Орнатский Н.В., Сергеев Е.М., Шехтман Ю.М. Исследование процесса кольматации песков. – М.: Изд. МГУ, 1955. – 182 с.

УДК 622.242.4

КОМПЕНСАТОРИ ВЕРТИКАЛЬНИХ ПЕРЕМІЩЕНЬ МОРСЬКИХ ПЛАВУЧИХ БУРОВИХ УСТАНОВОК

В.І.Векерик, А.Д.Догарь, Ю.В.Міронов

¹ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 42353,
e-mail: public@nung.edu.ua

Разработана система классификации компенсаторов вертикальной качки морских плавучих буровых установок по конструктивным признакам, предложены числовые показатели для их квалитетического анализа, дана оценка технического уровня серийных моделей компенсаторов.

The classification system of heaving motion compensators according to their design features is elaborated, the quantitative characteristics for quality metering are proposed, the technical level evaluation of compensator's serial models is accomplished.

Дефіцит вуглеводневих енергоносіїв у національній економіці України нині оцінюється у 70 млн. тон нафтового еквіваленту (т н.е.), з них 14 млн. тон нафти та 56 млрд. м³ газу. Власний видобуток за 2006 р. склав близько 4 млн. тон нафти разом із газоконденсатом та 22 млрд. м³ природного газу. Розвідана ресурсно-сировинна база на суходолі забезпечує сьогоденний стабільний видобуток лише у вказаних обсягах,

тоді як фактичне річне споживання сягає приблизно 95 млн. т н.е.

Одним із головних напрямків зменшення енергодефіцитності національної економіки в Україні є розвідка і освоєння покладів нафти і газу в українському секторі Азовсько-Чорноморського шельфа, початкові сумарні видобувні запаси в яких оцінюються в 1532 млн. т н.е. Національною програмою [1] в 2010 році пе-