

ОБВОДНЕННЯ ГАЗОВИХ І НАФТОВИХ СВЕРДЛОВИН

У ТРЬОХ ТОМАХ

**В.С. Бойко, Р.В. Бойко,
Л.М. Кеба, О.В. Семінський**

ОБВОДНЕННЯ ГАЗОВИХ І НАФТОВИХ СВЕРДЛОВИН

*За загальною редакцією
професора, д-ра техн. наук В.С. Бойка*

Том другий

**СТВОРЕННЯ ПОТОКОВІДХИЛЮВАЛЬНИХ
БАР'ЄРІВ І ТЕХНОЛОГІЇ ІЗОЛЯЦІЇ**



“Міжнародна економічна фундація”

Київ – 2007

ББК 877.3(2)
УДК 622.276. 1/7
0-63

За редакцією професора, д-ра техн. наук В.С. Бойка

Обводнення газових і нафтових свердловин. Том 2. Створення потоковідхилювальних бар'єрів і технології ізоляції. За редакцією В.С. Бойка / В.С. Бойко, Р.В. Бойко, Л.М. Кеба, О.В. Семінський. – Київ: “Міжнародна економічна фундація”, 2007. – 772 с.

Висвітлено в широкому аспекті проблему обводнення свердловин, способи ізоляції та обмеження припливу пластової води (контурної, підошовної, верхньої, середньої, нижньої) в нафтові, газові і газоконденсатні свердловини, характеристики тампонажних матеріалів (на основі полімерів, смол, цементу, суспензій тощо) та їх вибір для конкретних умов здійснення ізоляції і регулювання припливу води із пористих і тріщинуватих колекторів діянням локально на привибійні зони і регіонально на міжсвердловинні зони пласта, наукові основи і способи створення потоковідхилювальних (погокоскерувальних) бар'єрів у глибині пласта, технології ремонтно-ізоляційних і ремонтно-відновлювальних робіт із використанням різних тампонажних матеріалів, особливості експлуатації обводнених нафтових і газових свердловин, а також оцінку технологічної та економічної ефективності робіт і еколого-природоохоронні заходи та техніку безпеки.

У другому томі розглянуто наукові основи управління міжсвердловинними потоками флюїдів та способи створення міжсвердловинних потоковідхилювальних бар'єрів, а також технології ремонтно-ізоляційних робіт із використанням твердіючих неорганічних тампонажних розчинів та в'язучих матеріалів на основі органічних речовин, гелеутворювальних сумішей, пін, емульсій, суспензій і технології створення міжсвердловинних потоковідхилювальних бар'єрів та інш.

Для інженерно-технічних і наукових працівників нафтової і газової промисловості, а також студентів та аспірантів вищих навчальних закладів нафтогазового профілю.

Ш.186-Табл.113.

Рецензенти: д-р техн. наук, проф. Коцкулич Я.С.
д-р техн. наук Тарко Я.Б.

*Рекомендовано до друку Вченою Радою Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу
(протокол №10/434 від 11 жовтня 2005 р.).*

Б $\frac{96506-11}{2007}$ без оголошення

ISBN 978-966-96506-2-3
ISBN 978-966-96506-3-1

© Бойко В.С., Бойко Р.В.,
Кеба Л.М., Семінський О.В., 2007

ГЛАВА 5. НАУКОВІ ОСНОВИ УПРАВЛІННЯ МІЖСВЕРДЛОВИННИМИ ПОТОКАМИ ФЛЮЇДІВ І СПОСОБИ СТВОРЕННЯ МІЖСВЕРДЛОВИННИХ ПОТОВОЇДХИЛЮВАЛЬНИХ БАР'ЄРІВ

Ранні і неконтрольовані проривання води із водоносної зони (чи із зони нагнітання води) в нафтові і газові поклади, що зумовлено зокрема наявністю тріщин у гірських породах продуктивного пласта, особливо у випадку широкого діапазону зміни їх поперечного розкриття (ширини), призводять до істотного зменшення охоплення нафтового і газового пласта розробкою і передчасного обводнення видобувних свердловин. Це знижує гідрогазодинамічну (технологічну) ефективність процесів витіснення нафти (газу) водою і техніко-економічну ефективність розробки нафтового (газового) покладу внаслідок марної циркуляції витіснювальної води (чи іншої витіснювальної рідини) по промитих каналах пласта і в промислових спорудах та залишення в продуктивному пласті неvirоблених об'ємів нафтового (газового) колектора. Тут викладено необхідні умови і шляхи реалізації сформульованого вище (див. § 1.4, том 1) нового напрямку підвищення нафтогазовилучення із покладу вирівнюванням (зменшенням) проникнісної неоднорідності тріщинувато-пористого пласта, наукові основи і нові способи, які націлені на ресурсо- та енергозбереження (точніше ошадження) в нафтогазовидобуванні і дають змогу керувати потоками витіснюваних (пластових) флюїдів і витіснювальних рідин (води, водних розчинів полімерів, луґу тощо) та зменшувати передчасну обводненість видобуваної вуглеводневої продукції.

5.1 Теоретичні основи процесу тампонування тріщин

Вибіркове, кероване тампонування високопрвідних тріщин у продуктивному газовому чи нафтовому пласті запомповуванням дисперсних систем (суспензій) передбачає створення потоковідхилювальних (чи навіть потоковирівнювальних) бар'єрів (перешкод) у тріщинах із апіорі заданим розкриттям їх. Можливість створення бар'єрів у міжсвердловинних (віддалених від свердловин) зонах пласта визначається умовами перенесення частинок дисперсної системи (тампонажного матеріалу) в тріщинах і механізмом утворення зернистого малопроникного чи непроникного (див. § 1.4 там же) шару, співвідношенням поперечних розмірів тріщин і дисперсних частинок.

5.1.1 Гідравлічна модель руху дисперсної системи й утворення шару твердих частинок у вертикальній тріщині

Під час руху вільнозв'язної дисперсної системи – суспензії – кожному її компоненту притаманні свої швидкість і траєкторія руху [88, 112]. Вектор швидкості \vec{v} руху частинки (гранули) дисперсної системи можна розкласти на дві складові, рівні горизонтальній швидкості руху запомповуваного носія (дисперсійного середовища) \vec{u} і вертикальній швидкості додатної (чи від'ємної) седиментації \vec{w} . Швидкість \vec{u} під час запомповування тампонажного (ізоляційного) матеріалу в тріщину тріщинуватопористого пласта з постійною витратою може змінюватися внаслідок відтікання частини рідини в пористі блоки гірської породи через стінки тріщини, зменшення розкриття (ширини) тріщини, руху частини рідини через утворений проникний шар осілих у ньому гранул. Швидкість седиментації \vec{w} залежить від ряду чинників (діаметра частинок, коефіцієнта в'язкості рідини, різниці густин матеріалу частинок і рідини, їх взаємодії тощо) і у першому наближенні описується відомою формулою Стокса; її рекомендуємо на підставі виконаних нами досліджень [3] розрахувати для практичних цілей за формулою у роботі [231] або визначати експериментально (див. нижче § 6.13.1).

У залежності від просторового напрямку і співвідношення значин цих складових вектора швидкості \vec{v} за малих його значин можливі траєкторії гранул, які надходять у вертикальну тріщину достатньо великого розкриття (порівняно із діаметром частинок) на різній висоті, показано на рис. 5.1. Можна записати:

$$v = \frac{u}{\cos \alpha_{\text{шв}}} = \frac{u}{\cos \left(\arctg \left| \frac{\vec{w}}{\vec{u}} \right| \right)}, \quad (5.1)$$

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

Звідси маємо, що перенесення гранул у тріщині на більшу 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. 5.1, в). Щоб забезпечити „необмежену” глибину перенесення гранул у тріщині, треба або до апіорі заданих гранул (точніше, до густини їх матеріалу) підібрати відповідну густину носія, або навпаки, а тоді будемо мати $\Delta\rho = 0$.

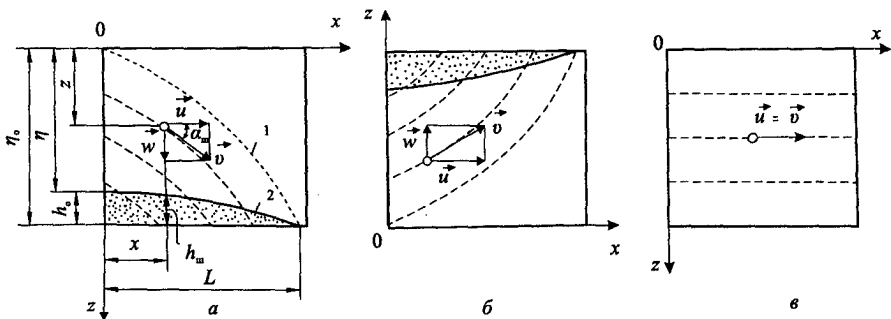


Рис. 5.1 – Схеми переміщення гранул у вертикальній тріщині й утворення зернистого шару за різних співвідношень густин гранул ρ_r і рідини ρ_p : а – $\rho_r > \rho_p$; б – $\rho_r < \rho_p$; в – $\rho_r = \rho_p$; 1 – траєкторія руху частинок; 2 – зернистий шар

При ненульовій плавучості гранул ($|\Delta\rho| > 0$, $|w| > 0$) утворення шару відбувається (див. рис. 5.1, а, б) або біля покрівлі (частинки спливають), або біля підшви (дна) тріщини (частинки осідають) внаслідок прилипання гранул до стінок тріщини (адгезія) і прилипання однієї гранули до іншої (когезія) як результат тертя [57, 112]. Відмітимо тільки, що в тріщині одночасно існують два гідромеханічні процеси – накопичення і розмивання шару (кольматації і декольматації тріщини). Якщо швидкість потоку u набуває значини деякої швидкості потоку, яка називається *критичною швидкістю* $u_{кр}$, темп накопичення стає рівним темпу розмивання – зростання товщини (висоти) шару припиняється. Якщо рух суспензії відбувається по двох чи декількох паралельних каналах (тріщинах), то в одному із каналів може настати закупорювання, що призведе до нестійкості процесу. Зміна швидкості потоку супроводжується підсиленням розмивання чи відкладання (накопичення) шару, тобто процес автоматично саморегулюється. Висота утвореного шару визначається значиною критичної швидкості, яка трудно піддається в даний час аналітичному розрахунку (див. § 5.1.2). Якщо розкриття тріщини є недостатнім (див. нижче) для переміщення частинок дисперсної системи, то частинки затискаються в цьому звуженні тріщини (*геометричний критерій надходження частинок у тріщини і перенесення їх у них*).

Опираючись на рис. 5.1, наближену гідравлічну оцінку висоти h_w і довжини L шару в тріщині можна виконати так. За час dt частинка проходить відстані уздовж осей x і z відповідно:

$$dx = udt, \quad dz = wdt. \quad (5.2)$$

Приймаючи $u = q/(\eta\delta)$, $\eta = \eta_0 - h_w$, $w = w_0 = \text{const}$, $q = q_0 = \text{const}$, звідси після інтегрування при $d\eta = -dh_w$ одержуємо рівняння зміни висоти шару вздовж його довжини:

$$h_{\text{ш}} = \eta_0 - (\eta_0 - h_0) \exp\left(\frac{w_0 \delta x}{q_0}\right), \quad (5.3)$$

де q_0 – об'ємна витрата дисперсної системи через тріщину; δ , η – розкриття (ширина) і висота прохідного перерізу тріщини; h_0 – висота шару на вході в тріщину.

При $x = L$, де L – довжина шару, висота $h_{\text{ш}} = 0$, тоді

$$L = \frac{q_0}{w_0 \delta} \ln\left(\frac{\eta_0}{\eta_0 - h_0}\right). \quad (5.4)$$

Намивання шару супроводжується зміною кількості частинок у потоці. Тоді рівняння матеріального балансу для об'єму частинок запишемо так:

$$q_0 \varphi dt = (1 - m_{\text{ш}}) h_{\text{ш}} \delta dx, \quad (5.5)$$

розв'язуючи яке, з урахуванням (5.3) і (5.4) одержуємо рівняння взаємозв'язку тривалості t запопповування дисперсної системи в тріщину і довжини шару L :

$$t = \frac{(1 - m_{\text{ш}}) \eta_0}{w_0 \varphi} \left(\frac{w_0 \delta L}{q_0} + e^{-\frac{w_0 \delta L}{q_0}} - 1 \right) \quad (5.6)$$

або висоти шару h_0 на вході в тріщину

$$t = \frac{(1 - m_{\text{ш}}) \eta_0}{w_0 \varphi} \left[-\frac{h_0}{\eta_0} - \ln\left(1 - \frac{h_0}{\eta_0}\right) \right], \quad (5.7)$$

де t – тривалість часу запопповування дисперсної системи в тріщину з паралельними вертикальними стінками ($\delta = \text{const}$); $m_{\text{ш}}$ – коефіцієнт пористості утвореного шару осілих частинок; φ – об'ємна концентрація частинок у дисперсній системі ($\varphi = \text{const}$).

У ході намивання шару швидкість потоку змінюється з відстанню x (змінюється висота η прохідного перерізу тріщини), а біля входу в тріщину ($x = 0$) сягає критичної значини $u_{\text{кр}} = q_0 / \delta(\eta_0 - h_{\text{кр}})$, якій відповідають критичні висота $h_{\text{кр}}$, довжина $L_{\text{кр}}$ і тривалість часу $t_{\text{кр}}$ намивання шару. Такий шар назвемо *критичним*. При подальшому запопповуванні дисперсної системи буде продовжуватися збільшення довжини шару. Від входу в тріщину до відстані L_1 на певний момент часу висота шару буде постійною і дорівнюватиме $h_{\text{кр}}$, а далі вона буде зменшуватися згідно з (5.3) при $h_0 = h_{\text{кр}}$ і відрахуванні x від точки з поточною координатою L_1 . Тоді

$$L_1 = \frac{q_0 \varphi t_1}{(1 - m_{\text{ш}}) \delta h_{\text{кр}}}, \quad (5.8)$$

де $t_1 = t - t_{кр}$ – тривалість часу намівання шару довжиною L_1 , коли його висота дорівнює $h_{кр}$. Відмітимо, що за великих швидкостей потоку, коли $q_0/\delta\eta_0 > u_{кр}$, утворення (намівання) шару не відбувається, усі частинки переносяться потоком.

За одержаними рівняннями виконано розрахунки, при цьому введені безрозмірні величини: $\bar{h}_{ш} = h_{ш}/\eta_0$; $\bar{h}_0 = h_0/\eta_0$; $\bar{x} = x/\eta_0$; $\bar{L}_{кр} = L_{кр}/\eta_0$; $\bar{t} = w_0\varphi t / [(1 - m_{ш})\eta_0]$; $a = q_0/(w_0\delta\eta_0) = u_0/w_0$ ($u_0 = q_0/(\delta\eta_0)$); $b = u_0/u_{кр}$; $c = a/b = u_{кр}/w_0$.

Тоді рівняння (5.3), (5.4) (при $L = L_{кр}$, $h = h_{кр}$) і (5.7) перетворили до виглядів:

$$\bar{h}_{ш} = 1 - (1 - \bar{h}_0) e^{\frac{\bar{x}}{a}}; \quad (5.9)$$

$$\bar{L}_{кр} = a \ln b^{-1} = a \ln \frac{c}{a}; \quad (5.10)$$

$$\bar{t} = -\ln(1 - \bar{h}_0) - \bar{h}_0. \quad (5.11)$$

Для розрахунків взято $w_0 = 0,075$ м/с, $u_{кр} = 0,51$ м/с (за даними результатів наших дослідів стосовно до частинок пом'якшувача у воді), а тоді $c = 6,8$.

Аналіз показує, що максимальна значина $\bar{L}_{кр \max} = 0,368$ с. Якщо $h_{ш} = 0,5$ м, то $L_{кр \max} = 1,25$ м при $c = 6,8$. Значині $\bar{L}_{кр \max}$ відповідає величина $a = 0,368c = 2,50$. Зміну профілю шару в часі як результат спільного розв'язування (5.9) і (5.11) при $a = 2,5$ і профіль критичного шару за (5.9), коли $\bar{h}_0 = \bar{h}_{кр}$ і $\bar{h}_{кр} = 1 - b$, при $a = bc$, $c = 6,8$ подано на рис. 5.2. Значині $\bar{L}_{кр \max}$ відповідає також $b = 0,368$, $\bar{h}_{кр} = 0,632$ і $\bar{t}_{кр} = 0,368$. При $m_{ш} = 0,3$; $\varphi = 0,02$; $\eta_0 = 0,5$ м знаходимо $h_{кр} = 0,32$ м, $t_{кр} = 85,9$ с. Відмітимо, що для взятих даних стосовно до пом'якшувача тріщина заповнюється зернистим шаром усього на третину по висоті.

Отже, утворення зернистого шару у вертикальній тріщині визначається швидкістю потоку u_0 , седиментаційним потоком $w_0\varphi$ і висотою тріщини h_0 . Тривалістю часу утворення критичного шару, який характеризується невеликими розмірами, можна знехтувати порівняно із загальною тривалістю часу реального запомповування дисперсної системи в пласт.

Для переходу до радіальної течії пропонуємо модель розгалужених вертикальних тріщин (рис. 5.3), 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 усіх тріщинах вздовж радіуса замінити неперервною.