

## ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЗИЧНИХ ПРОЦЕСІВ ТЕПЛОВОЇ ДІЇ НА ПРИВИБІЙНУ ЗОНУ НАФТОВОГО ПЛАСТА

В.І.Пустогов, М.Мик.Орфанова, М.Мих.Орфанова

ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15; тел. (0342) 504612, 520953;  
e-mail: orfanova@rambler.ru

*Досліджено розподіл температури навколо моделі свердловини під час термохімічної реакції розподілу Mg з HCl. Проведено зіставлення температурного фронту в привибійній зоні свердловини із зоною вуглеводневої кольмататії. Подано рекомендації щодо вибору оптимальних умов для очищення фільтраційної зони від відкладів твердої вуглеводневої фази.*

Ключові слова: свердловина, фізичні процеси, температурний фронт, кольмататія, асфальтени.

*Исследовано распределение температуры в окрестности модели скважины при термохимической реакции распределения Mg с HCl. Проведено сопоставление температурного фронта в призабойной зоне скважин с зоной углеводородной кольматации. Предложены рекомендации по выбору оптимальных условий для очистки фильтрационной зоны от отложений твердой углеводородной фазы.*

Ключевые слова: скважина, физические процессы, температурный фронт, кольматация, асфальтены.

*The investigation of the sharing the temperature in suburbs of the models of the bore hole at thermochemical of the reactions of the distribution Mg with HCl. The organized matching of the warm-up front in zone of the bore holes with zone hydrocarbon kolmatation. The Offered recommendations at the option of the optimum conditions for peelings of the filtration zone from postponing the hard hydrocarbon phase.*

Keywords: well, physical processes, temperature front, kolmatation, hard hydrocarbon phase.

На родовищах високопарафіністих нафт пластові температури є близькими до температури кристалізації парафінів, тому через відкладення парафіну та асфальтено-смолистих речовин в порах колектора внаслідок охолодження нафти часто виникають ускладнення. Парафінова кольмататія має місце у ході освоєння та експлуатації свердловин на родовищах України.

Р.С. Яремійчук наводить термобаричну характеристику родовищ Прикарпаття [1], яка дає підстави зробити висновок, що пластова температура перевищує температуру насичення нафти парафіном лише на 3–10 К.

У результаті проведених нами досліджень [2] встановлено щодо складу парафінів входять вуглеводні з температурою плавлення від 305 К до 365 К.

В першу чергу із розчину нафти за температур, значно вищих, від температури насичення нафти парафіном (порядку 320–330 К) випадають високоплавкі вуглеводні ( $t_{пл} = 365$  К), відкладаючись ще в пласті.

Чинники, що впливають на охолодження привибійної зони і випадіння твердої фази в колекторі, можна поділити на такі групи:

- охолодження буровим розчином (на 12–24 К) у процесі буріння;
- промивання під час закінчування свердловин (до 25 К);
- розгазування та зниження температури під час депресії на пласт у разі викликання притоку нафти (ефект Джоуля-Томпсона) (на 5–15 К);
- охолодження нафти в процесі нагнітання води в пласт;
- зниження температури під час ремонту свердловин.

У тріщинуватих колекторах у привибійній зоні в режимі охолодження за наявності багатьох фаз (нафта, вода, газ, порода, парафін, асфальтени, смоли) на границі з породою та на межі розділу фаз “вода – нафта” можуть з’явитись структуровані адсорбційні шари, що складаються з міцел асфальтенів, друз кристалів церезинів із високою структурною в’язкістю і міцністю на зсув. Для очищення тріщинуватого колектора достатньо нагріти флюїд до температури розчинення основних (навіть не тугоплавких) парафінів і створити депресію на пласт, бажано миттєву. Зв’язки між друзами розчиняються, і друзи кристалів переносяться потоком нафти.

В пористих колекторах все набагато складніше. Для очищення необхідно прогрівати всю товщу колектора до температур розплавлення найтугоплавкіших парафінів, тому що кристали не можуть пройти крізь такі вузькі пори (5–20 мкм). У пласті, де не відбувається випадіння парафінів, існують тільки адсорбційні шари асфальтенів ( $10^{-7}$  м). Зазначені ускладнення під час освоєння та експлуатації свердловин зумовлюють необхідність теплового діяння на привибійну зону пласта та подальшого вдосконалення методів теплового оброблення колектора.

Результати лабораторних досліджень теплових процесів способом кондуктивного прогрівання в моделі привибійної зони свердловини при взаємодії гранульованого магнію з соляною кислотою [3] засвідчили, що температурний імпульс експоненціально зменшується в радіальному напрямі від епіцентру реакції. Швидкість розповсюдження температурного імпульсу  $v = 10^{-4} - 10^{-5}$  м/с. Із збільшенням радіуса швидкість теплового імпульсу зменшується. За рахунок теплопровідності певний розпо-

Таблиця 1 – Результати розрахунку кількості теплоти у свердловині та розподіл температур у пласті товщиною 1 м в радіусі 0,3 – 0,35 м

Параметри	Відстань від центра, м					
	0 – 0,30	0,31	0,32	0,33	0,34	0,35
Температура на вибої до початку реакції, К	323	323	323	323	323	323
Теплота через 500 хвилин, Дж · 10 <sup>3</sup>	31 400	1 953	404,813	206,744	58,714	16,164
Температура через 500 хвилин, К	373	335	328	325	324	323,8
Витрачена енергія, Дж · 10 <sup>3</sup>	37 960					

діл температур встановлюється в радіальному напрямі. Такі ділянки моделі пласта отримують певну кількість теплоти. Якщо температуру в епіцентрі (на “вибої”) підтримувати постійною протягом певного часу, тепловий фронт максимальної температури буде просуватись радіально із швидкістю 10<sup>-5</sup> м/с [3].

Теоретично кількість теплоти за рахунок теплопровідності, передана в радіальному напрямі крізь тонкий шар породи ( $\partial r$ ), може бути розрахована за формулою

$$dQ = -\chi \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \cdot 2\pi \cdot r \cdot h \cdot dt, \quad (1)$$

де:  $\chi$  – коефіцієнт теплопровідності порід пласта, Дж/К·м·с (для нафтонасиченого піску  $\chi = 0,8 \div 1,1$  Дж/(К·м·с));  $\partial T/\partial r$  – градієнт температури, К/м;  $h$  – товщина продуктивного пласта, м (для даної моделі  $h = 0,1$  м);  $r$  – радіус проширарку пласта, м;  $dt$  – час розповсюдження тепла, с.

Диференціальне рівняння теплопровідності при радіальному розподілі тепла має вигляд:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\chi}{\rho \cdot c} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial r^2}. \quad (2)$$

Залежність температури (Т) від відстані в радіальному напрямі (r) в певний момент часу при кондуктивному перенесенні тепла описується експериментальною залежністю [3]

$$T = T_0 \cdot e^{-k \cdot c \cdot r^2}, \quad (3)$$

де:  $T_0$  – температура в центрі, К;  $c$  – теплосмність породи навколо свердловини, Дж/(к·кг);  $k$  – стала.

А градієнт температури в певний момент часу визначається як

$$\frac{\partial T}{\partial r} = T_0 \cdot e^{-k \cdot c \cdot r^2} \cdot (-2 \cdot k \cdot c \cdot r). \quad (4)$$

Товщину проширарку ( $dr$ ) можна виразити через час і швидкість проходження теплового імпульсу  $dr = v \cdot dt$ . Тоді рівняння приймає такий вигляд

$$dQ = \frac{\chi \cdot 2\pi \cdot r \cdot h \cdot 2k \cdot c}{v} \cdot T_0 \cdot e^{-k \cdot c \cdot r^2} \cdot dr, \quad (5)$$

а кількість тепла, яку отримує кожний шар за рахунок теплопровідності, дорівнює кількості тепла, що використовується на нагрівання цього шару за 1 с., тобто

$$T_0 \cdot e^{-k \cdot c \cdot r^2} \cdot \frac{\chi \cdot 2k \cdot c \cdot 2\pi \cdot r^2 \cdot h \cdot dr}{v} = c \cdot \rho \cdot h \cdot \pi \cdot r \cdot dr, \quad (6)$$

де:  $c$  – теплоємність порід,  $c=1000$  Дж/к·кг;  $\rho$  – густина пісковика,  $\rho=2500$  кг/м<sup>3</sup>;  $h$  – товщина продуктивного пласта, для моделі  $h = 0,1$  м;  $r$  – радіус від центра до проширарку пласта, м;  $dr$  – товщина проширарку пласта, м;  $dt$  – зміна температури нагрітого проширарку.

Одержане рівняння теплового балансу дає змогу визначити кінетику кондуктивної зміни температури в радіальному напрямі через певні проміжки часу.

У процесі буріння і виклику притоку привибійна зона радіусом 0,4 ÷ 0,6 м закольматовується асфальтенами і церезинами [4]. Для звільнення фільтраційних каналів від кольматуру пористого колектора необхідно прогріти найвіддаленні дальші ділянки радіусом 0,4 м до температури плавлення тугоплавких вуглеводнів – 353К. Вважаючи температуру пласта рівною 323 К, необхідно підвищити температуру на 30 К на відстані 0,35 м. Результати розрахунку кондуктивного розподілу температур в радіальному напрямі при підтримуванні температури 373 К на вибої свердловини глибиною 2000 м і радіусом 0,1 м через 500 хвилин після початку реакції наведено в таблиці 1.

Процес кондуктивного поширення температурного фронту від вибою свердловини має однаковий характер незалежно від методу прогрівання (електропрогрівання, термохімічна реакція): вважається, що внаслідок електропрогрівання під час просування теплоносія в тріщини пласта не відбувається конвективного перенесення тепла, а при термохімічній реакції можливий відтік продуктів реакції крізь затрубний простір.

З плином часу тепловий фронт із швидкістю 10<sup>-5</sup> м/с просувається радіально і досягне відстані 0,35 м за 500 ÷ 1000 хвилин із радіальним зменшенням кількості переданої теплоти і температури. Розрахунок зроблений для товщі пласта 1 м.

За 500 хвилин температура в зоні радіусом до 0,3 м підвищиться до 373 К. Для нагрівання 1 м товщі пласта у зоні радіусом 0,35 м до такої температури необхідно 12 кг магнію. Якщо прийняти товщу пласта в зоні фільтрації 20 м, то кількість гранульованого магнію для термооброблення становитиме 240 кг.

Для проведення такого теплового оброблення вибою об'ємом  $0,4 \text{ м}^3$  до температури  $100^\circ$  в зоні дренажу товщиною  $20 \text{ м}$  за допомогою теплового електронагрівача (ТЕН) потужністю  $25 \text{ кВт}$  необхідно приблизно  $1$  годину. Кількість енергії, одержаної від ТЕН за  $500\text{--}1000$  хвилин, становить  $(10\text{--}15)\cdot 10^8 \text{ Дж}$ . За цей час тепловий фронт пошириться радіально на  $3 \text{ м}$ . Енергія, яка може передатись в пласт за рахунок теплопровідності за той же проміжок часу, значно більша –  $30\cdot 10^8 \text{ Дж}$ .

За швидкості розповсюдження теплового фронту ( $v = 10^{-5} \text{ м/с}$ ) температурний імпульс експоненціально зменшується в багато разів і досягне границі закольматованої привибійної зони радіусом  $4\text{--}5 \text{ м}$  за  $10\text{--}15$  годин.

У випадку використання ТЕН з максимально можливою потужністю –  $25 \text{ кВт}$  час прогрівання значно збільшиться – до  $3\text{--}5$  діб, у результаті чого радіус зони прогрівання збільшиться до  $4 \text{ м}$ , а температура в зоні кольматації ( $r = 0,4 \text{ м}$ ) досягне оптимальних значень (коли можливе розплавлення парафінів).

У сучасних методах термохімічного оброблення свердловин використовується  $250\text{--}300 \text{ кг}$  магнію, що дає змогу кондуктивно прогріти зону вибою радіусом лише до  $0,3 \text{ м}$  в радіальному напрямі пористого колектора, проте не забезпечує необхідного підвищення температури в зоні вуглеводневої кольматації. Однак в об'ємі вибою неможливо вмістити такої кількості магнію з розчином кислоти для кондуктивного прогрівання привибійної зони. Тільки в тріщинуватому колекторі можливе переміщення такої маси магнію і продуктів реакції в тріщини конвекцією під тиском.

У тріщинуватому колекторі теплота від реакції  $250\text{--}300 \text{ кг}$  магнію або ТЕН проникне на досить велику відстань ( $10\text{--}50 \text{ м}$ ). Через  $1\text{--}2$  години після завершення екзотермічної реакції (або через  $10$  годин у разі застосування ТЕН) необхідно створити значний градієнт тиску в напрямі “пласт – свердловина” ( $dP/dr$ ), а за короткий час – миттєву депресію. Відтак здійснити відбір нагрітого розчину нафти і продуктів реакції з компонентами високоплавких вуглеводнів, що розчинились за період термооброблення. Після цього слід провести нагнітання розчинника або нафти і повторити депресію, щоб остаточно видалити всі залишки твердих вуглеводнів. У результаті таких дій проникність різко зростає, а продуктивність свердловини збільшиться.

Аналіз теплових явищ у привибійній зоні пласта спонукає до роздумів щодо ефективності застосування теплових методів впливу.

## *Література*

1 Яремийчук Р.С. Вскрытие продуктивных горизонтов и освоение скважин [Текст] / Р.С. Яремийчук, Ю.Д. Качмар. – Львов: Вища школа, – 1982. – 153 с.

2 Пустогов В.И. Изучение твердых углеводородов нефтей и парафинистых отложений Прикарпатья [Текст] / [В.И. Пустогов, Н.Я. Рудакова, А.В. Тимошенко и др.] // Известия ВУЗов. Нефть и газ. – 1973. – № 12. – С. 51-55.

3 Абдулин Ф.С. Изменение теплового поля в призабойной зоне пласта при взаимодействии гранулированного магния с соляной кислотой [Текст] / [Ф.С. Абдулин, В.И. Пустогов, В.Г. Грабилин ] // Разведка и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 1978. – Вып. 45. – С. 92-96.

4 Савенков Г.Д. Расчет процессов интенсификации притока, освоение и эксплуатация скважин [Текст] / Г.Д. Савенков, В.С. Бойко. – Львов: Вища школа, 1986. – 153 с.

*Стаття надійшла до редакційної колегії  
21.04.10*

*Рекомендована до друку професором  
М. О. Галуцаком*