

Техніка і технології

УДК 622.279.5

DOI: 10.31471/1993-9973-2020-3(76)-23-32

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЗАБРУДНЕННЯ ПРИВИБІЙНОЇ ЗОНИ ПЛАСТА І ПАРАМЕТРІВ ПЕРФОРАЦІЙНИХ КАНАЛІВ НА ПРОДУКТИВНІСТЬ ГАЗОВИХ СВЕРДЛОВИН

*Р. М. Кондрат, М. І. Щепанський, Л. І. Хайдарова**

*ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15; тел. (03422) 42195,
e-mail: rengr@nung.edu.ua, lilya.matiishun@gmail.com*

Охарактеризовано причини і характер забруднення привибійної зони газових свердловин. Розкрито структуру скін-ефекту. Наведено характеристику типів закінчування свердловин та основних параметрів, які необхідні для визначення скін-ефекту. Для умов гіпотетичної свердловини з використанням програми PipeSim компанії Schlumberger досліджено вплив проникності і товщини забрудненої привибійної зони пласта на величину скін-ефекту. Зображено графічні залежності скін-ефекту забрудненої зони від її товщини та проникності. Результати графічних залежностей оброблено за допомогою статистичного аналізу. Згідно з результатами досліджень значення скін-ефекту зростає зі зменшенням проникності забрудненої зони відносно проникності продуктивного пласта та із збільшенням радіуса забрудненої зони, а покращення фільтраційних властивостей привибійної зони пласта відбувається при збільшенні проникності забрудненої зони порівняно з пластовою проникністю. Отримано оптимальні значення проникності і товщини забрудненої зони, вище яких скін-ефект мало змінюється. Виконано дослідження впливу кількості та розмірів (довжини і діаметру) перфораційних каналів на один метр розкритої товщини пласта. Результати досліджень зображено на графічних залежностях дебіту газу та вибійного тиску від кількості перфораційних каналів на один метр розкритої товщини пласта, їх довжини та діаметра. Обґрунтовано застосування перфораційних каналів, які проходять через забруднену зону, для покращення гідродинамічного зв'язку пласта із свердловиною і збільшення дебіту газу. Згідно з результатами досліджень, виконаних за моделлю McLeod, оптимальний діаметр перфораційних каналів становить 0,029 м, довжина каналів – 0,296 м, кількість каналів на один метр розкритої товщини пласта – 16.

Ключові слова: скін-ефект, свердловина, пласт, привибійна зона, перфораційний канал, дебіт газу.

Указаны причины и характер загрязнения призабойной зоны скважин. Раскрыта структура скин-эффекта. Приведена характеристика типов заканчивания скважин и основных параметров, которые необходимы для определения скин-эффекта. Для условий гипотетической скважины с использованием программы PipeSim компании Schlumberger исследовано влияние проницаемости и толщины загрязненной призабойной зоны пласта на величину скин-эффекта. Изображены графические зависимости скин-эффекта загрязненной зоны от ее толщины и проницаемости. Результаты графических зависимостей обработаны с помощью статистического анализа. Согласно результатам исследований значения скин-эффекта возрастает с уменьшением проницаемости загрязненной зоны относительно проницаемости продуктивного пласта и с увеличением радиуса загрязненной зоны, а улучшение фильтрационных свойств призабойной зоны пласта происходит при увеличении проницаемости загрязненной зоны по сравнению с пластовой проницаемостью. Получены оптимальные значения проницаемости и толщины загрязненной зоны, выше которых скин-эффект практически не меняется. Выполнено исследование влияния количества и размеров (длины и диаметра) перфорационных каналов на один метр раскрытой толщины пласта. Результаты исследований изображены на графических зависимостях дебита газа и забойного давления от количества перфорационных каналов на один метр раскрытой толщины пласта, их длины и диаметра. Обосновано применение

перфорационных каналов, проходящих через загрязненную зону, для улучшения гидродинамической связи пласта со скважиной и увеличение дебита газа. Согласно результатам исследований, выполненных по модели McLeod, оптимальный диаметр перфорационных каналов составляет 0,029 м, длина каналов – 0,296 м, количество каналов на один метр раскрытой толщины пласта – 16.

Ключевые слова: скин-эффект, скважина, пласт, призабойная зона, перфорационный канал, дебит газа.

The reasons and nature of contamination of the bottomhole zone of wells are characterized. The structure of the skin effect is revealed. The characteristics of the types of well completion and the main parameters that are necessary to determine the skin effect are given. For the conditions of a hypothetical well, using the PipeSim program from Schlumberger, the influence of the permeability and thickness of the contaminated bottomhole formation zone on the value of the skin effect is investigated. The graphical dependences of the skin effect of the contaminated zone on its thickness and permeability are shown. The results of graphical dependencies are processed using statistical analysis. According to the research results, the value of the skin effect increases with the decrease in the permeability of the contaminated zone relative to the permeability of the productive formation and with the increase in the radius of the contaminated zone. The improvement in the filtration properties of the bottomhole formation zone occurs with the increase in the permeability of the contaminated zone compared to the formation permeability. The optimal values of the permeability and thickness of the contaminated zone are obtained, above which the skin effect practically does not change. The study of the influence of the quantity and size (length and diameter) of perforation channels per one meter of the open layer thickness is carried out. The research results are shown on the graphical dependences of gas flow rate and bottomhole pressure on the number of perforations per one meter of the open formation thickness, their length and diameter. The use of perforation channels that pass through the contaminated zone has been substantiated to improve the hydrodynamic connection of the formation with the well and increase the gas production rate. According to the results of studies carried out using the McLeod model, the optimal diameter of the perforation channels is 0,029 m, the length of the channels is 0,296 m, and the number of channels per meter of the open formation thickness is 16.

Key words: skin effect, well, reservoir, bottomhole zone, perforation channel, gas flow rate.

Постановка проблеми дослідження

У процесі експлуатації навколо видобувної свердловини утворюється нова область погіршеної проникності, яка характеризується певними властивостями. Ця область називається скин-зоною. До основних чинників, що погіршують фільтраційні властивості привибійної зони пласта і обмежують дебіт свердловини, відноситься скин-ефект (S). За значенням скин-ефекту робиться висновок про ступінь погіршення фільтраційних властивостей порід, доцільність проведення заходів з оброблення привибійної зони пласта і ефективність виконаних робіт щодо інтенсифікації припливу.

Забруднення привибійної зони пласта (кольматація) істотно впливає на продуктивність видобувних свердловин. При цьому під кольматацією розуміють забруднення привибійної зони буровим розчином при розкритті продуктивного пласта, погіршення фільтраційних властивостей привибійної зони при перфорації продуктивного інтервалу, а також скупчення у привибійній зоні солей, що випадають з пластової води, важких вуглеводнів, що конденсуються з газу, продуктів руйнування породи і кислотних оброблень пластах, технологічних рідин, які застосовуються при ремонтних роботах у свердловинах тощо.

Одним із методів зменшення впливу забруднення привибійної зони пласта на продуктивність газових свердловин є проведення пер-

фораційних робіт, у результаті яких перфорацийні канали покращують гідродинамічний зв'язок продуктивного пласта зі свердловиною.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Виснажені газові поклади на завершальній стадії розробки характеризуються значним погіршенням стану привибійної зони пласта [1-3]. Величина, яка характеризує ці погіршення, є скин-ефектом. Вперше поняття «скин-ефект» ввели автори [4] для оцінки стану привибійної зони свердловини, які показали, що зниження продуктивності свердловини у результаті погіршення проникності пласта пропорційне скин-ефекту.

Питання про параметр «скин-ефекту» широко обговорюється у наукових публікаціях і на конференціях. Тлумачення терміну «скин-ефект» і його визначення у роботах [5,6] як ефект недосконалості закінчення свердловини не повністю розкриває фізичний зміст і механізми його виникнення.

На сьогодні залишаються відкритими і дискусійними найбільш принципові питання: область існування значень скин-ефекту і його приналежність, невизначеність позитивного і негативного знаку його значень. Скин-ефект може мати значення від мінус ∞ до 0 і від 0 до плюс ∞ без приналежності області визначення та існування. Будь-які процеси, що призводять до зниження проникності і пористості порід-

колекторів, відображаються на величині скін-ефекту. Якщо скін-ефект дорівнює нулю, то погіршення стану привибійної зони відсутнє. Однак, коли його значення є позитивним, то має місце погіршення фільтраційних властивостей пласта, а коли є негативним – то їх покращення [7]. Зона з погіршеними фільтраційними властивостями зазвичай має невеликі розміри, але вона істотно впливає на продуктивність газових свердловин.

Авторами роботи [8] виконано дослідження впливу на дебіт газової свердловини кількості та розмірів перфораційних каналів залежно від проникності пласта. Однак дані дослідження не враховували значення скін-ефекту.

Тому нами виконано додаткові дослідження впливу перфораційних параметрів на продуктивність газових свердловин залежно від значення скін-ефекту.

Методика дослідження та вихідні дані

Скін-ефект складається з двох складових: механічний та динамічний скін-ефекти. Механічний скін-ефект – це загальний скін-ефект або скін Дарсі. Динамічний скін-ефект характеризує залежності продуктивності припливу флюїдів із пласта (Inflow performance relationships IPRs) отримані з рівняння Дарсі для однорідного пласта з вертикальним закінченням стовбуру свердловин, і може використовуватися для представлення коефіцієнтів тертя, що виникають внаслідок турбулентності потоків, які надходять у свердловину. Залежно від типу закінчення свердловини до механічного і динамічного скін-ефектів входять різні компоненти.

Загальна формула скін-ефекту має такий вигляд:

$$S = S_m + D \cdot Q, \quad (1)$$

де S_m – механічний скін-ефект;

D – динамічний скін-ефект;

Q – дебіт свердловини.

При розрахунку скін-ефекту виділяють такі типи закінчування свердловин:

- відкритий вибій;
- відкрита гравійна набивка;
- перфорована свердловина;
- перфорація та гравійна набивка;
- закінчування свердловини з гідравлічним розривом пласта (тріщина).

У подальших дослідженнях розглянуто третій тип закінчування свердловин, тобто коли свердловина перфорована. Схема пласта з перфораційними каналами зображена на рисунку 1.

Для визначення скін-ефекту потрібно розрахувати наступні параметри.

Скін-ефект забрудненої зони з погіршеною проникністю (Damaged zone skin). Це елемент скін-ефекту, який відповідає за додаткові втрати тиску, спричинені потоком рідини через перфоровану зону; область зі зниженою проникністю навколо свердловини, що є результатом процесу буріння та закінчування свердловини. Для розрахунку цього коефіцієнта повинні бути відомі товщина h_d перфорованої зони та проникність k_d або відношення проникностей k_d/k перфорованої зони (де k – проникність пласта). Якщо значення цих параметрів відсутні, то товщина перфорованої зони дорівнює нулю і, відповідно, скін-ефект забрудненої зони буде нульовим.

Скін-ефект перфорації (Perforation skin). Цей скін враховує додаткові втрати тиску за рахунок конвергенції (сходження) потоку рідини у перфораційні канали та через них. Це залежить від геометрії перфораційних каналів, їх довжини та діаметру, кількості перфораційних каналів на один метр розкритої товщини пласта тощо.

Скін-ефект часткового розкриття пласта (Partial penetration skin). Цей скін спричиняє додаткові втрати тиску, які виникають, коли товщина пласта не повністю розкрита перфорацією або свердловина не пробурена на всю ефективну товщину пласта. Конвергенція (сходження) потоку у стовбур свердловини, який частково розкритий, призводить до додаткових втрат тиску. Цей скін буде дорівнювати нулю, якщо вся товщина пласта буде перфорованою.

Скін-ефект відхилення стовбуру свердловини від вертикальної вісі (Deviation skin). Цей скін враховує додаткові втрати тиску, які виникають від конвергенції потоку у стовбур свердловини з причини його відхилення. Чим більший кут відхилення свердловини (від вертикалі) на глибині закінчування, тим більша площа охоплення потоку флюїду і тим менші втрати тиску та відхилення скін-ефекту.

Скін-ефект ущільненої/подрібненої зони (Compacted/Crushed zone skin). Подрібнена або ущільнена зона – це область зниженої проникності, створена навколо перфораційних каналів. Ця подрібнена зона утворюється через те, що надзвичайна сила, створювана перфорацією (гідропіскострумінна перфорація буде покращувати скін в цій зоні, а кумулятивна перфорація – навпаки, погіршувати), яка детонується у процесі перфорації, розсипає породу навколо перфораційних каналів.

Для дослідження впливу параметрів перфораційних каналів на продуктивність газових свердловин використовуємо гіпотетичну свердло-

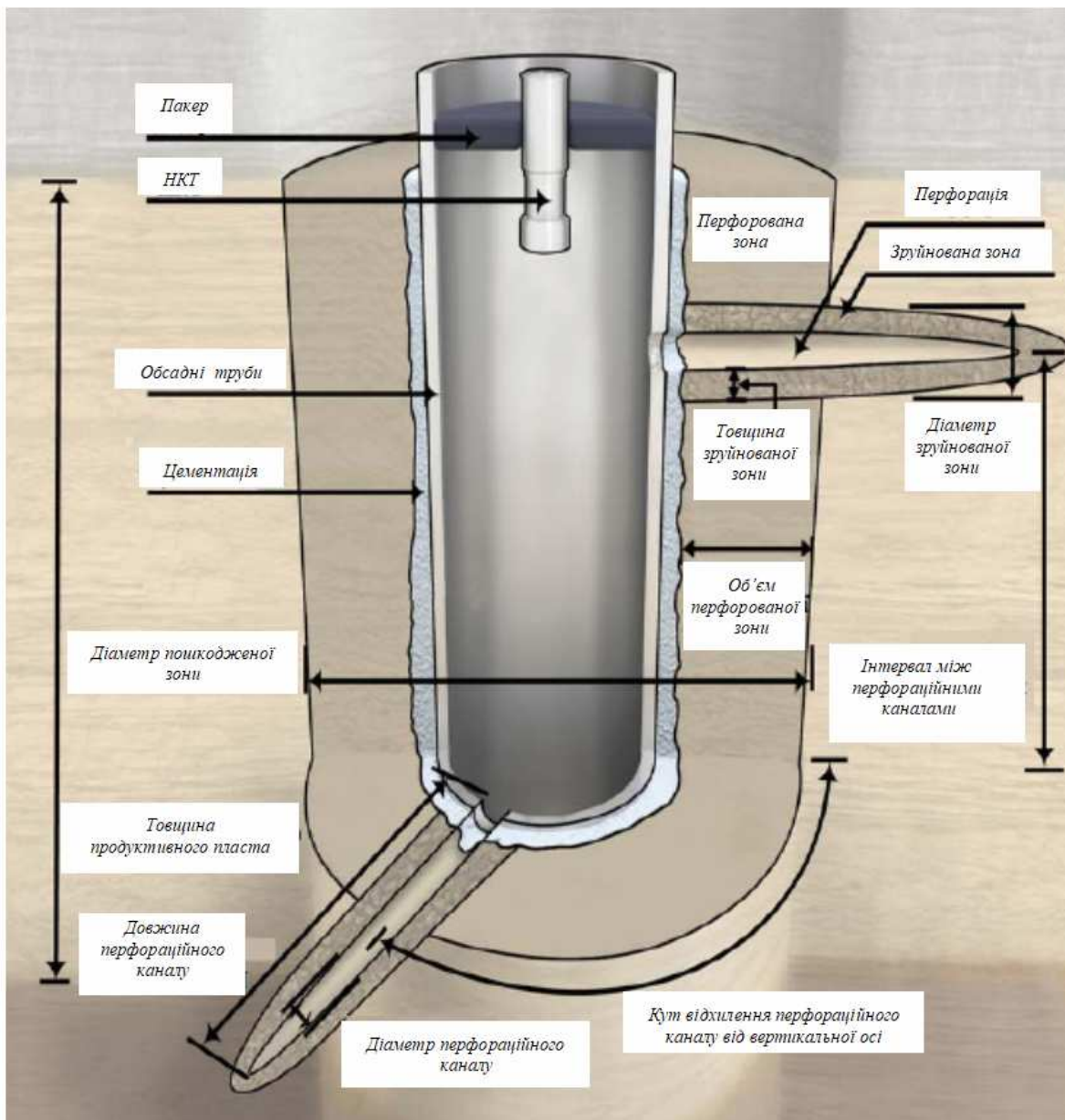


Рисунок 1 – Схема свердловини з перфорованою привибійною зоною

вину з такими параметрами: глибина обсадної колони – 3050 м; внутрішній діаметр експлуатаційної колони – 0,12 один метр; глибина опускання насосно-компресорних труб (НКТ) – 2900 м; внутрішній діаметр НКТ – 0,062 м; товщина стінки – 5,5 мм; глибина встановлення пакера – 2800 м; інтервал перфорації – 2890-2910 м; пластовий тиск – 20 МПа; гирловий тиск – 11,4 МПа; пластова температура – 335 К; товщина пласта – 20 м; діаметр свердловини – 0,2 м; горизонтальна проникність – 5 мД; вертикальна проникність – 0,5 мД; радіус зони дренажу свердловини – 600 м; температура на гирлі – 289 К; точка вузлового аналізу – 2900 м; дебіт газу – 115 тис.м³/доб; відносна густина газу – 0,6. Конструкція свердловини зображена на рисунку 2.

Подальші дослідження впливу визначальних параметрів на продуктивність газових свердловин виконано у програмі PipeSim компанії Schlumberger.

Результати дослідження

Проведено дослідження впливу параметрів розкриття пласта на скін-ефект забрудненої зони та перфорованої зони навколо перфорацийного каналу.

Досліджено вплив на скін-ефект різної товщини (0,05; 0,1; 0,25; 0,5; 0,75; 1; 2; 5 м) та проникності (0,5; 1; 2,5; 6; 10 мД) забрудненої зони. Результати досліджень зображено на рисунках 3, 4.

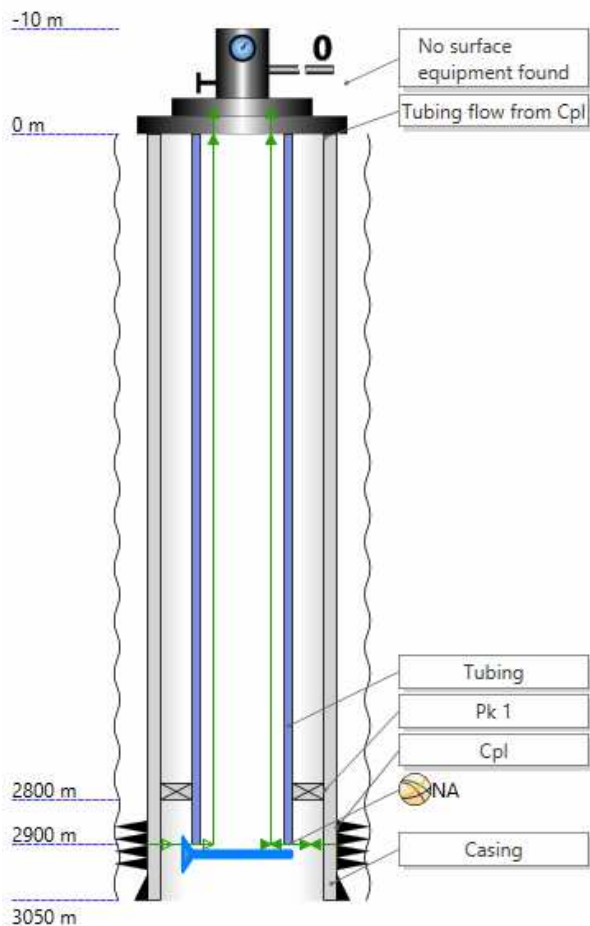


Рисунок 2 – Конструкція свердловини

На рисунках 3,4 спостерігається комплексна залежність складової скін-ефекту для забрудненої зони від досліджуваних параметрів. Так, зі зменшенням проникності забрудненої зони відносно проникності пласта значення скін-ефекту зростає. Зростання скін-ефекту посилюється збільшенням радіусу забрудненої зони. Водночас збільшення проникності забрудненої зони порівняно з пластовою проникністю призводить до від'ємного скін-ефекту, тобто відбувається покращення фільтраційних властивостей привибійної зони пласта.

Після статистичного аналізу (перетин дотичних) графічних залежностей (рисунки 3,4) отримано оптимальні значення проникності (k_d =один метрД) та товщини (h_d =1,5 м) забрудненої зони. Для цих параметрів значення скін-ефекту забрудненої зони дорівнює $S_d=11.09$.

Досліджено вплив на скін-ефект перфорованої зони навколо перфораційного каналу різної товщини (0,01; 0,025; 0,05; 0,075; 0,один метр) та проникності (0,5; 1; 2,5; 6; 10 мД) перфорованої зони, вище яких скін-ефект змінюється мало. Результати досліджень зображено на рисунках 5,6.

Результати графічних залежностей (рисунки 6, 7) свідчать про те, що із збільшенням проникності та товщини перфорованої зони спостерігається зниження скін-ефекту. У результаті статистичного аналізу графічних залежностей (рисунки 5, 6) отримано оптимальні значення проникності ($k_c=1,5$ мД) та товщини ($h_c=3$ см) перфорованої зони. Для цих параметрів значення скін-ефекту перфорованої зони дорівнює $S_c=-0,438$.

Для подальших розрахунків розглядаємо третій тип закінчування свердловин, тобто якщо свердловина перфорована. За основу у розрахунках використано оптимальні значення забрудненої та перфорованої зони, які були отримані вище.

Виконано дослідження впливу кількості перфораційних каналів на один метр розкритої товщини пласта, їх довжини та діаметру на продуктивність газових свердловин за моделлю *McLeod*.

Дослідження впливу кількості перфораційних каналів на дебіт газу видобувних свердловин виконано за відносного розкриття пласта $\bar{h}=1$, вертикальної проникності 0,5 мД, горизонтальної проникності 5 мД, довжини перфораційних каналів 0,2 м та діаметру 0,02 м. Результати досліджень зображено на рисунку 7.

Графічні залежності рисунку 7 оброблено за допомогою статистичного аналізу і отримано оптимальне значення кількості перфораційних каналів, яке становить 16.

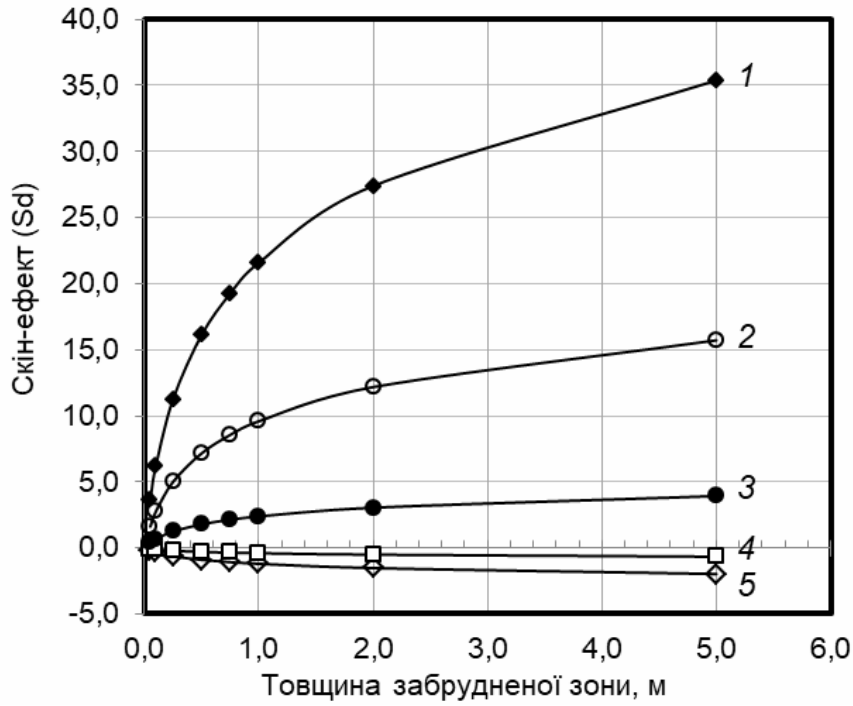
Подальші дослідження довжини перфораційних каналів виконані за кількості перфораційних каналів 16 на один метр розкритої товщини пласта, діаметром 0,02 м. Результати досліджень зображено на рисунку 8.

Згідно з результатами статистичного аналізу обробки графічних залежностей рисунка 8 отримано оптимальну довжину перфораційних каналів, яка становить 0,296 м.

Дослідження діаметру перфораційних каналів виконано за кількості перфораційних каналів 16 на один метр розкритої товщини пласта довжиною 0,296 м. Результати досліджень зображено на рисунку 9.

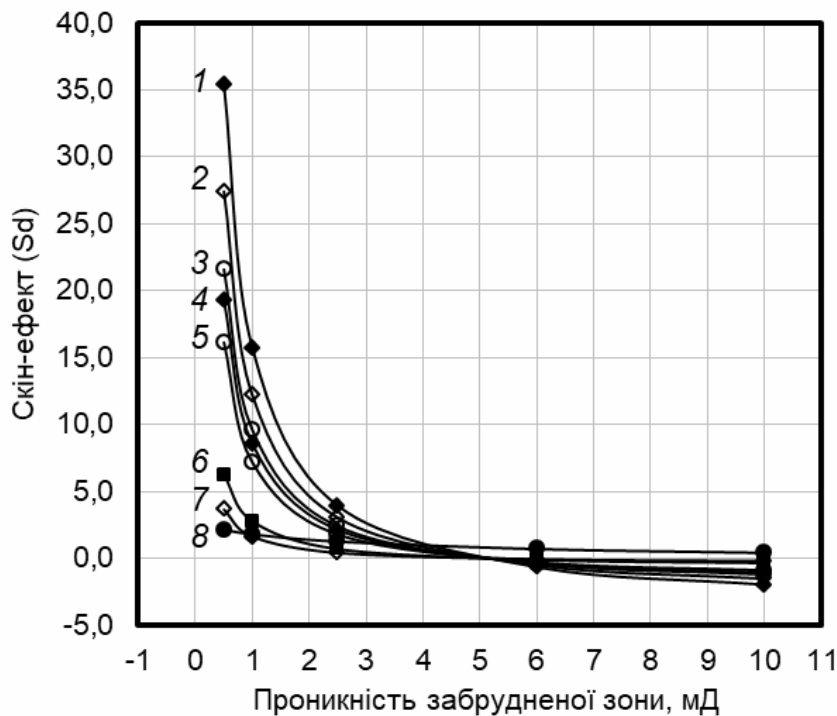
Аналізуючи графічні залежності рисунка 9 за допомогою статистичного аналізу, отримано оптимальне значення діаметру перфораційних каналів, яке становить 0,029 м.

Отримані значення параметрів перфораційних каналів є близькими до значень, які були теоретично досліджені авторами роботи [8].



1 – 0,5; 2 – 1; 3 – 2,5; 4 – 6; 5 – 10 мД

Рисунок 3 – Залежність скін-ефекту забрудненої зони від її товщини для різних значень проникностей



1 – 5; 2 – 2; 3 – 1; 4 – 0,75; 5 – 0,5; 6 – 0,25; 7 – 0,1; 8 – 0,05 м

Рисунок 4 – Залежність скін-ефекту забрудненої зони від її проникності для різних значень товщини

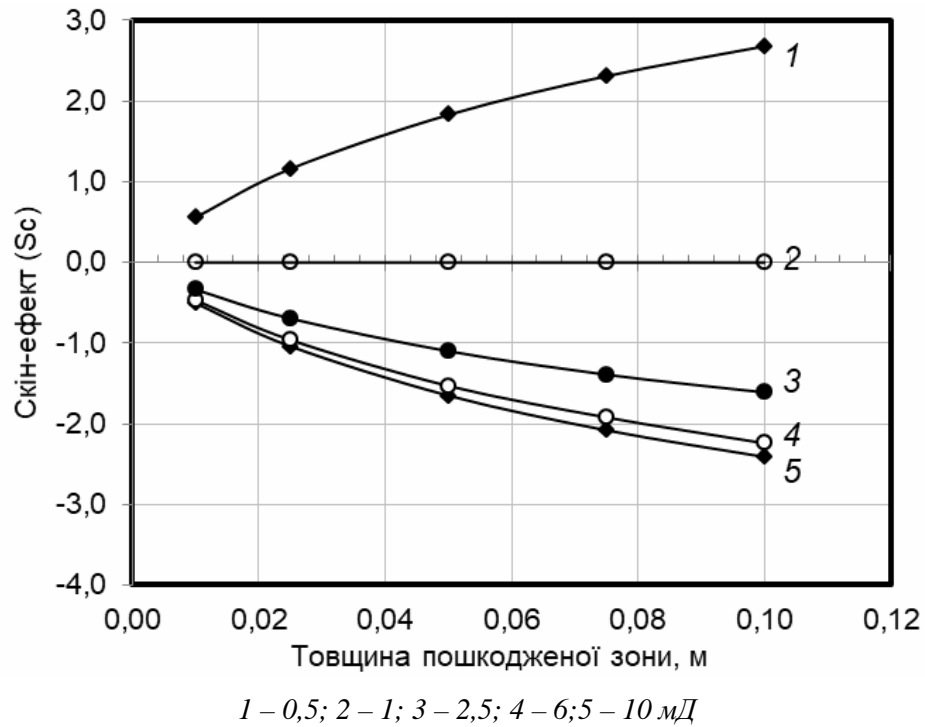


Рисунок 5 – Залежність скін-ефекту перфорованої зони від її товщини для різних проникностей

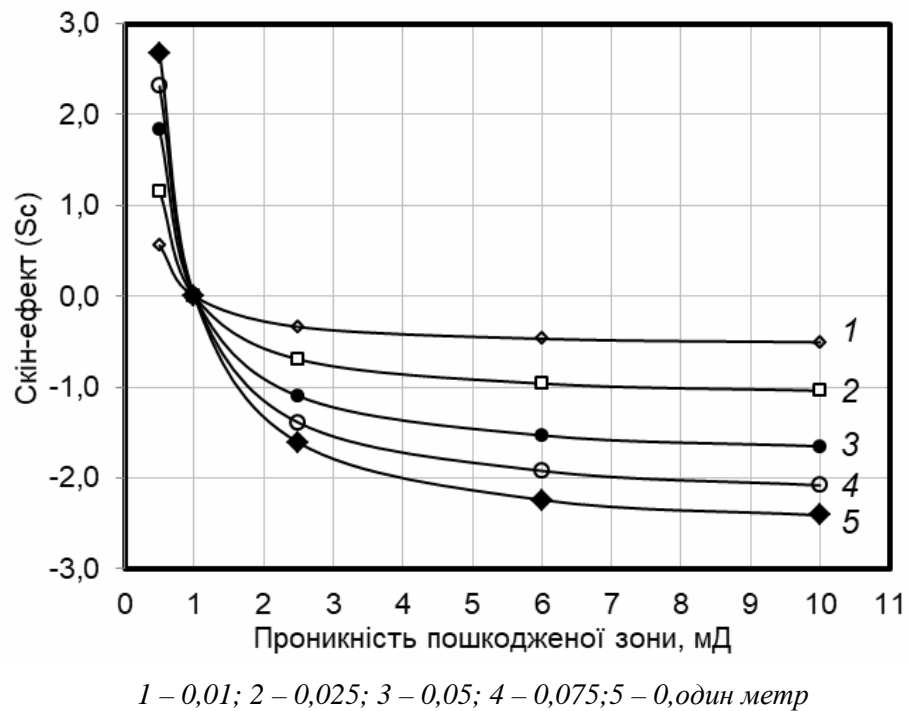


Рисунок 6 – Залежність скін-ефекту перфорованої зони від проникності для різної товщини перфорованої зони

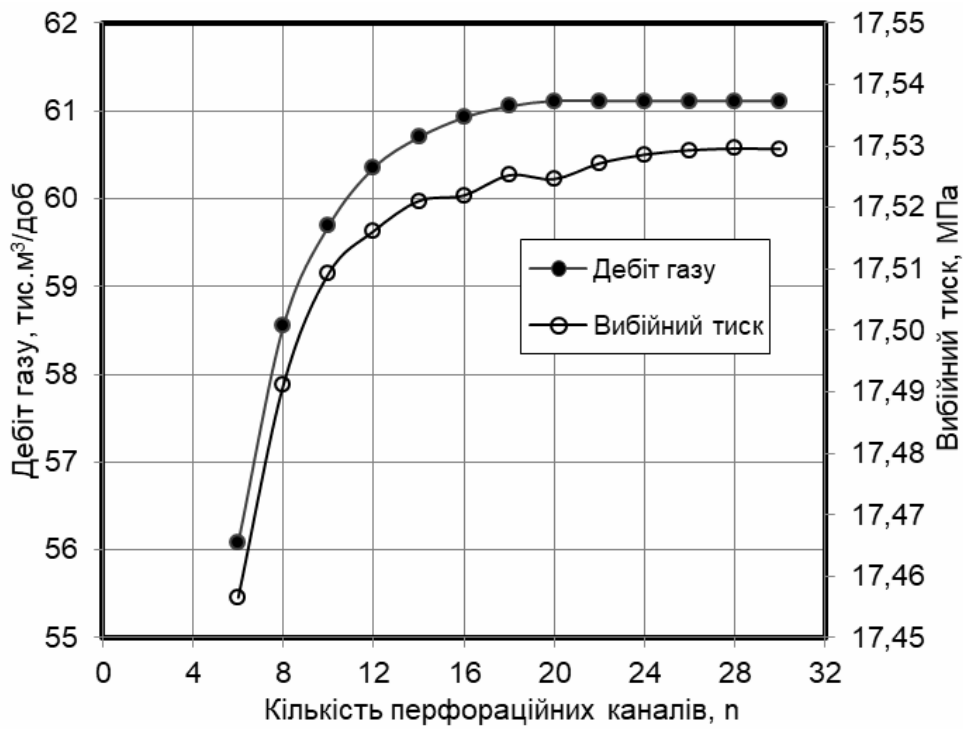


Рисунок 7 – Залежність дебіту газу та вибійного тиску від кількості перфораційних каналів на один метр розкритої товщини пласта

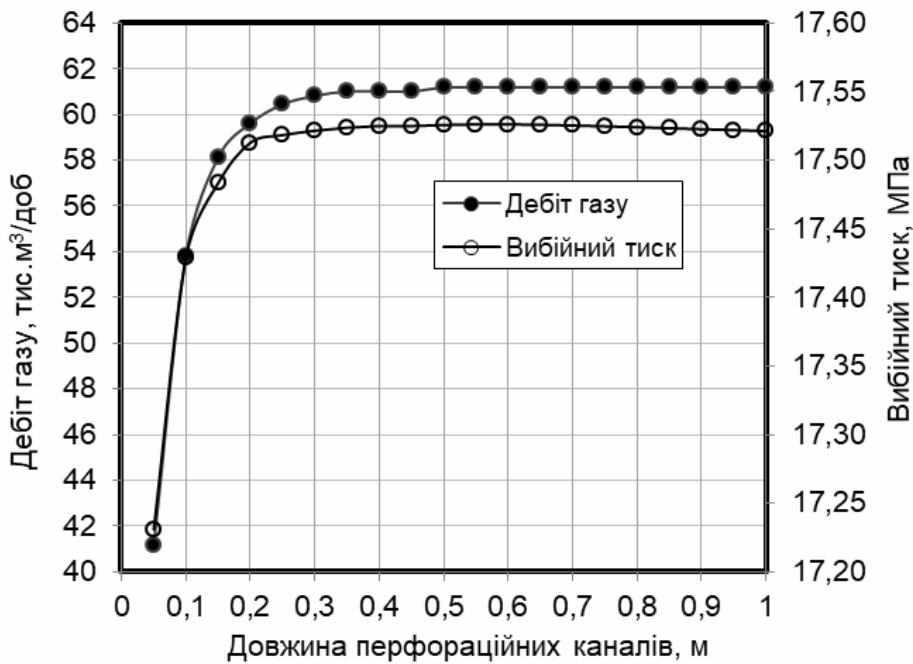


Рисунок 8 – Залежність дебіту газу та вибійного тиску від довжини перфораційних каналів

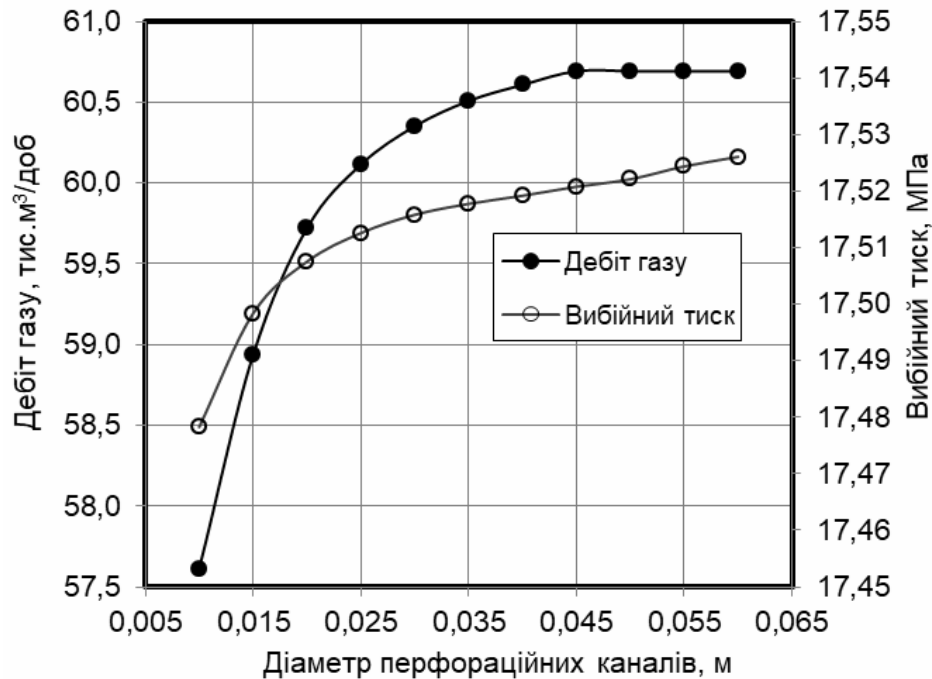


Рисунок 9 – Залежність дебіту газу та вибієного тиску від діаметру перфораційних каналів

Отже, використання програми PipeSim дає можливість оцінити вплив параметрів перфораційних каналів на продуктивність газових свердловин, а результати виконаних досліджень свідчать про значну збіжність між теоретичними розрахунками і за комп'ютеризованими програмами.

Висновки

З використанням результатів досліджень оцінено вплив на скін-ефект забрудненої і перфорованої зони та розмірів перфораційних каналів на продуктивність газових свердловин. Згідно з результатами досліджень встановлено оптимальне значення діаметру перфораційних каналів (0,029 м), їх довжини (0,296 м) та кількості перфораційних каналів на один метр розкритої товщини пласта (16 каналів). Найбільший вплив на дебіт видобувних свердловин має забруднення та розміри забрудненої привибієної зони пласта. Тому, для збільшення дебітів свердловин потрібно проводити заходи для покращення стану привибієної зони пласта та зменшення значення скін-ефекту.

Література

1. Ли Дж., Ваттенбаргер Р. А. Инжиниринг газовых резервуаров. М.: Изд-во «Газпром», 2014. 944 с.
2. Salavatov T. Sh., Dadashzade M. A., Aliyev I. N. Skin-Factor of Compressible Fluid at Radial Steady-State Filtration. *Science and Applied Engineering Quarterly*. London, 2017. Issue 14. P. 15–17.
3. Алиев И. Н. Влияние скин-зоны на процесс эксплуатации скважин. *Экоэнергетика*. Баку, 2017. № 4. С. 40–44.
4. Petroleum production systems / Michael J. Economides A. Daniel Hill, Christine Ehlig. Economides, 1994 by Prentice Hall PTR.
5. Справочное руководство по проектированию разработки и эксплуатации нефтяных месторождений / Под общ. ред. Ш. К. Гиматудинова. М.: Недра, 1983. 455 с.
6. Зазуляк О. М., Руцак В. Б. Спосіб оцінки стану привибієної зони пласта газових свердловин. *Нафтогазова галузь України*. 2015. № 4. С. 23–24.
7. <http://archiwum.inig.pl/INST/nafta-gaz/nafta-gaz/Nafta-Gaz-2009-07-03.pdf>.
8. Кондрат Р. М., Хайдарова Л. І. Дослідження впливу характеристик розкриття газоносних пластів перфорацією на видобувні можливості свердловини. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2019. № 4(73). С. 46–53.

References

1. Li Dzh., Vattenbarger R. A. Inzhiniring gazovykh rezervuarov. M.: Izd-vo «Gazprom», 2014. 944 p. [in Russian]
2. Salavatov T. Sh., Dadashzade M. A., Aliyev I. N. Skin-Factor of Compressible Fluid at Radial Steady-State Filtration. *Science and Applied Engineering Quarterly*. London, 2017. Issue 14. P. 15–17.
3. Alyev Y. N. Vliyanye skyn-zony na protsess ehkspluatatsyy skvazhyn. *Ehkoehnerhetyka*. Baku, 2017. No 4. P. 40–44. [in Russian]
4. Petroleum production systems / Michael J. Economides A. Daniel Hill, Christine Ehlig. Economides, 1994 by Prentice Hall PTR.
5. Spravochnoe rukovodstvo po proektirovaniyu razrabotki i ehkspluatsii neftyanykh mestorozhdenij / Pod obshch. red. Sh. K. Gimatdinova. M.: Nedra, 1983. 455 p. [in Russian]
6. Zazuliak O. M., Rushchak V. B. Sposib otsinky stanu pryvybiinoi zony plasta hazovykh sverdlovin. *Naftohazova haluz Ukrainy*. 2015. No 4. P. 23-24. [in Ukrainian]
7. <http://archiwum.inig.pl/INST/nafta-gaz/nafta-gaz/Nafta-Gaz-2009-07-03.pdf> [in Ukrainian]
8. Kondrat R. M., Khaidarova L. I. Doslidzhennia vplyvu kharakterystyk rozkryttia hazonosnykh plastiv perforatsiieiu na vydobuvni mozhlivosti sverdlovinny. *Rozvidka ta rozrobka naftovykh i hazovykh rodovyshch*. 2019. No No 4(73). P. 46-53. [in Ukrainian]