

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РОЗМІРУ І ПРОНИКНОСТІ ШТУЧНО СТВОРЕНОЇ ПРИСВЕРДЛОВИННОЇ ЗОНИ ПЛАСТА НА ПРОДУКТИВНУ ХАРАКТЕРИСТИКУ СВЕРДЛОВИНИ

Р.М. Кондрат, Н.С. Дремлюх

ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 727141,  
e-mail: public@nuing.edu.ua

Показано негативні наслідки винесення піску із пласта в стовбур свердловини. Розглянуто методи боротьби з піскопроявами. Високоєфективним методом запобігання надходженню піску із пласта в свердловину є застосування гравійних фільтрів. Наведено види гравійних фільтрів, умови їх застосування, вибір діаметра зерен гравію для створення гравійної набивки. Розглянуто різновиди технології встановлення гравійних фільтрів залежно від геолого-технічних умов пласта. Висвітлено технологію створення гравійно-наливних фільтрів у свердловині з відкритим вибоєм. Виконано теоретичні дослідження впливу розмірів і проникності гравійної набивки на продуктивну характеристику свердловини. За результатами теоретичних досліджень побудовано та проаналізовано графічні залежності у вигляді відношення дебітів газу за наявності і відсутності гравійної набивки від відношення проникностей гравійної набивки і продуктивного пласта та товщини гравійної набивки. За результатами виконаних досліджень обґрунтовано оптимальні значення радіуса гравійної набивки і відношення його проникностей і продуктивного пласта.

Ключові слова: нестійкі колектори, піскоутворення, гравійні фільтри, проникність і товщина гравійної набивки, дебіт свердловини.

Указаны отрицательные последствия выноса песка из пласта в ствол скважины. Приведены методы борьбы с пескопроявлением. Высокоэффективным методом предотвращения поступления песка из пласта в скважину является применение гравийных фильтров. Приведены виды гравийных фильтров, условия их применения, выбор диаметра зерен гравия для создания гравийной набивки. Рассмотрены разновидности технологий создания гравийных фильтров в зависимости от геолого-технических условий пласта. Описана технология создания гравийно-наливных фильтров в скважине с открытым забоем. Проведены теоретические исследования влияния размеров и проницаемости гравийной набивки на продуктивную характеристику скважины. По результатам теоретических исследований построены и проанализированы графические зависимости отношения дебитов газа при наличии и отсутствии гравийной набивки от отношения проницаемости гравийной набивки и продуктивного пласта и толщины гравийной набивки. По результатам выполненных исследований обоснованы оптимальные значения радиуса гравийной набивки и отношение ее проницаемости и продуктивного пласта.

Ключевые слова: неустойчивые коллекторы, пескообразование, гравийные фильтры, проницаемость и толщина гравийной набивки, дебит скважины.

Negative consequences of sand entry from the formation into the well were shown. Highly effective method of preventing the formation of sand entry into the well is the use of gravel filters. The gravel filter types and their application, the choice of the diameter of gravel grains for gravel pack were considered. The various gravel filter technologies, depending on the geological and technical conditions were analyzed. The technology of gravel and liquid filters in the hole with an open bottom hole was studied. Theoretical study of influence of the size and permeability of the gravel pack on the well productivity performance was performed. According to the results of theoretical studies the graphs of the relationship of gas flow rates in the presence and absence of a gravel pack on the ratio of the permeability of the gravel pack and reservoir and gravel pack thickness were plotted and analyzed. The results of the study justified the optimal values of the gravel pack radius and the permeability ratio of the gravel pack and reservoir.

Keywords: unstable manifolds, sand formation, gravel filters, gravel pack permeability and thickness, well production rate.

Однією з головних проблем, що виникає під час експлуатації свердловин із нестійкими породами-колекторами, є руйнування привибійної зони пласта (ПЗП). Винесення піску із пласта у свердловину часто супроводжується каверноутворенням у ПЗП і може призвести до змінання експлуатаційної колони, утворення на вибоях піщаних корків і прихоплення насосно-компресорних труб. В результаті знижується продуктивність свердловини і витрачаються значні кошти на ремонтні роботи з ліквідації негативних наслідків піскопроявів. У промисловій практиці основними методами боротьби з винесенням піску із пласта у свердловину є

кріплення порід у ПЗП закріплювачами різного складу і встановлення на вибої протипіщаних фільтрів різного типу.

### Аналіз вітчизняних і закордонних досліджень

Серед вибійних фільтрів для попередження винесення піску із пласта в свердловину найбільш ефективними є гравійні фільтри. До них належать фільтри, в яких фільтруюча поверхня складається із штучно уведеного гравію (піску), розміщеного навколо опорних фільтрів-каркасів [1].

Гравійні фільтри в Україні широко використовували, зокрема, на Архангельському газовому родовищі, Більче-Волицькому та Солохівському підземних сховищах газу, на Безіменному газовому родовищі (кінець 80-х – початок 90-х рр. минулого століття) та ін. [2] Гравійні фільтри достатньо довговічні – термін їх експлуатації становить до 5 років [3].

У промисловій практиці для боротьби з винесенням піску із пласта у свердловину широке застосування отримали гравійно-намівні фільтри. Такий фільтр є щільним фільтром-каркасом, кільцевий простір між яким і стінкою свердловини заповнюють гравієм [4].

Гравій заповнюють у привибійну зону пласта для [5]:

- 1) припинення або обмеження надходження піску із пласта у свердловину;
- 2) створення навколо свердловини зони підвищеної проникності;
- 3) кріплення відкритих стінок продуктивного пласта.

Одним із основних елементів гравійного фільтру є фільтр-каркас, який необхідний для створення оптимальних умов формування і роботи гравійної набивки, а також служить внутрішнім екраном для створеного гравійного масиву [1].

Гравійні фільтри можуть ефективно працювати тільки у випадку правильно підбраної ширини щілин або розмірів зерен гравію (крупнозернистого піску) з урахуванням гранулометричного складу пластового піску. Важливими є й інші параметри, зокрема характеристики гравію, ступінь ущільнення і якість матеріалу, конфігурація щілин і конструкція фільтрів [6].

Розмір зерен гравію вибирають на основі ситового аналізу взірців пластового піску. Основна умова – діаметр зерен гравію повинен перевищувати в десять разів розмір зерен піску, який складає продуктивний пласт [7].

У США під час вибору розміру зерен гравію для набивки, а також фільтра, зазвичай, керуються такими міркуваннями [8]: частинки гравію повинні бути не більше, ніж в 5-6 разів більшими частинок пластового піску, з винесенням яких ведеться боротьба; фільтр повинен ефективно затримувати найдрібніші частинки гравію; для гравійної набивки бажано використовувати гравій з округлими зернами.

Для гравійного набивання використовують пісок з розміром зерен 0,84-1,67 мм. Коли із свердловини виноситься пісок з вмістом дрібних фракцій в кількості 5% і більше, для набивання використовують дрібний пісок з розміром зерен 0,42-0,84 мм [6].

Залежно від геолого-технічних умов гравійно-намівні фільтри встановлюють у відкритому стовбурі, перфорованій частині обсадної колони або в розширеній привибійній зоні [6].

Дослідження У. Л. Пенберті ефективності створення гравійних фільтрів різними способами свідчать, що продуктивність свердловини з гравійним фільтром у відкритому стовбурі значно вища, ніж у свердловинах, в яких гравій набито в колоні і за перфорованими отворами [9].

Намівні гравійні фільтри у відкритому стовбурі свердловини встановлюють там, де міцність породи у привибійній зоні дає змогу розширити стовбур свердловини. Ці фільтри мають низькі фільтраційні опори і, як наслідок, вищу продуктивність порівняно із внутрішньоклонними гравійними фільтрами або кріпленням привибійної зони хімічними реагентами [1].

Найбільш ефективним і перспективним механічним способом запобігання піскопроявам є створення гравійних фільтрів у процесі закінчування свердловин бурінням [10]. Суть технології полягає в наступному. Свердловину бурять і закріплюють до покрівлі продуктивного горизонту, який розкривають долотом меншого діаметру. Після цього стовбур свердловини розширюють в продуктивному інтервалі, опускають фільтр з урахуванням перекриття продуктивного інтервалу і заповнюють гравій в розширений інтервал між пластом і фільтром.

При застосуванні гравійних фільтрів у свердловинах з відкритим вибоєм з градієнтом тиску  $< 10^{-2}$  МПа/м, який характеризує відношення пластового тиску  $p_{пл}$  до глибини свердловин, роботи проводять у такій послідовності [6]:

- а) розширюють стовбур свердловини в інтервалі пласта-колектора;
- б) з допомогою кавернометра уточнюють діаметр розширеної частини стовбура;
- в) збирають і опускають у свердловину на колоні НКТ вузол гравійного фільтра;
- г) ретельно промивають свердловину впродовж 5-6 циклів;
- д) проводять монтаж, обв'язку наземного обладнання і намівання гравію по затрубному простору в зафільтрований простір (закінчення процесу намівання встановлюють за різким збільшенням тиску нагнітання);

д) оцінюють кількість намітого гравію і після опускання свердловинного обладнання освоюють свердловину.

Стовбур свердловини розширюють гідравлічним розширювачем так, щоб товщина намітого гравійного масиву між фільтром-каркасом і пластом була не меншою 60-100 мм. При цьому використовують такі промивальні рідини, які не погіршують колекторські властивості пласта. Під час розкриття пласта-колектора і розширення стовбура свердловини застосовують пластову, мінералізовану або технічну воду з додаванням ПАР і загущувачів (КМЦ, ПАА та інші); крейдові розчини; розчини на нафтовій основі; різні емульсії. Після розширення стовбура свердловину ретельно промивають [6].

Згідно з даними роботи [11], чим менший є розмір частин гравію і більша товщина гравійної набивки, тим більший коефіцієнт продуктивності свердловини. Встановлено, що фільтри з товщиною гравійної набивки 30 мм більш ефективні порівняно з іншими фільтрами.

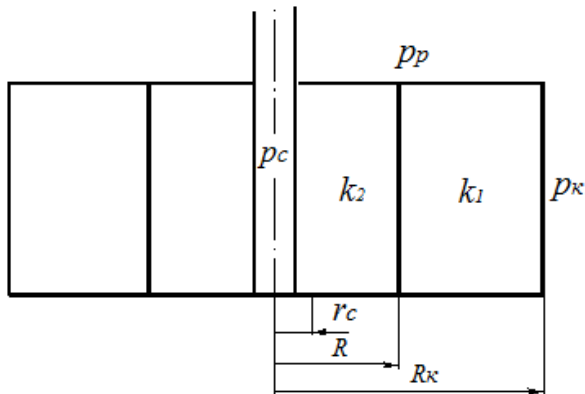
Досвід експлуатації гравійних фільтрів свідчить, що за часткового руйнування привибійної зони за рахунок винесення піску, ефективність використання фільтрів зменшується

[12]. Особливо це відноситься до продуктивних пластів, які представлені чергуванням незцементованих пісків з глинистими прошарками. Після руйнування піщаних пластів глинисті прошарки витискаються за рахунок гірничого тиску і забивають отвори фільтра, припиняючи приплив флюїду в свердловину.

Однією з причин недостатньої ефективності гравійних фільтрів є необґрунтований вибір параметрів гравійної набивки. В науково-технічній літературі відсутні дослідження про вплив розмірів і проникності гравійної набивки на продуктивну характеристику свердловини, що стало підставою для проведення додаткових досліджень.

**Методика досліджень і вихідні дані**

Розглянемо круговий пласт радіусом  $R_k$  з концентрично розміщеною свердловиною радіусом  $r_c$ , у привибійній зоні якої створено шар гравійної набивки радіусом  $R$  з іншим коефіцієнтом проникності  $k_2$ , ніж коефіцієнт проникності продуктивного пласта  $k_1$  (рисунок 1). Межа поділу зон перпендикулярна до лінії течій [13]. Газ, який надходить із пласта в свердловину, послідовно рухається пластом і проходить через гравійний фільтр.



**Рисунок 1 – Схема зонально-неоднорідного пласта з гравійною набивкою**

Дебіт газової свердловини при фільтрації реального газу за законом Дарсі за відсутності гравійного фільтра визначають за формулою:

$$q_o = \frac{\pi \cdot k_2 \cdot h \cdot T_{cm} (p_{nl}^2 - p_{вб}^2)}{\mu \cdot z \cdot p_{am} \cdot T_{nl} \left( \ln \frac{R_k}{r_c} \right)}, \quad (1)$$

- де  $k_1$  – коефіцієнт проникності пласта,  $m^2$ ;
- $h$  – товщина пласта,  $m$ ;
- $p_{nl}$  – пластовий тиск (тиск на відстані  $R_k$  від свердловини),  $Pa$ ;
- $p_{вб}$  – вибійний тиск,  $Pa$ ;
- $T_{nl}$  – пластова температура,  $K$ ;
- $R_k$  – радіус контуру живлення (радіус зони дренування свердловини),  $m$ ;
- $r_c$  – радіус свердловини за долотом,  $m$ ;

- $T_{cm}$  – стандартна температура,  $T_{cm} = 293 K$ ;
- $p_{am}$  – атмосферний тиск,  $p_{am} = 0,1013 \cdot 10^6 Pa$ ;
- $q_o$  – дебіт газу за стандартних умов,  $m^3/c$ ;
- $\mu$  – середнє значення динамічного коефіцієнта в'язкості газу,  $Pa \cdot c$ ;
- $z$  – середнє значення коефіцієнта стисливості газу, частка одиниці.

$$\mu = \frac{\mu(p_{nl}) + \mu(p_{вб})}{2}, \quad z = \frac{z(p_{nl}) + z(p_{вб})}{2}, \quad (2)$$

де  $z(p_{nl})$ ,  $z(p_{вб})$ ,  $\mu(p_{nl})$ ,  $\mu(p_{вб})$  – відповідно коефіцієнт стисливості і динамічний коефіцієнт в'язкості газу за пластової температури, пластового тиску  $p_{nl}$  і вибійного тиску  $p_{вб}$ .

Дебіт газової свердловини з гравійним фільтром визначають за формулою:

$$q_{грав} = \frac{\pi \cdot h \cdot T_{cm} (p_{nl}^2 - p_{вб}^2)}{\mu \cdot z \cdot p_{am} \cdot T_{nl} \left( \frac{1}{k_1} \ln \frac{R}{r_c} + \frac{1}{k_2} \ln \frac{R_k}{R} \right)}, \quad (3)$$

де  $k_2$  – коефіцієнт проникності зони навколо стовбура свердловини (проникність гравійної набивки),  $m^2$ ;

$R$  – радіус зони гравійної набивки (радіус зони з проникністю  $k_2$ ),  $m$ .

Проникність зони пласта поблизу стінки свердловини  $k_2$  відрізняється від проникності решти пласта  $k_1$ . Ця відмінність зумовлена наявністю навколо свердловини зони з підвищеною проникністю (гравійної набивки) для запобігання надходження піску із пласта у свердловину. Для оцінки впливу розміру і проникності привибійної зони з гравійною набивкою на дебіт свердловини порівнюємо дебіт газової свердловини з гравійним фільтром  $q_{грав}$  з дебітом тієї ж свердловини  $q_o$ , яка працює в аналогічних умовах, але без гравійного фільтра.

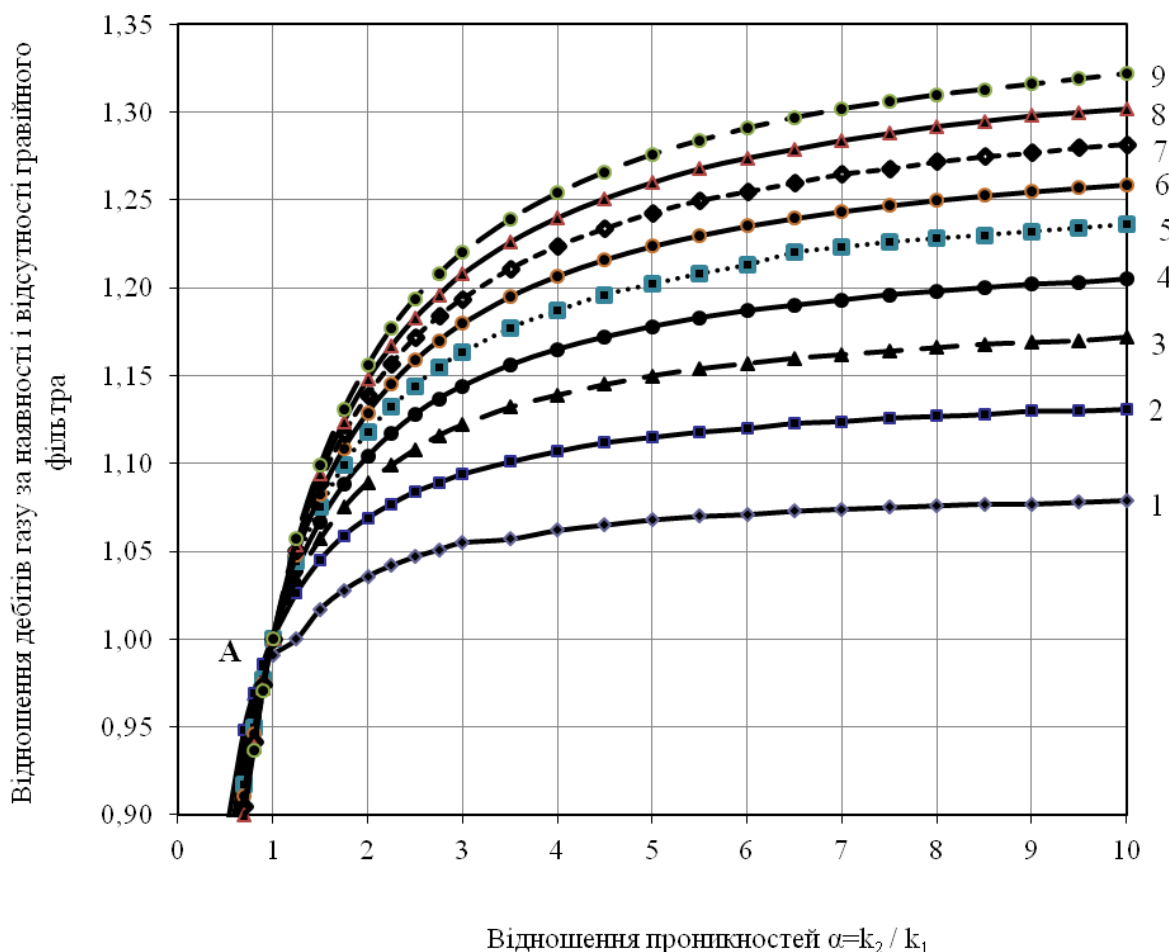
$$\frac{q_{грав}}{q_o} = \frac{\frac{1}{k_1} \ln \frac{R_k}{r_c}}{\frac{1}{k_1} \ln \frac{R_k}{R} + \frac{1}{k_2} \ln \frac{R}{r_c}} \quad (4)$$

або

$$\frac{q_{грав}}{q_o} = \frac{\ln \frac{R_k}{r_c}}{\frac{1}{k_1} \ln \frac{R_k}{R} + \frac{1}{\alpha} \ln \frac{R}{r_c}}, \quad (5)$$

де  $\alpha = \frac{k_2}{k_1}$  – відношення коефіцієнтів проникності гравійної набивки і продуктивного пласта.

З використанням залежності (5) виконано розрахунки впливу на продуктивну характеристику свердловини співвідношення коефіцієнтів проникності гравійної набивки  $k_2$  і продук-



1 – 0,2; 2 – 0,3; 3 – 0,4; 4 – 0,5; 5 – 0,6; 6 – 0,7; 7 – 0,8; 8 – 0,9; 9 – 1 м

**Рисунок 2 – Залежності відношення дебітів газу  $\frac{q_{grav}}{q_o}$  від відношення проникиностей  $\alpha = \frac{k_2}{k_1}$  для різних значень радіуса зони гравійної набивки  $R$**

тивного пласта  $k_1 \left( \alpha = \frac{k_2}{k_1} \right)$ , і радіуса гравійної набивки  $R$ .

Дослідження виконано для таких значень вихідних параметрів:

співвідношення проникиностей гравійної набивки і продуктивного пласта  $\alpha - 0,1; 0,5; 0,7; 0,8; 0,9; 1; 1,25; 1,5; 1,75; 2; 2,25; 2,5; 2,75; 3; 3,5; 4; 4,5; 5; 5,5; 6; 6,5; 7; 7,5; 8; 8,5; 9; 9,5; 10; 12; 20; 100;$

товщина гравійної набивки ( $R-r_w$ ) – 0,1; 0,15; 0,2; 0,25; 0,3; 0,35; 0,4; 0,45; 0,5; 0,55; 0,6; 0,65; 0,7; 0,75; 0,8; 0,85; 0,9 м;

радіус гравійної набивки  $R - 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1$  м) (радіус контуру живлення  $R_k = 500$  м).

**Результати досліджень**

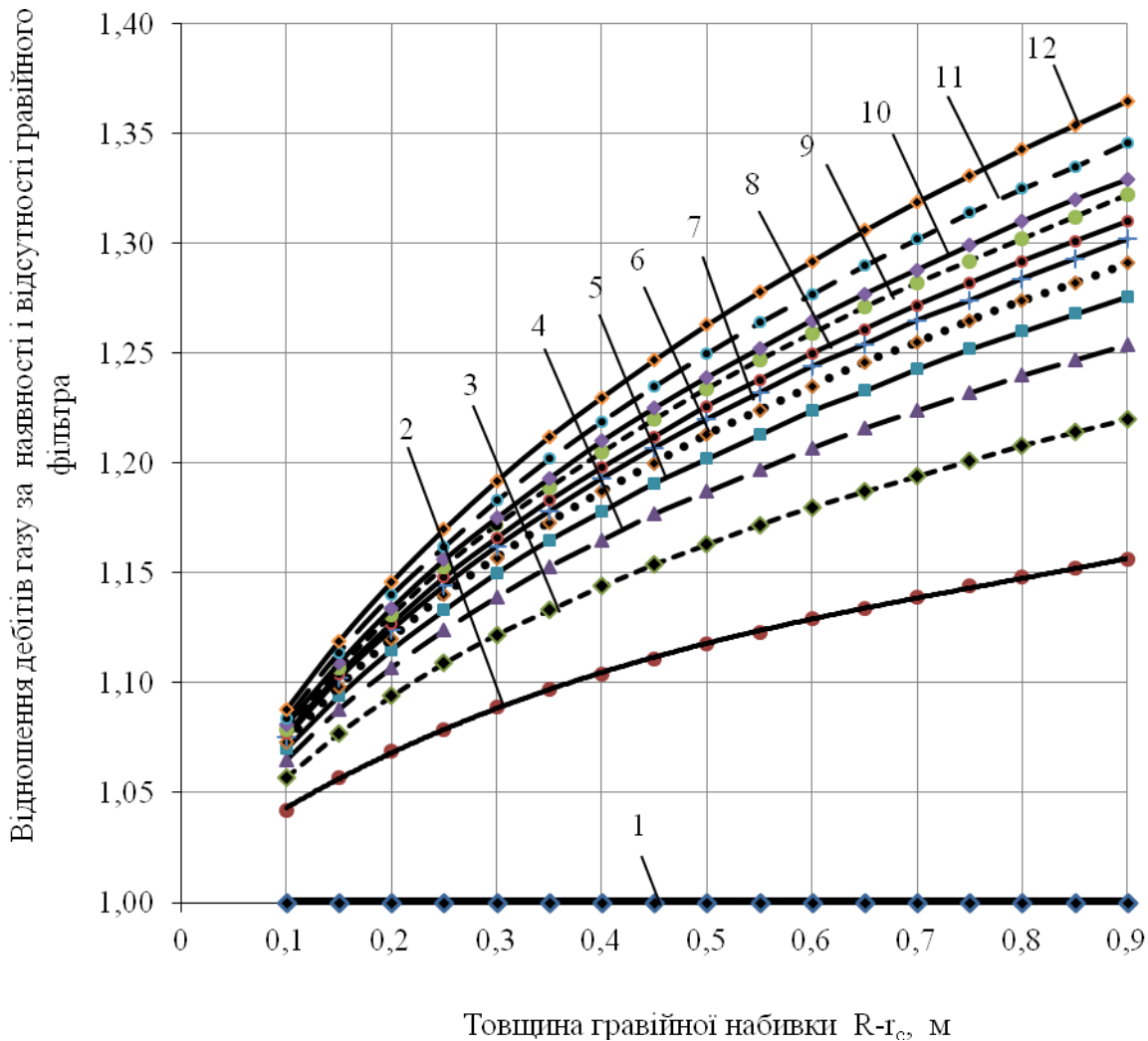
Результати розрахунків зображено на рисунках 2 і 3 у вигляді відношення дебітів газу за наявності і відсутності гравійної набивки від відношення проникиностей гравійної набивки і продуктивного пласта (рисунок 2) і товщини

гравійної набивки (рисунок 3) для різних значень радіуса гравійної набивки (рисунок 2) і співвідношення проникиностей гравійної набивки і продуктивного пласта (рисунок 3).

Аналіз результатів виконаних досліджень свідчить, що дебіт газової свердловини з гравійним фільтром зростає із збільшенням овщини і проникиності останнього (див. рис. 2 і 3).

Точка А на рисунку 2 відповідає умові рівності проникиностей гравійної набивки і продуктивного пласта. За значень проникиності гравійної набивки, менше проникиності пласта, дебіт газу різко зменшується. Така ситуація може мати місце при закупорюванні гравійного фільтра частинками твердої фази, що виноситься із пласта, або складниками технологічних рідин, які застосовують при ремонті свердловин. Тому в процесі експлуатації і ремонту свердловин дуже важливо запобігти забрудненню гравійного фільтра сторонніми інгредієнтами.

Наведені на рисунках 2 і 3 графічні залежності поступово виположуються із збільшенням відношення проникиностей гравійної набивки і продуктивного пласта і товщини (радіусу) гравійної набивки. За результатами статистичного



1 – 1; 2 – 2; 3 – 3; 4 – 4; 5 – 5; 6 – 6; 7 – 7; 8 – 8; 9 – 10; 10 – 12; 11 – 20; 12 – 100

**Рисунок 3 – Залежності відношення дебітів газу  $\frac{q_{grav}}{q_o}$  від товщини гравійного фільтра для різних значень відношень проникностей  $\delta = \frac{k_2}{k_1}$**

оброблення розрахунків всіх даних методом найменших квадратів для інтервалу зміни товщини гравійної набивки від 0,1 до 0,9 м значення відношення проникностей гравійної набивки і продуктивного пласта змінюється від 2,273 до 2,47, оптимальне значення відношення проникностей гравійної набивки і продуктивного пласта, вище якого дебіт газу мало змінюється, становить 2,39.

За результатами статистичного оброблення всіх даних методом найменших квадратів оптимальне значення товщини гравійної набивки, становить 0,41.

Цим співвідношенням слід керуватись при виборі діаметра зерен гравію для створення гравійного фільтра стосовно умов конкретного пласта-колектора.

Аналіз розрахункових даних свідчить про зростання дебіту газу.

Аналіз залежності на рисунку 3 свідчить, що дебіт газу зростає із збільшенням товщини гравійної набивки в розглянутому інтервалі її зміни до 0,9 м. При цьому вплив товщини гравійної набивки на дебіт газу зростає із збільшенням її проникності. Створення гравійної набивки великої товщини є технологічно складним і вимагає значних витрат. Тому товщину гравійної набивки слід вибирати такою, щоб градієнт тиску на її зовнішній межі у процесі експлуатації свердловин був меншим критичного градієнта тиску для руйнування порід відповідного типу.

## Висновки

Експлуатація свердловин з нестійкими колекторами ускладнюється руйнуванням привибійної зони пласта. Ефективним методом боротьби з піскоутворенням і підвищення продуктивності свердловин є застосування вибійних гравійних фільтрів. Результати виконаних досліджень свідчать, що дебіт свердловини з гравійним фільтром зростає із збільшенням його розміру і проникності. Найістотніше дебіт газу зростає із збільшення співвідношення проникностей гравійної набивки і продуктивного пласта до 2-х разів, а після 20-ти кратного збільшення співвідношення проникностей майже не змінюється. Із збільшенням товщини гравійної набивки дебіт газу поступово зростає. Проте створення гравійної набивки великої товщини є технологічно складним і економічно витратним. Тому його товщину слід вибирати такою, щоб в процесі експлуатації свердловин градієнт тиску на зовнішній межі гравійної набивки був меншим критичного градієнта тиску для руйнування породи.

## Література

- 1 Арестов Б.В. Разработка и исследование техники и технологии создания гравийных фильтров в скважинах [Текст] : дис. канд. техн. Наук : 21.12.87 / Арестов Борис Викторович. – Москва, 1987. – 175 с.
- 2 Вибір технологічних заходів для кріплення нестійких колекторів у свердловинах родовищ нафти і газу [Текст] / О. Г. Драчук, В. П. Гришаненко, Р. В. Тимах [та ін.] // Нафтогазова галузь України. – 2014. – № 5. – С.16-19.
- 3 Ясашин А.М. Ликвидация песчаных пробок в нефтяных скважинах [Текст] / А.М. Ясашин. – М. : Недра, 1964. – 150 с.
- 4 Кондрат Р.М. Особливості розробки та експлуатації Архангельського газового родовища і шляхи підвищення ефективності видобування газу та коефіцієнта газовилучення / Р.М. Кондрат, М.Б. Харитонов, О.Р. Кондрат, П.П. Мельничук // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2006. – №2. – С.66-69.
- 5 Иоаким Г. Добыча нефти и газа / Г. Иоаким. – М.: Недра, 1966. – 543 с.
- 6 Експлуатація свердловин у нестійких колекторах [Текст] : Монографія / В.С. Бойко, І.А. Франчук, С.І. Іванов, Р.В. Бойко. – Київ, 2004. – 400 с. – ISBN 966-694-012-4.
- 7 Паникаровский Е.В. Ликвидация пескопроявлений при эксплуатации скважин / Е.В. Паникаровский, В.В. Паникаровский, Я.Б. Бельтиков // Нефть и газ 2011. – №4. – С.50-54.
- 8 Борьба с пескопроявлениями // Нефтяная промышленность. Сер. нефтепромышленное дело. – М.: ЭИ ВНИИОЭНГ, 1984. – №1. – С.17-20.
- 9 Penberthy W. L., Cope B. I. Design and productivity of gravel-packed completion 1980.
- 10 Басарыгин Ю.М. Теория и практика предупреждения осложнений и ремонта скважин при их строительстве и эксплуатации [Текст] : [справ. пособие]: у 6 т. / Ю.М. Басарыгин, В.Ф. Будников, А.И. Булатов. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2003. – Т. 5. – 2006. – 431 с.: ил., табл. – ISBN 5-8365-0156-4.
- 11 D. Fucheng, D. Jingen, Y. Ying, W. Lihua, Y. Wei Gravel pre-packed screen development and filled parameters optimization research // Научные труды. – 2012. – №4. С. 20-29
- 12 Peacock R. H. Gravel packing experience with Miocene sand completions // World Oil. – 1961. – №1. –С. 61-64.
- 13 Бойко В.С. Підземна гідрогазомеханіка: підручник / В.С. Бойко, Р.В. Бойко. – Львів: Апріорі, 2007. – 452 с.

Стаття надійшла до редакційної колегії  
05.04.16

Рекомендована до друку  
професором Чудиком І.І.  
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)  
д-ром техн. наук Акульшиним О.О.  
(ПАТ «Український нафтогазовий інститут»,  
м. Київ)