

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ШВИДКОСТІ ВИНЕСЕННЯ ГАЗОВИМ ПОТОКОМ ТВЕРДОЇ ФАЗИ З ВИБОЮ СВЕРДЛОВИНИ НА ПОВЕРХНЮ

Р.М. Кондрат, Н.С. Дремлюх, А.В. Угриновський, А.І. Ксеніч

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

Показано негативні наслідки надходження піску із пласта в свердловину. Розглянуто причини, які призводять до руйнування привибійної зони у процесі експлуатації свердловин з нестійкими колекторами. Описано сили, які діють на частинку піску в газовому потоці у стовбурі свердловини. Наведено теоретичні залежності для визначення критичної швидкості винесення твердої фази потоком газу з вибою свердловини на поверхню. На лабораторній моделі свердловини проведено експериментальні дослідження швидкості винесення газовим потоком твердої фази із моделі свердловини. За результатами експериментальних досліджень побудовано та проаналізовано графічну залежність швидкості винесення потоком газу частинок піску від їх розміру. Зіставлено результати експериментальних досліджень і теоретичних розрахунків за формулами різних авторів критичної швидкості винесення потоком газу твердої фази із свердловини.

Ключові слова: частинки піску, потік газу, критична швидкість, модель свердловини.

Показано отрицательные последствия поступления песка из пласта в скважину. Рассмотрены причины, которые приводят к разрушению призабойной зоны в процессе эксплуатации скважин с неустойчивыми коллекторами. Описаны силы, воздействующие на частицу песка в газовом потоке в стволе скважины. Приведены теоретические зависимости для определения критической скорости выноса твердой фазы потоком газа из забоя скважины на поверхность. На лабораторной модели проведены экспериментальные исследования скорости выноса газовым потоком твердой фазы с модели скважины. Сопоставлены результаты экспериментальных исследований и теоретических расчетов по формулам различных авторов критической скорости выноса потоком газа твердой фазы из скважин.

Ключевые слова: частицы песка, поток газа, критическая скорость, модель скважины.

Negative consequences of sand entry from the formation into the well were shown. The causes, which lead to the bottomhole zone destruction when operating wells with unstable reservoirs, were considered. The forces acting on the sand particles in the gas flow in the wellbore were described. The theoretical dependences for determining the critical velocity for removal of solids by gas flow from the well bottomhole onto the surface were developed. The experimental studies the gas flow velocity removing solids from the well bottomhole were conducted with the help of the laboratory well model. Based on the results of the experimental studies, the graphical dependence of the gas flow velocity removing sand particles on their dimensions was developed and analyzed. The results of the experimental studies and theoretical calculations were compared on the basis of different authors' formulas of critical velocity for removal of solids by gas flow from the well bottomhole.

Keywords: sand particles, gas flow, critical velocity, well model.

Постановка проблеми дослідження

Більшість родовищ природних газів України вступила в завершальну стадію розробки, яка характеризується істотним зниженням пластового тиску, низькодебітністю свердловин, активним обводненням видобувних свердловин, руйнуванням привибійної зони пласта та рядом інших негативних чинників.

Однією з проблем експлуатації газових свердловин з нестійкими породами-колекторами, є руйнування привибійної зони пласта і надходження в свердловину піску, що призводить до утворення піщаних корків. Піщані корки перекривають інтервал перфорації, в результаті зменшується дебіт свердловини і порушується режим її роботи [1]. В окремих випадках відбувається прихоплення піщаним корком нижньої частини колони НКТ.

Причини, які призводять до руйнування привибійної зони пласта в процесі експлуатації свердловин у нестійких колекторах, можна поділити на три основні групи, виходячи з умов їх

виникнення: геологічні (особливості залягання пласта-колектора, літологія), технологічні (умови розкриття пластів та експлуатації свердловин) і технічні (конструкція вибою) [2-4].

Стійкість порід до руйнування характеризується наявністю сил тертя і сил зчеплення між частинками породи. Для кожної породи існує критичне значення швидкості фільтрації і градієнту тиску, перевищення яких призводить до її руйнування [5].

За високих градієнтів тиску і недостатньої міцності цементуючого матеріалу зерна піско-вика відокремлюються від основного масиву і виносяться в свердловину. За недостатніх швидкостей руху газу (нафти) на вході в НКТ частинки породи осідають на вибої свердловини з утворенням піщаного корка, який створює додатковий опір рухові пластових флюїдів. Водночас корок може не утворитися, якщо швидкість руху газу на вході в насосно-компресорні труби буде вище критичної, при якій швидкість висхідного потоку газу в НКТ дорівнює

Таблиця 1 – Емпіричні залежності для визначення коефіцієнта C_D

Значення числа Рейнольдса (Re)	Емпіричні залежності
$Re < 0,01$	$C_D = \frac{3}{16} + \frac{24}{Re}$
$0,01 < Re < 20$	$C_D = \frac{24}{Re} \left(1 + 0,1315 Re^{0,82 - 0,05 \log_{10} Re} \right)$
$20 < Re < 260$	$C_D = \frac{24}{Re} \left(1 + 0,19355 Re^{0,6305} \right)$
$Re < 10^5$	$C_D = \frac{24}{Re} + 0,67 \sqrt{C_D}$

швидкості падіння піщинки під дією сили тяжіння [6].

Для стабільної роботи свердловини необхідно забезпечити повне і своєчасне видалення частинок породи з вибою свердловини на поверхню. Це може бути досягнуто збільшенням швидкості руху газу на вході в НКТ вище критичної швидкості. Для оцінювання величини критичної швидкості руху газу, необхідної для винесення частинок піску з вибою на поверхню, розглянемо баланс сил, які діють на тверді частинки в потоці газу у стовбурі свердловини.

Розглянемо потік газу у стовбурі свердловини, який рухається знизу вгору, обтікаючи тверду частинку піску діаметром $d_{\text{ч}}$.

На тверду частинку піску в потоці газу в стовбурі свердловини діє сила напору газу R , яку визначають за формулою [7]:

$$R = C_D F_{\text{ч}} \rho_{\text{г}} \frac{W_{\text{г}}^2}{2}, \quad (1)$$

де C_D – коефіцієнт опору, який залежить від режиму руху газу;

$W_{\text{г}}$ – швидкість руху газового потоку, м/с;

$\rho_{\text{г}}$ – густина газу за вибірного тиску і пластової температури, кг/м³;

$F_{\text{ч}} = \frac{\pi d_{\text{ч}}^2}{4}$ – площа поперечного перерізу частинки піску в площині перпендикулярній поздовжній осі потоку газу, м²;

$d_{\text{ч}}$ – діаметр частинки піску, м.

Густину газу за вибірного тиску і пластової температури можна розрахувати за формулою [8]:

$$\rho_{\text{г}} = \rho_{\text{г,ст}} \frac{p_{\text{виб}} \cdot T_{\text{ст}}}{z_{\text{виб}} \cdot p_{\text{ат}} \cdot T_{\text{пл}}}, \quad (2)$$

де $\rho_{\text{г,ст}}$ – густина газу за стандартних умов, кг/м³;

$p_{\text{виб}}$ – тиск на вибої свердловини, МПа;

$T_{\text{пл}}$ – температура на вибої свердловини, К;

$T_{\text{ст}}$ – температура за стандартних умов, К;

$p_{\text{ат}}$ – атмосферний тиск, МПа;

$z_{\text{виб}}$ – коефіцієнт стисливості газу за вибірного тиску і пластової температури.

Значення коефіцієнта C_D , який характеризує процес обтікання газом частинки піску, залежить від числа Рейнольдса. Слід зазначити, що значення коефіцієнта C_D визначається за різними закономірностями при різних діапазонах значень числа Рейнольдса, тобто при різних режимах обтікання частинки піску газовим потоком.

Емпіричні залежності для визначення значень коефіцієнта C_D наведено в роботах [7, 9] і відображено в таблиці 1.

На частинку піску, яка знаходиться в потоці газу в стовбурі свердловини, діє сила ваги частинки, яку визначають за формулою [7]:

$$G = \frac{\pi d_{\text{ч}}^3}{6} g (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{г}}), \quad (3)$$

де $\rho_{\text{ч}}$ – густина частинки піску, кг/м³.

Залежно від співвідношення сили ваги частинки G і сили напору газового потоку R частинка піску може підніматися вгору або опускатися. Може мати місце випадок, коли частинка піску буде знаходитися в стані рівноваги за рівності сил, які на неї діють:

$$R = G. \quad (4)$$

Цей випадок називають зависанням частинки.

Запропоновано ряд залежностей для визначення критичної швидкості руху газу для винесення частинок піску з вибою свердловини на поверхню.

Критичну швидкість руху газу можна визначити за формулою [7]:

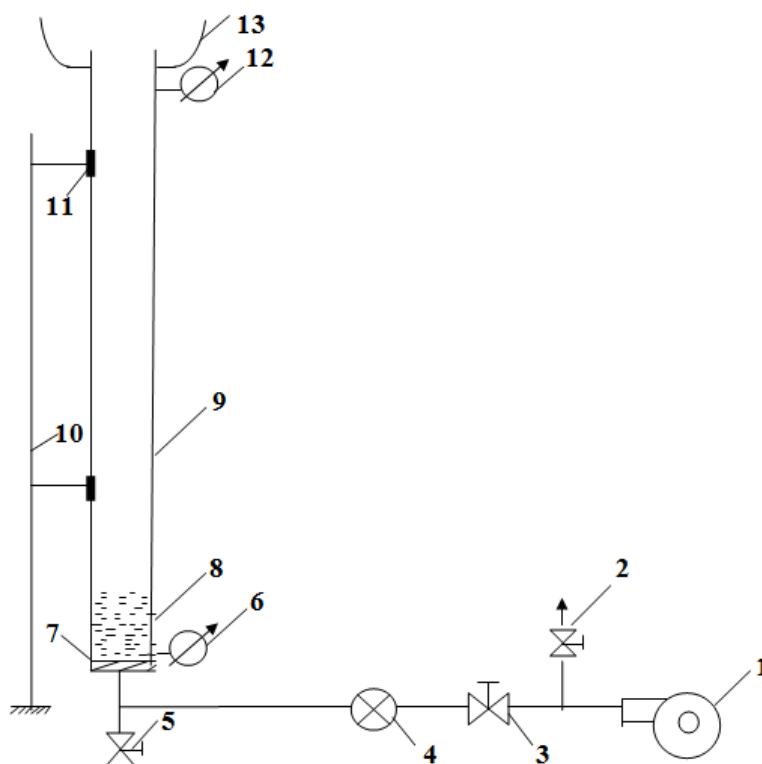
$$W_{\text{кр}} = \sqrt{\frac{4}{3} g \frac{d_{\text{ч}} (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{г}})}{C_D \rho_{\text{г}}}} = 3,62 \sqrt{\frac{d_{\text{ч}} (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{г}})}{C_D \rho_{\text{г}}}}. \quad (5)$$

Критичну швидкість руху газу визначають за формулою Ріттинґера [10]:

$$W_{\text{кр}} = \sqrt{\frac{2 (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{г}}) g d_{\text{ч}}}{3 \rho_{\text{г}} \varphi}} = 2,557 \sqrt{\frac{(\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{г}}) d_{\text{ч}}}{\rho_{\text{г}} \varphi}}, \quad (6)$$

де φ – аеродинамічний коефіцієнт ковзання, величина якого залежить від форми частинок породи, для частинок кульової форми $\varphi = 0,25$.

Критичну швидкість руху газу залежно від режиму руху газового потоку визначають також за формулами [11]:



1 – відцентровий компресор; 2, 3, 5 – сферичні крани; 4 – аналоговий давач витрати газу АWM720P1; 6, 12 – аналогові давачі тиску; 7 – дротяний фільтр; 8 – піщаний корок; 9 – скляна колонка; 10 – штатив; 11 – монтажні кріплення; 13 – смітник для винесеного піску

Рисунок 1 – Схема лабораторної установки для дослідження умов винесення частинок піску із моделі свердловини

ламінарний режим руху
 $Re \leq 2$ або $Ar \leq 36$

$$W_{крт} = d_u^2 \cdot g \cdot \frac{(\rho_u - \rho_z)}{18\mu_z}, \quad (7)$$

перехідний режим руху
 $2 < Re \leq 500$ або $36 < Ar \leq 83000$

$$W_{крт} = \frac{0,78 \cdot d_u^{0,43} \cdot (\rho_u - \rho_z)^{0,715}}{\rho_z^{0,285} \cdot \mu_z^{0,43}}, \quad (8)$$

турбулентний режим руху
 $Re > 500$ або $Ar > 83000$

$$W_{крт} = 5,46 \cdot \sqrt{\frac{d_u \cdot (\rho_u - \rho_z)}{\rho_z}}, \quad (9)$$

де Re – число Рейнольдса;
 Ar – число Архімеда.
 Числа Рейнольдса та Архімеда визначають за формулами [4]:

$$Re = W \cdot d_u \cdot \frac{\rho_z}{\mu_z} \quad \text{або} \quad Re = 1777 \frac{q \cdot \bar{p}_z}{d \cdot \mu_z}, \quad (10)$$

$$Ar = d_u^3 \cdot \rho_z \cdot g \cdot \frac{(\rho_u - \rho_z)}{\mu_z^2}. \quad (11)$$

Для підняття частинок піску на поверхню необхідно, щоб швидкість газового потоку перевищувала критичну швидкість більше 20% [9].

Для порівняння між собою критичних швидкостей руху газу за формулами вказаних авторів, які необхідні для попередження скуп-

чення піщинок на вибої, і співставлення їх з експериментальними даними виконано відповідні дослідження.

Опис експериментальної установки і методики дослідження

Для вивчення процесу очищення від піщаного корка вибою газових і газоконденсатних свердловин розроблено лабораторну установку, принципову схему якої зображено на рисунку 1.

Важливим елементом установки є колонка 9 із зовнішнім діаметром 25 мм і довжиною 0,9 м. Колонка виготовлена із скла, що дає змогу здійснювати візуальний контроль за процесами всередині колонки. Колонка закріплена за допомогою двох кріплень до штатива 10.

Для нагнітання газу в колонку використано компресор 1 відцентрового типу, для перепускання надлишку газу в атмосферу, служить сферичний кран 2. За допомогою сферичного крану 3 здійснюється додаткове регулювання величини витрати газу, що подається в колонку. В нижній частині колонки розміщений дротяний фільтр 7. Перед подачею газу в колонку 9 засипали кварцовий пісок.

Реєстрацію тиску в нижній (перед корком) та у верхній частинах колонки здійснювали за допомогою аналогових давачів диференційного перепаду тиску 6 і 12.



Рисунок 2 – Загальний вигляд експериментальної установки для дослідження умов винесення частинок піску із моделі свердловини

Передача даних із датчиків на комп'ютер здійснюється за допомогою мікроконтролерного блоку керування з подальшим їх конвертуванням в середовище Microsoft Excel.

Згідно з схемою (рисунок 1) змонтовано експериментальну установку для дослідження умов винесення частинок піску з вибою свердловини на поверхню, загальний вигляд якої зображено на рисунку 2.

Експериментальні дослідження для визначення швидкості винесення піщинок з вибою

свердловини на поверхню проводили у такій послідовності.

1. Здійснювали підготовку кварцового піску наступним чином. Висушений зразок породи подрібнювали на кусочки, не руйнуючи окремих зерен, і обробляли 10%-м розчином соляної кислоти для видалення карбонатів. Після цього зразок розтирали у фарфоровій чашці з одночасним промиванням водою для видалення глинистої фракції. Відміту породу висушували, зважували і просіювали через набір сит протягом 15 хв.

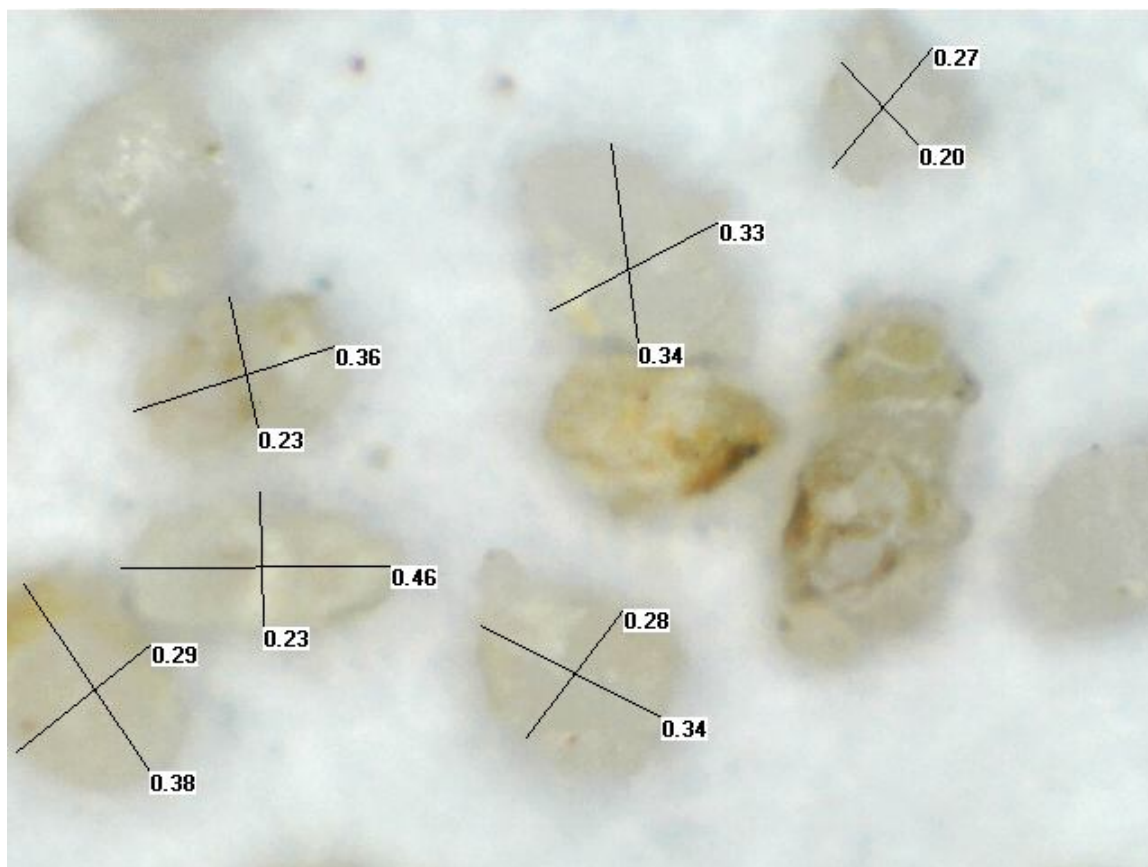


Рисунок 3 – Розміри частинок піску, які виносились в діапазоні швидкостей руху газового потоку 1,876–3,282 м/с

2. Засипали підготовлену фракцію піску у скляну колонку 9.

3. Здійснювали нагнітання газу в нижню частину колонки 9 за допомогою компресора 1, послідовно збільшуючи швидкість руху газу від 1 до 10,2 м/с.

4. За допомогою аналогового давача АWM720P1 4 вимірювали витрату газу.

5. Реєстрацію тисків в нижній (перед корком) та у верхній частинах колонки здійснювали за допомогою аналогових давачів диференційного перепаду тиску 6 і 12.

6. Винесені частинки піску збирали в ємності 13 і зважували на електронній вазі.

7. Дослід закінчували коли виносився весь пісок.

Результати досліджень

У процесі проведеного експерименту з фракцією піску з діаметром частинок 0,1–0,315 мм найперше виносилась найдрібніша фракція піску з діаметром частинок 0,101–0,14 мм в діапазоні швидкостей руху газового потоку 0,295–0,985 м/с. Масова частка винесеної фракції піску склала 18,75%.

В діапазоні швидкостей руху газового потоку 0,985–1,876 м/с спостерігали винесення фракції піску з діаметром частинок 0,17–0,22 мм, в кількості 26,92 % мас.

Остання масова частка фракції 54,33 % з діаметром частинок 0,23–0,315 мм винеслась

при досягненні швидкостей руху газового потоку 1,876–3,289 м/с.

Діаметр частинок піску, які виносились, визначали за допомогою електронного мікроскопа USB DIGITAL MICROSCOPE. Частинки піску з вказаним діаметром, які виносились під час експерименту зображені на рисунку 3.

Аналогічні дослідження проведено для піску з діаметром частинок 0,315–0,63 мм і 0,63–1 мм. Результати експериментів занесено в таблицю 2.

На рисунку 4 зображено фотографію скляної колонки моделі свердловини при винесенні частинок піску газовим потоком.

На рисунку 5 наведено співставлення експериментально визначених і розрахованих за формулами різних авторів критичних швидкостей руху газу для винесення частинок піску потоком газу.

Згідно з результатами досліджень швидкість винесення частинок піску з вибою моделі свердловини на поверхню газовим потоком змінюється в межах 0,985 – 10,5 м/с за експериментальними даними і 1,49–9,74 м/с за теоретичними залежностями. Для значень діаметрів частинок піску 0,1; 0,315; 0,63; 1 мм швидкість руху газу (повітря), яка необхідна для їх винесення, становить відповідно 0,985; 4,4065; 8,54; 10,2 м/с.

За експериментальними даними залежність швидкості винесення частинок піску від їх діаметру описується рівнянням:

Таблиця 2 – Результати експериментів з дослідження швидкості винесення частинок піску газовим потоком з моделі свердловини

Швидкість винесення частинок піску, м/с	Діаметр частинок піску, мм	Масова частка винесеного піску, %
Фракція піску діаметром 0,315 – 0,63 мм		
4,4065	0,3-0,31	25,71
7,732	0,375-0,52	50,12
8,54	0,585-0,63	24,17
Фракція піску діаметром 0,63 – 1 мм		
8,95	0,68-0,78	24,96
9,387	0,78-0,86	53,33
10,2	0,96-0,98	21,71



Рисунок 4 – Винесення частинок піску потоком газу у ході експерименту

$$W = 11,63d_q^3 - 33,68d_q^2 + 36d_q - 3,859, \quad (12)$$

d_q , мм; W , м/с.

Із збільшенням розміру частинок піску залежність $W = f(d_q)$ поступово виположується.

Розрахункові значення швидкості руху газу для винесення твердої фази за формулами (6) і (9) майже співпадають, а за формулою (5) в області діаметрів частинок піску до 0,5 мм дещо занижуються порівняно з результатами розрахунків за формулами (6) і (9) і потім співпадають.

При діаметрах частинок піску до 0,4 мм експериментальні і визначені за формулою (5) значення критичної швидкості руху газу мало відрізняються між собою, а при діаметрах частинок піску понад 0,4 мм фактичні значення швидкості винесення піску є дещо вищими порівняно з розрахунковими значеннями.

Співставлення результатів експериментальних досліджень і теоретичних розрахунків свідчить, що значення швидкості руху газу для винесення твердої фази, отримані експериментально і за аналітичними залежностями відрізняються між собою в прийнятих межах для розглянутих значень діаметрів частинок.

Наукова новизна. Встановлено закономірності зміни швидкості руху газу (повітря), яка необхідна для винесення частинок піску з діаметром фракцій від 0,1 до 1 мм.

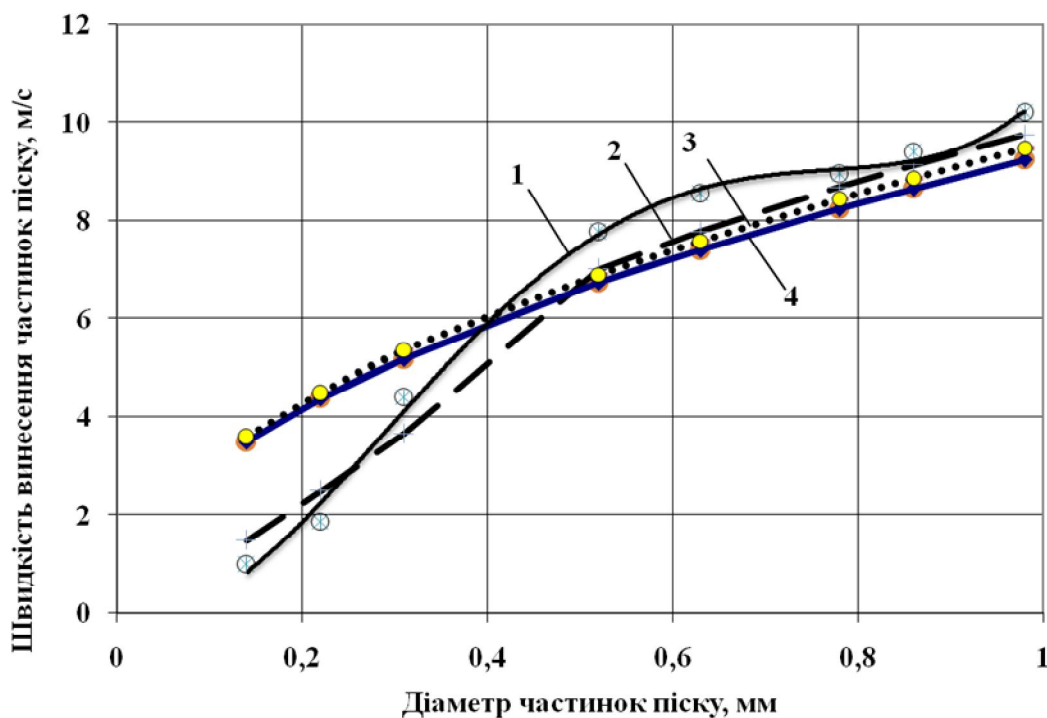
Практична цінність. Використання наукових розробок дозволяє зменшити втрати тиску на вибої свердловини за рахунок запобігання утворення піщаного корка.

Висновки

Розроблено експериментальну установку для дослідження умов винесення частинок піску із вибою модельної свердловини.

За результатами експериментальних досліджень оцінено швидкості руху газу (повітря), які необхідні для винесення частинок піску з діаметром фракцій від 0,1 до 1 мм.

Порівняння отриманих результатів свідчить про деяке відхилення експериментальних і теоретичних значень критичної швидкості руху газу, яке може бути пов'язане із використанням «реальних» частинок піску, тобто химерної форми для проведення дослідів (див. рис. 3), тоді, як в теоретичних залежностях форма частинок прийнята кулькоподібною.



1 – за експериментальними даними;
2 – за формулою (5); 3 – за формулою (9); 4 – за формулою (6);

Рисунок 5 – Залежності швидкості винесення частинок піску від їх діаметра

Література

1 Цицорин А. И. Химические методы ограничения выноса песка в нефтяных и газовых скважинах / А. И. Цицорин, В. Б. Демьяновский, Д. А. Каушанский // Электронный научный журнал Георесурсы. Геоэнергетика. Геополитики. – 2014. – №2.

2 Бондаренко В. А. Разработка статистической модели деформационно-пространственной нестабильности и разрушения песчаных пород с целью снижения пескопроявлений / В. А. Бондаренко, О. В. Савенок // ГеоИнжиниринг. – 2014. – № 1 (21). – С. 84–87.

3 Абдулин Ф. С. Пробкообразование в газовых скважинах Ставропольского месторождения / Ф.С. Абдулин, В. В. Калашнев // Газовая промышленность. – 1970. – №8. – С. 7-9.

4 Магадова Л. А. Разработка композиции для крепления призабойной зоны пласта в скважинах подземных хранилищ газа / Л. А. Магадова, Н. Н. Ефимов, В. Б. Губанов, В. А. Нескин, М. В. Трофимова // Территория нефтегаз. – 2012. – № 5. – С. 63-67.

5 Дремлюх Н. С. Способи ліквідації піщаних корків на вибоях свердловин з нестійкими колекторами / Н. С. Дремлюх // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2013. – № 2. – С. 19 – 29.

6 Моторин Д.В. Проблемы добычи газа на завершающем этапе разработки месторождений / Д. В. Моторин, П. С. Кротов, В. В. Гурьянов. // Территория нефтегаз. – 2011. – № 10. – С. 50-53.

7 Леонов Е. Г. Гидроаэромеханика в бурении [Текст]: учебник для вузов / Е. Г. Леонов, В. И. Исаев. – М.: Недра, 1987. – 304 с.

8 Ширковский А.И. Разработка и эксплуатация газовых и газоконденсатных месторождений [Текст]: учебник для вузов / А. И. Ширковский. – М.: Недра, 1979. – 303 с.

9 Латыпов Б. М. Техническое обеспечение устойчивости работы штанговой винтовой насосной установки в малодебитных скважинах, осложненных пескопроявлениями [Текст]: дис. канд. техн. наук: 2014 / Латыпов Булат Маратович. – Уфа, 2014. – 133 с.

10 Требин Ф. А. Добыча природного газа [Текст] / Ф. А. Требин. – М.: Недра, 1976. – 367 с.

11 Арбузов В. Н. Сборник задач по технологии добычи нефти и газа в осложненных условиях [Текст]: [практикум] / В. Н. Арбузов., Е. В. Курганова; Национ. исслед. Томск. политех. ун-в. – Томск: ИТПУ, 2013. – 60 с.

Стаття надійшла до редакційної колегії
25.08.15

Рекомендована до друку
професором Коцкуличем Я.С.
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)
професором Дорошенком В.М.
(Управління геології та розробки родовищ
нафти і газу ПАТ «Укрнафта», м. Київ)