

Наука — виробництву

УДК 622.691

ДОСЛІДЖЕННЯ ПОТУЖНОСТІ ТА ШВИДКОСТІ СТРУМИНИ ВОДО-ПОВІТРЯНО-ПІЩАНОЇ СУМІШІ

Є.І. Крижанівський, М.М. Лях, І.В. Добровольський, В.М. Вакалюк

ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 727101,
e-mail: no@nuing.edu.ua

Розглядається питання пошуку шляхів покращення технічних показників устаткування для гідроабразивного відрізання обладнання з фонтануючої нафтогазової свердловини. Одним з напрямків отримання можливого позитивного ефекту вибрано напрям, пов'язаний з дослідженням зміни параметрів струменя водо-повітряно-піщаної суміші, що витікає крізь отвір за рахунок перепаду тиску.

Створено математичну модель для дослідження та визначення зміни потужностей, швидкості та температури струменя водо-повітряно-піщаної суміші в залежності від перепаду тиску. Побудовані графічні залежності швидкості та кінетичної потужності від тиску для водо-повітряно-піщаної суміші, для повітря і водо-піщаного струменя. Наведено графік зміни температури від тиску для струменя водо-повітряно-піщаної суміші, що витікає з отвору. Теоретично встановлено, що всі основні технічні показники, необхідні для різання у струмені водо-повітряно-піщаної суміші значно кращі, ніж у водо-піщаній.

Ключові слова: потужність струменя, швидкість струменя водо-повітряної суміші, ліквідація нафтогазових фонтанів, відкрите фонтанування, гирлове обладнання, трубна головка, гідроабразивна установка, гідроабразивне різання.

Рассматривается вопрос поиска путей улучшения технических показателей оборудования для гидроабразивной резки оборудования с фонтанирующей нефтегазовой скважины. Одним из направлений получения возможного положительного эффекта выбрано исследование изменения параметров струи водо-воздушно-песчаной смеси, вытекающей сквозь отверстие за счет перепада давления. Создана математическая модель для исследования и определения изменения мощностей, скорости и температуры струи водо-воздушно-песчаной смеси зависимости от перепада давления. Построены графические зависимости скорости и кинетической мощности от давления для водо-воздушно-песчаной смеси, для воздуха и водо-песчаной струи. Приведен график изменения температуры от давления для струи водо-воздушно-песчаной смеси, вытекающей из отверстия. Теоретически установлено, что все основные технические показатели, необходимые для резки в струе водо-воздушно-песчаной смеси, значительно лучше, чем в водо-песчаной.

Ключевые слова: мощность струи, скорость струи водо-воздушной смеси, ликвидация нефтегазовых фонтанов, открытый фонтан, устьевое оборудование, трубная головка, гидроабразивная установка, гидроабразивная резка.

The issue of finding ways to improve the technical parameters of equipment for waterjet cutting of equipment from fountain oil and gas wells is considered. One of the directions for obtaining a possible positive effect is the direction of the necessity of conducting a study of changes in the parameters of the water-air-sand mixture flow that goes through the hole due to differential pressure. A mathematical model for studying and determining the change in power, velocity and temperature of water-air-sand mixture flow based on differential pressure has been developed. The graphic dependences of speed and kinetic power on the pressure for the water-air-sand mixture, for air and water-sand jet are developed. The graph of the temperature change due to the the pressure for the water-air-sand mixture flow that goes from the hole is shown. It has been established theoretically that all the basic technical parameters required for cutting in a water-air-sand mixture flow are much better than in a water-sand mixture.

Keywords: jet power, jet speed of water-air mixture, elimination of oil fountains, open flow, wellhead equipment, tubing head, waterjet equipment, waterjet cutting.

Вступ. Під час буріння, експлуатації та капітального ремонту нафтогазових свердловин внаслідок впливу різних чинників трапляються складні техногенні аварії – відкрите нафтогазо-

ве фонтанування, що потребує для ліквідації великих матеріальних витрат і надлюдських зусиль.

Процес ліквідації відкритого фонтану складається з таких етапів:

- локалізація відкритого полум'я;
- забирання зруйнованого обладнання з гирла фонтануючої свердловини;
- демонтаж пошкодженого гирлового обладнання для створення компактного струменя фонтанування;
- наведення нового спеціального гирлового обладнання;
- глушіння свердловини.

Демонтаж пошкодженого гирлового обладнання для створення компактного струменя фонтанування – це роботи підвищеної складності, оскільки даний вид робіт зазвичай проводиться в умовах відкритого полум'я, або у умовах вибухонебезпечного середовища. Для створення компактного струменя необхідно зруйнувати (роз'єднати) гирлове обладнання у визначеному місці щоб припинити розпилювання полум'я на гирлі свердловини, та отримати можливість для проведення подальших робіт на фонтануючій свердловині.

У роботі Лойцянского Л.Г. «Механіка рідини та газу» вказано, що при дозвуковому русі газу (як і у випадку нестискуваної рідини) у випадку збільшення площі перерізу S труби швидкість руху зменшується, і навпаки, зі зменшенням перерізу швидкість течії збільшується. Тоді при надзвуковому русі газу у трубі, що звужується, швидкість руху зменшується, а в трубі, що розширюється, відбувається прискорення руху. Це наче б то парадоксальне явище можна пояснити тим, що під час розширення газу густина ρ_r його настільки різко зменшується, що добуток $\rho_r \cdot v_r \cdot S = const$ порівняно зі збільшенням площі S все ж зменшується, що і призводить до зростання швидкості v_r . Це явище лягло в основу для проведення даних досліджень.

Мета дослідження. Метою дослідження є визначення шляху покращення технічних показників устаткування для гідроабразивного відрізання обладнання з фонтануючої нафтогазової свердловини. Для досягнення поставленої мети проведено дослідження потужності, швидкості та температурних змін струменя водоповітряно-піщаної суміші.

Основний матеріал досліджень. Струмину водно-повітряно-піщаної суміші, що витікає із отвору, наближено можна розглядати як сукупність двох компонентів: струмין водопіщаної суміші і розміщений в ній струмין повітря.

Розглянемо спочатку явище витікання із отвору повітряної компоненти в умовах значних перепадів тиску. В цьому випадку вважатимемо зміну стану повітря при витіканні адиабатним. Це припущення є достатньо обґрунтованим, оскільки за значної різниці тисків внаслідок перетворення потенціальної енергії в кінетичну в отворі виникає настільки велика швидкість, що потік повітря при витіканні не

встигає віддати своє тепло оточуючому середовищу.

Якщо в першому наближенні знехтувати впливом тертя, то до процесу витікання повітряної (газової) компоненти можна застосувати рівняння Бернуллі для нев'язкої стискуваної рідини:

$$\frac{p}{\rho_r} \cdot \frac{\gamma}{\gamma-1} = \frac{p_0}{\rho_{r0}} \cdot \frac{\gamma}{\gamma-1} + \frac{v_r^2}{2}, \quad (1)$$

де p – тиск в посудині (камері) до отвору;
 ρ_r – густина повітря в камері; p_0 – атмосферний тиск;

ρ_{r0} – густина повітря за атмосферного тиску;

$\gamma = 1,4$ – показник адиабати для повітря;
 v_r – швидкість витоку повітряної (газової) компоненти з отвору.

Розв'язавши рівняння (1) відносно швидкості, знаходимо

$$v_r = \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} \cdot \left(\frac{p}{\rho} - \frac{p_0}{\rho_0} \right)}. \quad (2)$$

Згідно з рівнянням стану ідеального газу

$$p = \frac{\rho_r R T}{\mu}. \quad (3)$$

З врахуванням рівняння (3) рівняння (2) отримує такий вигляд:

$$v_r = \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} \cdot \frac{R}{\mu} \cdot (T - T_0)}, \quad (4)$$

де T – температура повітря в камері;
 T_0 – температура повітря, яке витікає із отвору;

$R = 8,31$ Дж/(моль·К) - універсальна газова стала;

$\mu = 29 \cdot 10^{-3}$ кг/моль - молярна маса повітря.

Використавши для адиабатного розширення термодинамічне співвідношення

$$\frac{T_0}{T} = \left(\frac{p_0}{p} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}, \quad (5)$$

отримаємо визначення для швидкості витоку з отвору повітряної компоненти остаточної формулу:

$$v_r = \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} \cdot \frac{R}{\mu} \cdot T \left[1 - \left(\frac{p_0}{p} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right]}. \quad (6)$$

Густина водно-повітряно-піщаної суміші доцільно розраховувати за формулою:

$$\rho = \frac{m_g + m_n + m_z}{V_g + V_n + V_z} = \frac{1 + k_n + k_z}{\frac{1}{\rho_g} + \frac{k_n}{\rho_n} + \frac{k_z}{\rho_z}}, \quad (7)$$

де $k_n = \frac{m_n}{m_B}$ – відношення маси піску до маси води в суміші;

$k_r = \frac{m_r}{m_B}$ – відношення маси повітря до маси води в суміші;

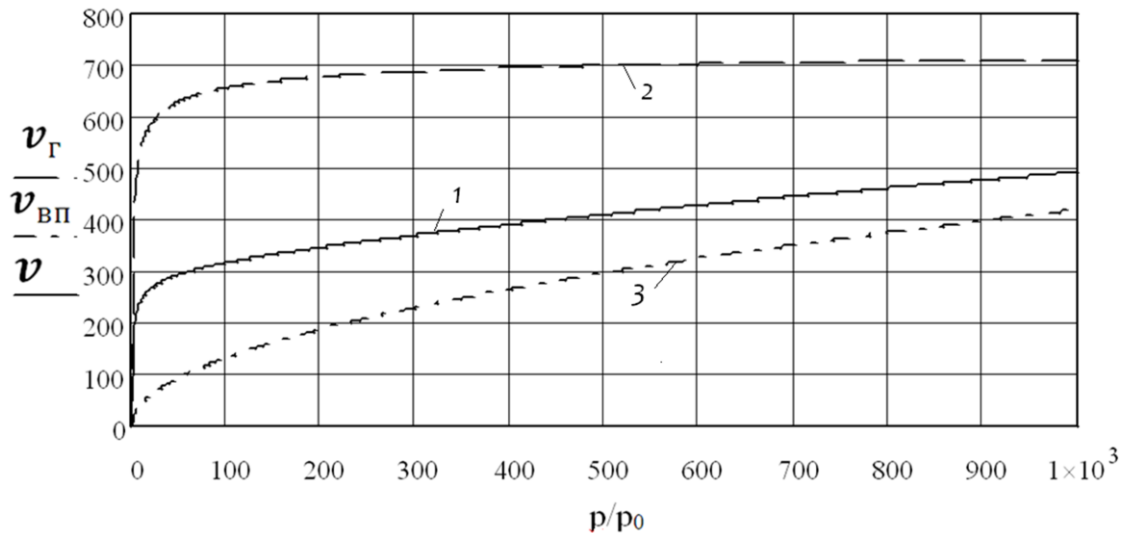


Рисунок 1 – Графічні залежності швидкості від тиску в камері для водо-повітряно-піщаної суміші (суцільна крива 1), її повітряної (пунктирна крива 2) та водо-піщаної компоненти (штрих-пунктирна крива 3) за температури суміші $T=293\text{ K}$, $k_r = 0,3$; $k_p = 0,2$; $\rho_{\text{п}} = 3,5 \cdot 10^3\text{ кг/м}^3$

$\rho_{\text{в}}$, $\rho_{\text{п}}$ – густина води та піску в суміші відповідно;

$\rho_{\text{г}}$ – густина повітря в суміші, яка залежить від тиску та температури згідно з формулою (3).

Знаючи масову витрату води $Q_{\text{в}}$, можна розрахувати кінетичну потужність повітряної компоненти струмини, що витікає із отвору, за формулою:

$$N_{\text{г}} = \frac{1}{2} k_{\text{г}} Q_{\text{в}} v_{\text{г}}^2 \quad (8)$$

Нехтуючи тертям, до процесу витікання водо-піщаної суміші застосуємо рівняння Бернуллі для нестикуваної невязкої рідини:

$$\frac{p}{\rho_{\text{ВП}}} = \frac{p_0}{\rho_{\text{ВП}}} + \frac{v_{\text{ВП}}^2}{2} \quad (9)$$

Із рівняння (9) отримуємо наближену формулу для швидкості витікання водо-піщаної компоненти суміші:

$$v_{\text{ВП}} = \sqrt{\frac{2(p-p_0)}{\rho_{\text{ВП}}}} \quad (10)$$

тут $\rho_{\text{ВП}}$ – густина водно-піщаної суміші, яку можна визначити за формулою (7) при $k_{\text{г}} = 0$.

Кінетичну потужність водо-піщаної компоненти суміші, що витікає із отвору, розрахуємо за формулою:

$$N_{\text{ВП}} = \frac{1}{2} (1 + k_{\text{п}}) Q_{\text{в}} v_{\text{ВП}}^2 \quad (11)$$

Кінетична потужність водо-повітряно-піщаної суміші дорівнюватиме сумі кінетичних потужностей її компонентів:

$$N = N_{\text{ВП}} + N_{\text{г}} \quad (12)$$

Також цю кінетичну потужність можна розрахувати за формулою

$$N = \frac{1}{2} (1 + k_{\text{п}} + k_{\text{г}}) Q_{\text{в}} v^2 \quad (13)$$

де v – швидкість витікання із отвору водо-повітряно-піщаної суміші.

Розв'язавши систему рівнянь (8) і (11) – (13), отримуємо формулу для розрахунку швидкості витікання із отвору водо-повітряно-піщаної суміші:

$$v = \sqrt{\frac{k_{\text{г}} v_{\text{г}}^2 + (1 + k_{\text{п}}) v_{\text{ВП}}^2}{1 + k_{\text{п}} + k_{\text{г}}}} \quad (14)$$

Експериментально швидкість витікання із отвору водо-повітряно-піщаної суміші можна визначити, знаючи масову витрату води. Згідно з формулою для масової витрати суміші:

$$Q = (1 + k_{\text{п}} + k_{\text{г}}) Q_{\text{в}} = \rho v_1 w \quad (15)$$

звідки

$$v_1 = \frac{(1 + k_{\text{п}} + k_{\text{г}}) Q_{\text{в}}}{\rho w} \quad (16)$$

де $w = \pi d^2 / 4$ – площа поперечного перерізу отвору;

ρ – густина суміші, яка визначається за формулою (7), в якій густина повітряної компоненти згідно з формулою (3) $\rho_{\text{г}} = \frac{\mu p_0}{RT_0}$ обчислюється за атмосферного тиску p_0 і температури T_0 , яка визначається через температуру суміші в камері за формулою (5).

На рисунку 1 представлені криві залежності швидкості від тиску в камері для водо-повітряно-піщаної суміші (суцільна крива 1), її повітряної (пунктирна крива 2), та водо-піщаної компоненти (штрих-пунктирна крива 3). Як видно з наведених графічних залежностей, наявність повітряної компоненти досить суттєво збільшує швидкість суміші.

На рисунку 2 зображено криві залежності кінетичної потужності від тиску в камері для водо-повітряно-піщаної суміші (суцільна

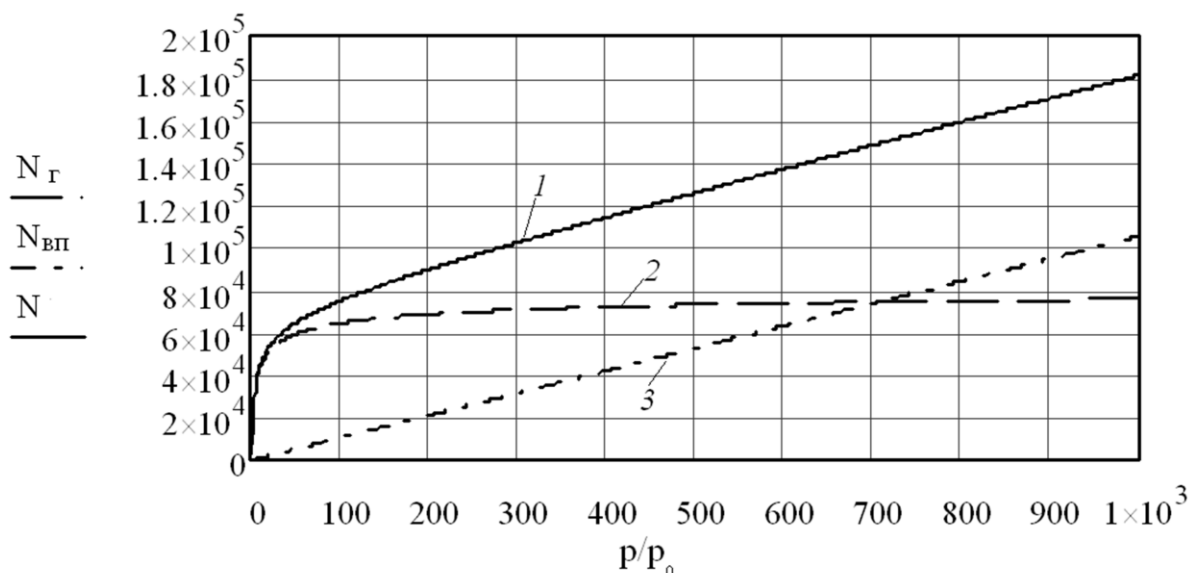


Рисунок 2 – Графічні залежності кінетичної потужності від тиску в камері для водо-повітряно-піщаної суміші (суцільна крива 1), її повітряної (пунктирна крива 2) та водо-піщаної компоненти (штрихпунктирна крива 3) при масовій витраті води $Q_b=1\text{кг/с}$ за температури суміші $T=293\text{ К}$, $k_T = 0,3$; $k_T = 0,2$; $\rho_{\text{п}} = 3,5 \cdot 10^3\text{ кг/м}^3$

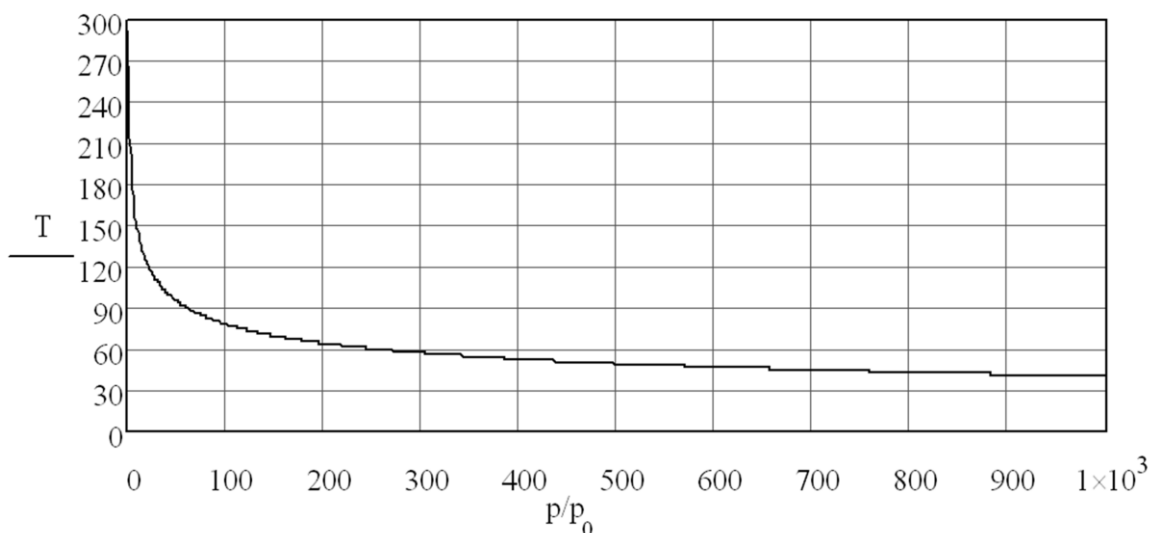


Рисунок 3 – Графічні залежності температури від тиску в камері повітряної компоненти суміші, що витікає із отвору, за температури $T=293\text{ К}$

крива 1), її повітряної (пунктирна крива 2), та водо-піщаної компоненти (штрихпунктирна крива 3) при масовій витраті води $Q_b=1\text{кг/с}$.

Дані графічні залежності показують, що наявність повітря в суміші дозволяє досягти необхідної для різання кінетичної потужності струмینی за набагато менших тисків в камері, ніж це можна зробити, використовуючи тільки водо-піщану суміш.

Необхідно також відмітити, що адіабатне розширення повітряної компоненти в суміші призводить до значного охолодження струменя суміші, що витікає з отвору. На рисунку 3 наведено графік залежності температури повітряної компоненти суміші, що витікає з отвору, від тиску в камері.

Ефект від суттєвого зниження температури буде позитивно впливати на процес гідроабразивного різання металу або іншого матеріалу за рахунок замерзання краплинок води.

Висновки

Дані дослідження проводяться з метою покращення технічних показників устаткування для гідроабразивного відрізання обладнання з фонтануючої нафтогазової свердловини, що дасть змогу провести надійний, оперативний демонтаж пошкодженого гирлового обладнання. Результати даних досліджень є основою для проектування, виготовлення та подальших експериментальних та промислових досліджень устаткування для гідроабразивного відрізання

обладнання з фонтануючої свердловини за допомогою водо-повітряно-піщаної суміші. Це дасть можливість створити високоефективне устаткування для демонтажу пошкодженого обладнання, яке забезпечить значне прискорення ліквідації складних техногенних аварій – відкритих нафтогазових фонтанів.

Крім цього, результати вище наведених досліджень можуть бути основою для продовження та розвитку досліджень в інших галузях промисловості.

Література

1 Гукасов Н.А. Механика жидкости и газа: Учебное пособие для ВУЗов / Н.А. Гукасов. – М.: Недра, 1996. – 443 с.

2 Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа / Л.Г. Лойцянский. – М.: Наука, 1970. – 904 с.

3 Смыслов В.В. Гидравлика и аэродинамика: учебник для ВУЗов / Смыслов В.В. – К.: Вища школа, 1979. – 336 с.

4 Добровольський І.В. Дослідження технічних показників устаткування для гідроабразивного відрізання обладнання з фонтануючої свердловини / І.В. Добровольський, М.М. Лях, Н.В. Федоляк, Т.М. Яцишин // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2017. – № 1(62). – С. 35-42.

5 Римчук Д.В. Нові технології і механізми для ліквідації відкритих фонтанів / Д.В. Римчук, І.В. Добровольський // Проблеми нафтогазової промисловості НАК ДП «Науканафтогаз»: збірник наукових праць. – 2012. – Вип. 10. – С. 260 -266.

*Стаття надійшла до редакційної колегії
10.10.17*

*Рекомендована до друку
професором Чудиком І.І.
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)
д-ром техн. наук Яцишиним А.В.
(Інститут проблем моделювання в енергетиці
ім. Г.Є. Пухова НАН України, м. Київ)*