

# Техніка і технології

УДК 622.276.53.054.23:621.694

## МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ЕЖЕКТОРА ПРИ ЙОГО ОДНОЧАСНІЙ КОМПОНОВЦІ ЗІ СВЕРДЛОВИННИМ ШТАНГОВИМ НАСОСОМ У НАФТОВІЙ СВЕРДЛОВИНІ

О.В. Паневник, О.Я. Дубей

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 727116,  
e-mail: gidro@nuing.edu.ua

*З метою моделювання роботи ежектора у нафтовій свердловині при його одночасній компоновці зі свердловинним штанговим насосом складено повне рівняння фізичного процесу, яким є робота ежектора в нафтовій свердловині, встановленим вище її динамічного рівня. При цьому за основний параметр роботи ежектора в свердловині прийнято повну енергію робочого та інжектваного потоків за одиницю часу на виході з ежектора. Робочим потоком є газоводонафтова суміш свердловини, а інжектваним – нафтовий газ із її затрубного простору. Повне рівняння фізичного процесу вказує лише на те, функцією яких параметрів ежектора і свердловини є основний параметр процесу. Користуючись складеним повним рівнянням процесу і  $\pi$ -теоремою, визначено критерії подібності, які потрібно використовувати при конструюванні стендової установки для дослідження роботи ежектора у нафтовій свердловині.*

Ключові слова: ежектор, нафтова свердловина, основний параметр процесу, повне рівняння фізичного процесу.

*С целью моделирования работы эжектора в нефтяной скважине при его одновременной компоновке со скважинным штанговым насосом составлено полное уравнение физического процесса, которым является работа эжектора в нефтяной скважине, установленного выше ее динамического уровня. При этом за основной параметр работы эжектора в скважине принято полную энергию рабочего и инжектируемого потоков в единицу времени на выходе из эжектора. Рабочим потоком является газоводонефтяная смесь скважины, а инжектируемым – нефтяной газ из ее затрубного пространства. Полное уравнение физического процесса указывает только на то, функцией каких параметров эжектора и скважины является основной параметр процесса. Пользуясь составленным полным уравнением процесса и  $\pi$ -теоремой, определены критерии подобия, которые необходимо использовать при конструировании стендовой установки для исследования работы эжектора в нефтяной скважине.*

Ключевые слова: эжектор, нефтяная скважина, основной параметр процесса, полное уравнение физического процесса.

*To simulate a jet pump operation in an oil well when it is simultaneously connected with the downhole sucker rod pump, the full equation of the physical process was made, which represents the jet pump operation in an oil well, established above its flowing level. In this case, as the main parameter of the jet pump operation in the well we accept the total energy of driven and injected flow per unit time at the jet pump outlet. Gas-water-oil mix is the well driven flow and the petroleum gas from its annulus is the injected flow. The full equation of physical process only indicates the function of which jet and well parameters the main process parameter is. Using the composed full equation of the process and  $\pi$ -theorem, the similarity criteria that must be used in engineering a stand unit for jet pump operation studies in oil well were determined.*

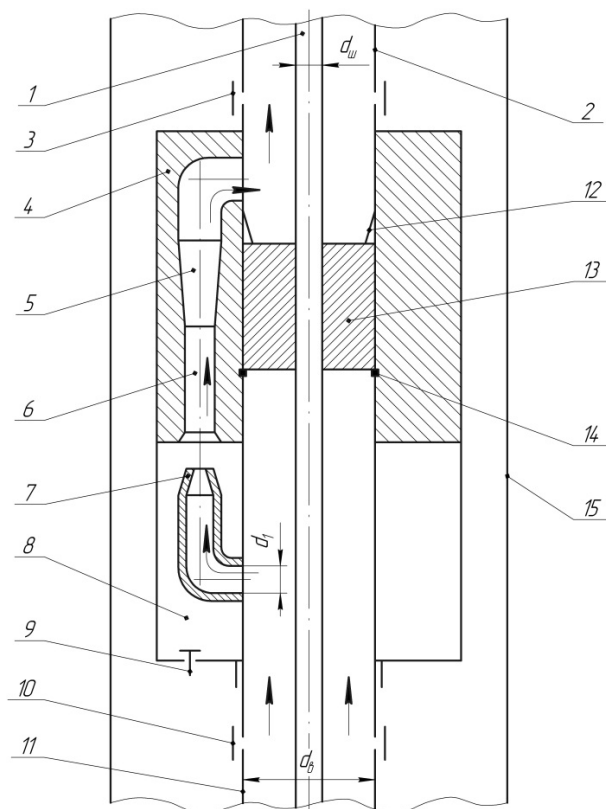
Key words: jet pump, oil well, main process parameter, full equation of the physical process.

**Мета.** Визначення критеріїв подібності при роботі ежектора у нафтовій свердловині, який встановлений вище її динамічного рівня при її експлуатації свердловинним штанговим насосом.

Ціллю даної роботи є теоретичне дослідження свердловинного ежектора та встановлення мінімально необхідної кількості критері-

їв для вибору геометрії приладу та підбору режиму його роботи.

**Наукова новизна** полягає у використанні теорем і методів теорії подібності для визначення критеріїв подібності, що окреслюють допустимі межі при конструюванні модельної установки для забезпечення коректних резуль-



1 – штанга; 2, 11 – НКТ; 3, 10 – муфти; 4 – корпус ежектора; 5 – дифузор;  
6 – камера змішування; 7 – сопло; 8 – прийомна камера; 9 – зворотний клапан;  
12 – фіксатор; 13 – розділювач середовищ; 14 – опора; 15 – експлуатаційна колона

**Рисунок 1 – Схема ежектора, встановленого в нафтовій свердловині, що експлуатується СШН**

татів стендових випробувань ежекторів у нафтових свердловинах, що експлуатуються свердловинним штанговим насосом.

**Практична значимість.** Використання повного рівняння фізичного процесу і отримання з нього критеріїв подібності дасть змогу розробити конструкцію експериментального стенда та за отриманими на ньому результатами досліджень зробити достовірні висновки про процеси, що відбуваються у нафтовій свердловині при її одночасній експлуатації свердловинним штанговим насосом та ежектором.

**Постановка проблеми та аналіз останніх досліджень.** При експлуатації нафтових свердловин установками електровідцентрових насосів (УЕВН) в останні десятиліття стали використовувати і струминні насоси, які встановлюють у свердловинах над електровідцентровими насосами [1, 2]. Такі установки отримали умовну назву «Тандем». За допомогою цих установок вдалося стабілізувати роботу електровідцентрових насосів, збільшити відбір продукції з нафтових свердловин, максимально використати енергію нафтового газу, який потрапляє із затрубного простору в струминний насос.

Струминний апарат (ежектор) у свердловинах, що експлуатуються УЕВН, можна розмішувати і вище динамічного рівня свердловини [3]. Таке технічне рішення забезпечує під-

тримання затрубного тиску на потрібному рівні, стабілізує роботу УЕВН і збільшує її міжремонтний період.

У роботі [4] досліджується можливість використання ежекторів у нафтових свердловинах під час їх експлуатації свердловинним штанговим насосом (СШН). Проведено певні теоретичні оцінки і стендові експериментальні дослідження. Але за їх результатами важко зробити висновки про можливість чи неможливість застосування рідинно-газових ежекторів у процесі експлуатації нафтових свердловин.

Нами запропоновано використання рідинно-газового ежектора у нафтовій свердловині, що експлуатується СШН і, який встановлено вище її динамічного рівня [5]. Розміщення вказаного ежектора у такій свердловині дає змогу використовувати потенційну енергію затрубного нафтового газу для полегшення підйому газодонафтової суміші свердловини на її поверхню.

Мета даної роботи полягає у визначенні критеріїв подібності, які існують між роботою рідинно-газового ежектора у реальній нафтовій свердловині і роботою його моделі на стендовій установці. Чим повніше будуть враховані критерії подібності під час проектування стендової установки, тим з більшою точністю можна буде оцінити (за результатами стендових випробувань) роботу ежектора у реальній нафтовій свердловині.

Можливі два варіанти встановлення ежектора:

– у свердловині вище її динамічного рівня у тому місці, в якому у насосно-компресорних трубах (НКТ) рухається тільки водонафтова суміш. Це означає, що у вказаному місці тиск в НКТ є більшим тиску насичення нафти  $p_s$ ;

– у свердловині вище її динамічного рівня, але у тому місці, в якому в НКТ рухома суміш є газоводонафтовою.

**Основна частина.** Будемо розглядати моделювання ежектора, встановленого у нафтовій свердловині, і допустимо, що в місці його встановлення в НКТ рухається газоводонафтова суміш (рис. 1). Це означає, що крім водонафтової суміші є і вільний нафтовий газ. Але будемо вважати, що газ рівномірно розподілений в об'ємі водонафтової суміші, тобто робочий потік в ежекторі можна вважати гомогенним середовищем. Крім того, приймаємо ще такі спрощення:

– масообмін між рідинною і газовою фазами в ежекторі не відбувається. Це означає, що газ із нафти не виділяється і не розчиняється у ній при зміні тиску і густина газодорідинної суміші змінюється тільки за рахунок зміни густини вільного нафтового газу;

– теплообмін між фазами і стінками ежектора відсутній, тобто процес адіабатний;

– при визначенні втрат енергії робочого потоку (газодорідинної суміші) при проходженні через елементи ежектора зміною густини робочого потоку нехтуємо.

При моделюванні будь-якого фізичного процесу необхідно скласти повне рівняння цього процесу і, користуючись  $\pi$ -теоремою, визначити критерії подібності. Повне рівняння фізичного процесу вказує лише на функціональний зв'язок між основними параметрами системи, в якій відбувається цей процес [6].

Моделювання процесу починається з того, що вибирається основний параметр, який характеризує весь процес. За основний параметр роботи ежектора в свердловині приймаємо повну енергію робочого та інжектованого потоків за одиницю часу на виході з ежектора. Робочим потоком є газоводонафтова суміш, а інжектованим – нафтовий газ, що знаходиться у затрубному просторі свердловини.

Враховуючи сказане, записуємо рівняння для енергії на виході з рідинно-газового ежектора

$$E_{вих} = E_{p_{ex}} + E_{i_{нвх}} - E_1 - E_2 - E_3 - E_4 - E_5 - E_6 - E_7 - E_8, \quad (1)$$

де  $E_{p_{ex}}$ ,  $E_{i_{нвх}}$  – енергія за одиницю часу водонафтової суміші та інжектованого газу перед входом у ежектор, Дж/с;

$E_1$ ,  $E_2$ ,  $E_3$  – втрата енергії, відповідно, інжектованого газу при попаданні в прийомну камеру, робочого потоку в циліндричній частині сопла і в соплі, Дж/с;

$E_4$ ,  $E_5$  – втрата енергії робочого потоку в прийомній камері та при вході в камеру змішування, Дж/с;

$E_6$ ,  $E_7$ ,  $E_8$  – втрата енергії в камері змішування, в дифузорі та при виході з дифузора, Дж/с.

Для деяких доданків, які входять у формулу (1), можна записати аналітичні формули, а для інших цього зробити не вдається. При цьому для таких доданків необхідно вказати функціями яких параметрів системи вони є, виходячи із фізичних міркувань.

Повна енергія робочої суміші перед входом в ежектор складається з кінетичної та потенціальної енергій і аналітично може бути записана так:

$$E_{p_{ex}} = \frac{\pi}{8} (d_e^2 - d_{ш}^2) \rho_{гнв} w_{гнв}^3 + p_{ex} \frac{\pi}{4} (d_e^2 - d_{ш}^2) w_{гнв}, \quad (2)$$

де  $d_e$ ,  $d_{ш}$  – діаметри внутрішній НКТ і штанг, м;

$\rho_{гнв}$  – густина газоводонафтової суміші, кг/м<sup>3</sup>;

$w_{гнв}$  – швидкість руху суміші перед ежектором, м/с;

$p_{ex}$  – тиск газоводонафтової суміші перед входом у ежектор, Па.

Це означає, що енергія  $E_{p_{ex}}$  є функцією таких параметрів:

$$E_{p_{ex}} = E_{p_{ex}}(d_e, d_{ш}, \rho_{гнв}, w_{гнв}, p_{ex}). \quad (3)$$

Для встановлення енергії інжектованого потоку (ідеального газу), який за одну секунду виходить із затрубного простору (процес вважається адіабатним), записуємо рівняння Бернуллі для двох перерізів з врахуванням втрат на тертя: перед зворотним клапаном ежектора (у затрубному просторі) і у вихідному перерізі зворотного клапана [7, 8]

$$\frac{RT_3}{g(k-1)} + \frac{p_3}{\rho_{гнв}g} = \frac{p_{нк}}{\rho_{гнв}g} + \varphi_c^2 \frac{w_c^2}{2g} + \frac{RT_{нк}}{g(k-1)} + (1 - \varphi_c^2) \frac{w_c^2}{2g}, \quad (4)$$

де  $R$  – газова стала газу затрубного простору, Дж/(кг·град);

$T_3$ ,  $T_{нк}$  – температура газу в затрубному просторі та при вході в прийомну камеру ежектора, К;

$p_3$ ,  $p_{нк}$  – тиск газу в затрубному просторі та в прийомній камері, Па;

$k$  – показник адіабати;

$\rho_{гнв}$ ,  $\rho_{гнк}$  – густина газу в затрубному просторі та в прийомній камері, кг/м<sup>3</sup>;

$g$  – прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup>;

$w_c$  – швидкість газу на виході зворотного клапана без врахування тертя, м/с;

$\varphi_c$  – швидкісний коефіцієнт, який враховує зменшення швидкості витікання газу під впливом тертя.

Множимо ліву і праву частину рівняння (4) на  $\frac{\pi d_{зк}^2}{4} w_2 \rho_{знк} g$  ( $d_{зк}$  – діаметр зворотного клапана) і отримуємо

$$\frac{\pi d_{зк}^2}{4} w_2 \rho_{знк} \left( \frac{RT_3}{k-1} + \frac{p_3}{\rho_{з3}} \right) = \frac{\pi d_{зк}^2}{4} w_2 \rho_{знк} \times \left( \frac{p_{нк}}{\rho_{знк}} + \varphi_c^2 \frac{w_2^2}{2} + \frac{RT_{нк}}{k-1} + (1-\varphi_c^2) \frac{w_2^2}{2g} \right). \quad (5)$$

Вираз лівої частини рівняння є секундним зменшенням потенціальної енергії газу в затрубному просторі. Тобто, це енергія інжектваного газу перед входом в ежектор

$$E_{інех} = \frac{\pi d_{зк}^2}{4} w_2 \rho_{знк} \left( \frac{RT_3}{k-1} + \frac{p_3}{\rho_{з3}} \right). \quad (6)$$

У правій частині рівняння (5) перший і третій доданки являють собою секундну потенціальну енергію газу, що потрапляє в ежектор, а другий доданок – це кінетична енергія газу на виході із отвору зворотного клапана, що з'єднує прийомну камеру ежектора із затрубним простором свердловини.

Швидкість руху газу на виході із цього отвору без врахування втрат на тертя визначається так [8]:

$$w_2 = \sqrt{2 \frac{k}{k-1} p_3 \frac{1}{\rho_{з3}} \left[ 1 - \left( \frac{p_{нк}}{p_3} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}. \quad (7)$$

Беручи до уваги, що при адіабатному процесі  $\frac{\rho_{знк}}{\rho_{з3}} = \left( \frac{p_{нк}}{p_3} \right)^{\frac{1}{k}}$  і підставляючи цей результат і (7) у (6), отримаємо

$$E_{інех} = \frac{\pi d_{зк}^2}{4} \rho_{з3} \left( \frac{p_{нк}}{p_3} \right)^{\frac{1}{k}} \left( \frac{RT_3}{k-1} + \frac{p_3}{\rho_{з3}} \right) \times \sqrt{2 \frac{k}{k-1} \frac{p_3}{\rho_{з3}} \left[ 1 - \left( \frac{p_{нк}}{p_3} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}. \quad (8)$$

Таким чином, енергія інжектваного газу є функцією таких параметрів:

$$E_{інех} = E_{інех}(p_3, p_{нк}, d_{зк}, \rho_{з3}, k, R, T_3). \quad (9)$$

Четвертий доданок правої частини рівняння (5), є втратою енергії інжектваного газу при потраплянні у прийомну камеру, тобто

$$E_1 = (1-\varphi_c^2) \frac{\pi d_{зк}^2}{8} \rho_{знк} w_2^3.$$

Після підставлення в останнє рівняння виразів для  $w_2$  і  $\rho_{знк}$  одержимо функцію  $E_1$

$$E_1 = E_1(\varphi_c, d_{зк}, \rho_{з3}, p_{нк}, p_3, k). \quad (10)$$

Втрата тиску при вході з НКТ у циліндричний отвір ежектора, на кінці якого знаходиться сопло [9]

$$\Delta p_{om} = \zeta_1 \frac{\rho_{звн} w_1^2}{2}, \quad (11)$$

де  $\zeta_1$  – коефіцієнт місцевого гідравлічного опору, викликаного різким зменшенням діаметра труби;

$w_1$  – швидкість руху газоводонафтової суміші в циліндричному отворі, що закінчується соплом, м/с.

Величина швидкості  $w_1$  знаходиться із рівняння нерозривності газоводонафтового потоку (нехтуємо різницею між густинами потоку в НКТ і циліндричній частині отвору сопла)

$$w_1 = \frac{d_\epsilon^2 - d_u^2}{d_1^2} w_{звн}, \quad (12)$$

де  $d_1$  – діаметр отвору, м.

Коефіцієнт  $\zeta_1$  визначається так:

$$\zeta_1 = \left( \frac{1}{\epsilon} - 1 \right)^2, \quad (13)$$

де  $\epsilon$  – коефіцієнт стиску струменя газоводонафтової рідини.

За наближеною формулою А.Д. Альтшуля [10]

$$\epsilon = 0,57 + \frac{0,043}{1,1 - \frac{d_1^2}{d_\epsilon^2 - d_u^2}}. \quad (14)$$

Щосекундна втрата енергії на вході в отвір буде:

$$E_2' = \Delta p_{om} \frac{\pi}{4} d_1^2 w_1. \quad (15)$$

Підставляючи (11), (12), (13) і (14) у (15), отримаємо

$$E_2' = \frac{\pi \rho_{звн}}{8} \left( \frac{1}{0,57 + \frac{0,043}{1,1 - \frac{d_1^2}{d_\epsilon^2 - d_u^2}}} - 1 \right)^2 \times \frac{(d_\epsilon^2 - d_u^2)^3}{d_1^4} w_{звн}^3, \quad (16)$$

тобто  $E_2' = E_2'(\rho_{звн}, d_1, d_\epsilon, d_u, w_{звн})$ .

Крім того, у циліндричному отворі  $d_1$  є і втрати на тертя

$$\Delta p_{тр} = \lambda_m \frac{l_1 w_1^2}{2d_1} \rho_{звн}, \quad (18)$$

де  $l_1$  – довжина отвору, діаметр якого  $d_1$ ;

$\lambda_m$  – коефіцієнт втрат на тертя при турбулентному русі (коефіцієнт Дарсі).

Якщо знехтувати шорсткістю внутрішньої поверхні отвору, то коефіцієнт Дарсі можна визначити за формулою П.К. Конакова [11]

$$\lambda_m = \frac{1}{(1,8 \lg \text{Re} - 1,5)^2} = \frac{1}{\left(1,8 \lg \left(\frac{w_1 d_1 \rho_{\text{звн}}}{\mu_{\text{вн}}}\right) - 1,5\right)^2}, \quad (19)$$

де  $\mu_{\text{вн}}$  – динамічна в'язкість водонафтової суміші, Па·с.

Втрата енергії в отворі на тертя

$$E_2'' = \frac{\frac{\pi d_1}{8} l_1 w_1^3 \rho_{\text{звн}}}{\left[1,8 \lg \left(\frac{w_1 d_1 \rho_{\text{звн}}}{\mu_{\text{вн}}}\right) - 1,5\right]^2}. \quad (20)$$

Із рівняння (20) одержуємо

$$E_2'' = E_2''(d_1, l_1, w_{\text{звн}}, d_6, d_{\text{ш}}, \rho_{\text{звн}}, \mu_{\text{вн}}). \quad (21)$$

Повна втрата енергії в циліндричному отворі перед соплом

$$E_2 = E_2' + E_2'' = E_2(d_1, l_1, d_6, d_{\text{ш}}, w_{\text{звн}}, \rho_{\text{звн}}, \mu_{\text{вн}}). \quad (22)$$

Втрата тиску в соплі

$$\Delta p_c = \zeta_c \frac{\rho_{\text{звн}} w_c^2}{2}, \quad (23)$$

де  $\zeta_c$  – коефіцієнт опору сопла;

$w_c$  – швидкість руху газодорідної суміші на виході із сопла.

Коефіцієнт  $\zeta_c$  є функцією геометричних параметрів сопла, динамічної в'язкості суміші, її густини і швидкості руху рідини на виході із сопла, тобто

$$\zeta_c = f_c(d_c, \alpha_c, l_c, \mu_{\text{вн}}, w_c, \rho_{\text{звн}}), \quad (24)$$

де  $d_c$  – діаметр вихідного отвору сопла, м;

$\alpha_c$  – кут конуса сопла, град;

$l_c$  – довжина конуса сопла, м;

$w_c$  – швидкість потоку на виході із сопла ежектора, м/с.

Швидкість потоку на виході із сопла ежектора, якщо знехтувати зміною густини потоку, буде

$$w_c = \frac{d_6^2 - d_{\text{ш}}^2}{d_c^2} w_{\text{звн}}. \quad (25)$$

Секундна втрата енергії у соплі виражається функцією

$$E_3 = \zeta_c \frac{\pi d_c^2 w_c^3}{8} \rho_{\text{звн}} = E_3(d_c, l_c, \alpha_c, \mu_{\text{вн}}, d_6, d_{\text{ш}}, w_{\text{звн}}, \rho_{\text{звн}}). \quad (26)$$

Втрата енергії у прийомній камері зумовлена силами внутрішнього тертя між шарами рідини, а також силами поверхневого натягу на межі робочого потоку та інжектованого нафтового газу, що потрапив у прийомну камеру із затрубного простору. Силами поверхневого натягу знехтуємо. У такому разі втрата енергії робочого потоку в прийомній камері буде функція

$$E_4 = E_4(\mu_{\text{вн}}, w_{\text{звн}}, d_6, d_{\text{ш}}, d_c, l_0), \quad (27)$$

де  $l_0$  – довжина вільного струменя газодонафтової суміші в прийомній камері (відстань від зрізу сопла до входу в камеру змішування).

Втрата енергії в камері змішування складається із втрати енергії при вході в камеру змішування, втрати на тертя у пристінному шарі камери і втрат на тертя при турбулентному перемішуванні робочого та інжектованого потоків.

Судячи із довідкових даних, наведених у роботі [12], коефіцієнт опору камери змішування для перших двох втрат енергії є функцією таких параметрів:

$$\zeta'_{\text{к.з.}} = \zeta'_{\text{к.з.}}(d_c, d_2, Q/Q_0, E/E_0, l_2, \lambda_{\text{к.з.}}, l_0), \quad (28)$$

де  $d_2, l_2$  – діаметр камери змішування та її довжина, м;

$Q_0, Q$  – витрата із сопла і витрата у камері змішування, м<sup>3</sup>/с;

$E_0, E$  – кінетична енергія на виході із сопла та кінетична енергія змішаного потоку в камері змішування, Дж;

$\lambda_{\text{к.з.}}$  – лінійний коефіцієнт опору тертя ділянки, довжина якої  $l = d_2$ .

Величини  $Q/Q_0, E/E_0$  у роботі [12] представлено у вигляді функцій

$$Q/Q_0 = f_Q(l_0, r_c), \quad E/E_0 = f_E(l_0, r_c), \quad (29)$$

де  $r_c$  – радіус сопла.

При турбулентному перемішуванні для коефіцієнта опору записати аналітичну залежність не вдається. Очевидно, що цей коефіцієнт є функцією параметрів

$$\zeta''_{\text{кз}} = \zeta''_{\text{кз}}(d_c, w_{\text{звн}}, l_0, l_2, d_2, \lambda_{\text{к.з.}}, \mu_{\text{вн}}, \rho_{\text{гпк}}, \rho_{\text{звн}}, U_2, T_{\text{нв}}), \quad (30)$$

де  $U_2$  – об'ємний коефіцієнт інжекції на вході в прийомну камеру;

$T_{\text{нв}}$  – температура газодонафтової суміші в ежекторі (вона дорівнює температурі газодонафтової суміші на вході в ежектор), К.

Таким чином, втрата тиску в камері змішування буде

$$\Delta p_{\text{кз}} = (\zeta'_{\text{кз}} + \zeta''_{\text{кз}}) \frac{\rho_{\text{звн}} w_c^2}{2},$$

а секундна втрата енергії при вході в камеру змішування і в самій камері буде функцією

$$E_5 + E_6 = E_{56}(d_c, w_{\text{звн}}, l_0, l_2, d_2, \lambda_{\text{к.з.}}, \mu_{\text{вн}}, \rho_{\text{з3}}, p_3, p_{\text{пк}}, \rho_{\text{звн}}, k, U_2, T_{\text{нв}}). \quad (31)$$

Загальний коефіцієнт опору конічного дифузора для випадку рівномірного поля швидкостей на його вході має такий вигляд [12]:

$$\zeta_{\text{д}} = 3,2 \text{tg} \frac{\alpha_{\text{д}}}{2} \sqrt{\text{tg} \frac{\alpha_{\text{д}}}{2} \left(1 - \frac{1}{n_1}\right)^2} + \frac{\lambda}{8 \sin \frac{\alpha_{\text{д}}}{2} \left(1 - \frac{1}{n_1^2}\right)}, \quad (32)$$

де  $\alpha_\delta$  – центральний кут розширення дифузора, град;

$\lambda$  – коефіцієнт опору тертя одиниці довжини дифузора, який визначається залежно від

числа Рейнольдса  $Re = \frac{w_{\delta 1} d_{\delta 1}}{v_\delta}$  і відносної шор-

сткості  $\bar{\Delta} = \Delta/d_{\delta 1}$ ;

$w_{\delta 1}$  – швидкість потоку на вході в дифузор, м/с;

$$n_1 = d_{\delta 2}/d_{\delta 1};$$

$d_{\delta 1}, d_{\delta 2}$  – діаметри вхідного і вихідного отвору дифузора;

$v_\delta$  – кінематична в'язкість газоводонафтової суміші в дифузори, м<sup>2</sup>/с.

Отже, коефіцієнт  $\zeta_\delta$  являє собою функцію

$$\zeta_\delta = \zeta_\delta(\alpha_\delta, d_{\delta 1}, d_{\delta 2}, w_{\delta 1}, v_\delta), \quad (33)$$

а втрата енергії в дифузори

$$E_7 = \zeta_\delta \frac{\pi d_1^2}{8} \rho_c w_{\delta 1}^3, \quad (34)$$

$$E_7 = E_7(\rho_c, \alpha_\delta, d_{\delta 1}, d_{\delta 2}, v_\delta, w_{\delta 1}), \quad (35)$$

де  $\rho_c$  – густина газоводонафтової суміші на вході в дифузор.

Коефіцієнт втрати енергії при виході із дифузора визначаємо за формулою [7]

$$\zeta_{\delta, \delta} = 2\beta_2 - 2\beta_1 \frac{d_e^2 - d_u^2}{d_{\delta 2}^2} + \alpha_1 \left( \frac{d_e^2 - d_u^2}{d_{\delta 2}^2} \right)^2 - \alpha_2, \quad (36)$$

де  $\beta_1, \beta_2$  – коефіцієнти кількості руху (коефіцієнти Буссінеска);

$\alpha_1, \alpha_2$  – коефіцієнти кінетичної енергії (коефіцієнти Коріоліса).

Приймаємо наближені значення для коефіцієнтів  $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$  ( $\alpha_1 = \alpha_2 = 1,1$ ;  $\beta_1 = \beta_2 = 1,04$ ).

Секундна втрата енергії на виході із дифузора буде

$$E_8 = \frac{\pi(d_e^2 - d_u^2)}{8} \rho_{c\delta} w_{mp}^3 \times \left[ 2,08 - 2,08 \frac{d_e^2 - d_u^2}{d_{\delta 2}^2} + 1,1 \left( \frac{d_e^2 - d_u^2}{d_{\delta 2}^2} \right)^2 - 1,1 \right], \quad (37)$$

де  $\rho_{c\delta}$  – густина газоводонафтової суміші в НКТ на виході із дифузора;

$w_{mp}$  – швидкість руху газоводонафтової суміші в НКТ у перерізі на виході із дифузора.

Із (37) можна записати

$$E_8 = E_8(d_e, d_u, d_{\delta 2}, \rho_{c\delta}, w_{mp}). \quad (38)$$

Підставляючи в (1) функції (3), (9), (10), (22), (26), (27), (31), (35), (38) і виключаючи параметри, що повторюються, отримуємо

$$E_{вих} = E_{вих}(d_e, d_u, \rho_{гвн}, w_{гвн}, P_{вх}, P_3, P_{нк}, d_{зк}, \rho_{гвн}, d_{гвн}, \rho_{гвн}, k, R, T_{гвн}, \varphi_c, d_1, l_1, \mu_{вн}, d_c, l_c, \alpha_c, l_0, l_2, d_2, \lambda_{к.з.}, U_2, T_{нв}, \rho_c, \alpha_\delta, d_{\delta 1}, d_{\delta 2}, v_\delta, w_{\delta 1}, \rho_{c\delta}, w_{mp}). \quad (39)$$

Число змінних параметрів у формулі (39)  $n = 33$ , отже, у відповідності з  $\pi$ -теоремою [6] безрозмірних комплексів повинно бути  $m = n - 4 = 33 - 4 = 29$ . Із числа  $n = 33$  виберемо чотири основних величини, від яких залежить форма запису критеріїв подібності. За основні величини вибираємо:

$$d_e [L^1], \quad w_{гвн} [L^1 T^{-1}], \quad \rho_{гвн} [M^1 L^{-3}], \quad T_{нв} [\theta^1].$$

Тоді, обробляючи повне рівняння процесу (39) методом, викладеним у роботі [6], отримаємо рівняння процесу в критеріальній формі

$$\frac{E_{вих}}{d_e^2 w_{гвн}^3 \rho_{гвн}} = \varphi \left( 1, \frac{d_u}{d_e}, 1, 1, \frac{P_{вх}}{w_{гвн}^2 \rho_{гвн}}, \frac{P_3}{w_{гвн}^2 \rho_{гвн}}, \frac{P_{нк}}{w_{гвн}^2 \rho_{гвн}}, \frac{d_{зк}}{d_e}, \frac{\rho_{гвн}}{\rho_{гвн}}, k, \frac{R}{w_{гвн}^2 T_{нв}^{-1}}, \frac{T_{гвн}}{T_{нв}}, \varphi_c, \frac{d_1}{d_e}, \frac{l_1}{d_e}, \frac{\mu_{вн}}{d_e w_{гвн} \rho_{гвн}}, \frac{d_c}{d_e}, \frac{l_c}{d_e}, \alpha_c, \frac{l_0}{d_e}, \frac{l_2}{d_e}, \frac{d_2}{d_e}, \lambda_{к.з.}, U_2, 1, \frac{\rho_c}{\rho_{гвн}}, \alpha_\delta, \frac{d_{\delta 1}}{d_e}, \frac{d_{\delta 2}}{d_e}, \frac{v_\delta}{d_e w_{гвн}}, \frac{w_{\delta 1}}{w_{гвн}}, \frac{\rho_{c\delta}}{\rho_{гвн}}, \frac{w_{mp}}{w_{гвн}} \right). \quad (40)$$

З правої сторони в рівнянні (40) стоять 29 критеріїв подібності. При їх виконанні буде виконуватись і критерій подібності (зліва) на підставі третьої теореми подібності [6].

Відношення подібних величин природи і моделі позначимо тією ж буквою з індексом « $n$ ». Тоді на підставі рівняння (40) можна записати

$$k_n = \varphi_{cn} = \alpha_{cn} = \lambda_{кзн} = U_{2n} = \alpha_{\delta n} = 1; \quad (41)$$

$$d_{uhn} = d_{зн} = d_{1n} = l_{1n} = d_{cn} = l_{cn} = l_{0n} = l_{2n} = d_{2n} = d_{\delta 1n} = d_{\delta 2n} = d_{вн}; \quad (42)$$

$$P_{вхн} = P_{3n} = P_{нкн} = w_{гвн}^2 \rho_{гвн}; \quad (43)$$

$$\rho_{гвн} = \rho_{cn} = \rho_{c\delta n} = \rho_{гвн}; \quad (44)$$

$$w_{\delta 1n} = w_{mpn} = w_{гвн}; \quad (45)$$

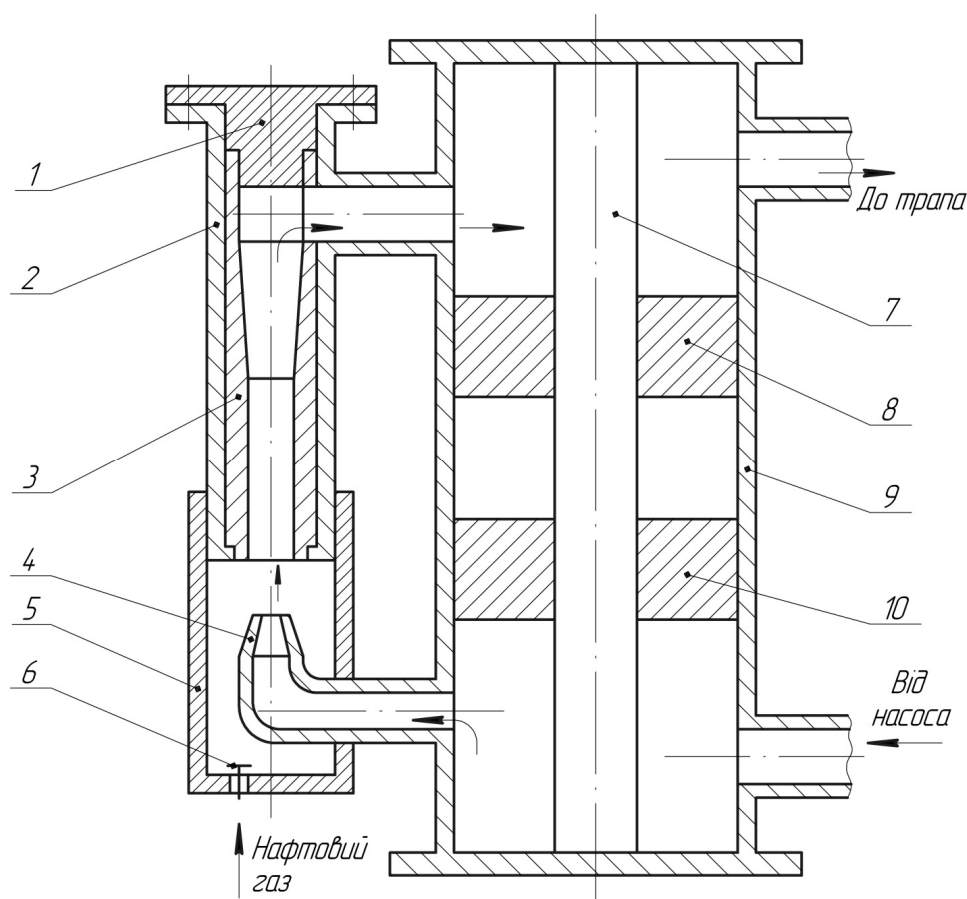
$$\frac{\mu_{вн}}{\rho_{гвн}} = v_{\delta n} = d_{вн} w_{гвн}; \quad (46)$$

$$R_n = w_{гвн}^2 T_{нв}^{-1}; \quad T_{3n} = T_{нв}. \quad (47)$$

З метою встановлення можливості реалізації отриманих критеріїв подібності (41) – (47) при проектуванні експериментальної стендової модельної установки на рис. 2 наведено схему її частини, а саме моделі свердловини, що експлуатується СШН, разом з ежектором.

Критерії подібності (41) вказують на те, що величини  $\varphi_c, k, \alpha_c, \lambda_{кз}, U_2, \alpha_\delta$  повинні бути однаковими як у моделі, так і в натурі.

Практично добитися для цих величин однакових значень як у моделі, так і в натурі важко. Якщо для величин  $\alpha_c, \alpha_\delta$  це зробити легко, оскільки це пов'язано з геометрією сопла і дифузора, то добитися однакового значення для показника адіабати  $k$  можливо тільки за умови використання такого ж інжектованого газу у моделі, як і у реальній свердловині, що не завжди можливо. Отримати ж однаковий коефіці-



1 – фланець-заглушка; 2 – корпус ежектора; 3 – змішувальна камера і дифузор ежектора; 4 – сопло; 5 – прийомна камера; 6 – зворотний клапан; 7 – штанга; 8, 10 – розділювачі середовищ; 9 – НКТ

**Рисунок 2 – Схема моделі свердловини, що експлуатується СШН, разом із свердловинним ежектором**

ент інжекції  $U_2$  на вході в камеру змішування ще важче, оскільки в моделі швидкість руху робочого потоку на виході із сопла буде постійною (насос забезпечує постійну подачу), а в натурі, у свердловині, ця швидкість є величиною змінною, що зумовлено змінною швидкістю руху плунжера глибинного насоса. Критерії подібності (42) можуть бути повністю реалізовані.

Всі інші критерії подібності можна реалізувати тільки наближено. Основною причиною цього є змінність швидкості руху плунжера глибинного насоса.

При проектуванні експериментального стенда необхідно максимально можливо реалізувати критерії подібності (41) – (47). Чим більше і точніше критеріїв подібності буде реалізовано у модельній установці, тим точніше за результатами стендових випробувань можна буде оцінити працездатність та ефективність застосування ежекторів у нафтових свердловинах.

## Висновки

Встановлено функціональну залежність секундної енергії газоводонафтового потоку на виході із ежектора від його конструктивних та гідродинамічних параметрів при розміщенні його в нафтовій свердловині вище динамічного рівня при її експлуатації свердловинним штанговим насосом.

Використовуючи цю функціональну залежність, визначено критерії подібності (41)–(47), які необхідно враховувати при моделюванні роботи ежектора в нафтовій свердловині.

Аналіз отриманих критеріїв свідчить, що значна частина критеріїв подібності (наприклад показник адиабати чи коефіцієнт інжекції) не може бути точно реалізована у процесі проектування модельних установок. Можна лише говорити про наближену подібність.

У кожній конкретній ситуації під час проектування модельної установки необхідно забезпечити максимально можливу реалізацію критеріїв подібності (41)–(47) з тим, щоб за результатами експериментальних досліджень можна було наближено судити про працездатність та ефективність застосування ежекторів у нафтових свердловинах, що експлуатуються СШН.

Література

- 1 Мищенко И.Т. Струйные насосы для добычи нефти / И.Т. Мищенко, Х.Х. Гумерский, В.П. Марьенко. – М.: Нефть и газ, 1996. – 150 с.
- 2 Дроздов А.Н. Опытнo-промышленное внедрение погружных насосно-эжекторных систем в НГДУ «Федоровскнефть» / А.Н. Дроздов, А.В. Андрианов // Нефтяное хозяйство. – 1997. – №1. – С. 51-54.
- 3 Атнабаев З.М. Скважинный эжектор для предотвращения повышения затрубного давления и срыва подачи УЭЦН / З.М. Атнабаев // Нефтяное хозяйство. – 2001. – №4. – С. 72-74.
- 4 Молчанова В.А. Исследование эффективности устройства для откачки газа из затрубного пространства / В.А. Молчанова, А.С. Топольников // Нефтепромысловое дело. – 2007. – №10. – С. 34-40.
- 5 Пат. 105135 Україна, МПК F04В 47/02. Свердловинний ежектор / О.В. Паневник, О.Я. Дубей, І.Я. Яремко, М.М. Лях – № а 2013 07030; заявл. 04.06.13; опубл. 10.04.14 Бюл. №7.
- 6 Веников В.А. Теория подобия и моделирования применительно к задачам электротехники / В.А. Веников. – М.: Высшая школа, 1966. – 178 с.
- 7 Френкель Н.З. Гидравлика / Н.З. Френкель. – М. – Л.: Госэнергоиздат, 1956. – 456 с.
- 8 Беляев Н.М. Термодинамика / Н.М. Беляев. – К.: Вища школа, 1987. – 344 с.
- 9 Альтшуль А.Д. Гидравлические сопротивления / А.Д. Альтшуль. – М.: Недра, 1982. – 224 с.
- 10 Справочник по гидравлическим сопротивлениям. Под редакцией П.Г. Киселева. – М.: Энергия, 1972. – 312 с.
- 11 Гидравлика, гидромашины и гидроприводы: Учебник для машиностроительных вузов / Т.М. Башта, С.С. Руднев, Б.Б. Некрасов и др. – М.: Машиностроение, 1982. – 423 с.
- 12 Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И.Е. Идельчик. – М.: Машиностроение, 1975. – 559 с.

*Стаття надійшла до редакційної колегії  
16.07.14*

*Рекомендована до друку  
професором Івасівим В.М.  
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)  
професором Никифорчиним О.Р.  
(Прикарпатський національний університет  
ім. В. Стефаника, м. Івано-Франківськ)*