Дослідження та методи аналізу

УДК 622.276.53.054.23

DOI: 10.31471/1993-9973-2019-4(73)-24-34

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ГЕОМЕТРІЇ СТРУМИННИХ АПАРАТІВ НА ЇХ ОСНОВНІ ТЕХНОЛОГІЧНІ ПОКАЗНИКИ

О. Я. Дубей

ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, Карпатська 15, тел. (0342) 727116,
e-mail: rengre@nung.edu.ua, olgadubej@gmail.com

Для перевірки ефективності роботи струминних апаратів (ежекторів), розміщених на різних глибинах у нафтових свердловинах, що експлуатуються механізованими способами, необхідно встановити взаємозв'язок між їх геометричними розмірами та максимально досяжними робочими параметрами. З цією метою був проведений ряд експериментальних лабораторних досліджень, основним завданням яких було виявлення оптимальних параметрів струминного апарату, що працює з газорідними потоками. В експериментальній установці подача рідини здійснювалася за допомогою електровідцентрового насоса, а нагнітання повітря забезпечувалося компресором. Установка передбачала можливість регулювання як тиску рідини перед і після струминного апарату, так і тиску та подачі газу на його вхід. Основні параметри установки були обчислені за критеріями подібності до реальних свердловин. Вплив геометрії струминного апарату на його вихідні параметри досліджували шляхом заміни його основних елементів (сопла, камери змішування, дифузора). Для кожної із запропонованих конструкцій струминного апарату заміряли тиски та витрати в його основних перерізах, зіставляли їх значення та шляхом порівняння виявляли основні закономірності при виборі оптимальної геометрії, яка б забезпечувала максимальні відбори газу або мінімальні втрати тиску. Основні результати експериментального дослідження представлено у вигляді графічних залежностей, на основі яких зроблено висновки про ефективність роботи струминних апаратів.

Ключові слова: експериментальна установка, струминний апарат, газорідна суміш, геометричні розміри, нафтова свердловина.

Для проверки эффективности работы струйных аппаратов (эжекторов), размещенных на разных глубинах в нефтяных скважинах, эксплуатируемых механизированными способами, необходимо установить взаимосвязь между их геометрическими размерами и максимально достижимыми рабочими параметрами. С этой целью был проведен ряд экспериментальных лабораторных исследований, основной задачей которых было выявление оптимальных параметров струйного аппарата, работающего с газожидкостными потоками. В экспериментальной установке подача жидкости осуществлялась с помощью электроцентробежного насоса, а нагнетание воздуха обеспечивалось компрессором. Установка предусматривала возможность регулирования как давления жидкости до и после струйного аппарата, так и давления, и подачи газа на его входе. Основные параметры установки были вычислены по критериям подобия реальным скважинам. Влияние геометрии струйного аппарата на его выходные параметры исследовали путем замены его основных элементов (сопла, камеры смешения, диффузора). Для каждой из предложенных конструкций струйного аппарата измеряли давление и расход в его основных сечениях, сопоставляли их значения, после чего путем сравнения выявляли основные закономерности при выборе оптимальной геометрии, которая обеспечивала максимальные отборы газа или минимальные потери давления. Основные результаты

экспериментального исследования представлены в виде графических зависимостей, по которым сделаны выводы об эффективности работы струйных аппаратов.

Ключевые слова: экспериментальная установка, струйный аппарат, газожидкостная смесь, геометрические размеры, нефтяная скважина.

In order to test the operational efficiency of jet pumps which are installed at different depths in artificial lifted oil wells, it is necessary to establish the relation between their geometry and the maximum achievable operating parameters. For this purpose, a series of experimental laboratory studies is conducted. Their main task is to identify the optimal parameters of a jet pump that works with gas-liquid flows. In the experimental setup, the fluid is supplied by an electric centrifugal pump and the air is injected by a compressor. The setup provides the possibility to regulate the fluid pressure before and after the jet pump, as well as the pressure and gas supply at its inlet. The basic parameters of the setup are calculated according to the criteria of the resemblance to real wells. The influence of the jet pump geometry on its working parameters is estimated by replacing its main elements (nozzle, mixing chamber, diffuser). For each of the suggested designs of the jet pump, the pressure and the flow rates in its main cross-sections are measured and their measurement values are compared. On the basis of this comparison the author finds the main regularities for choosing optimal geometry which provides maximum gas offtaking or minimum pressure losses. The basic results of the experimental study are presented in the form of graphical dependencies which allow to make conclusions about the operational efficiency of jet pumps.

Key words: experimental setup, jet pump, gas-liquid mixture, geometric parameters, oil well.

Вступ

Застосування струминних апаратів (СА) при насосному способі видобування нафти зі свердловин почалося наприкінці 20-го століття. Ідея застосування струминних насосів полягає в тому, щоб використати енергію відсепарованого газу для полегшення процесу підймання газоводонафтової суміші на поверхню. З цією метою вище основного насоса встановлюють струминний насос. Свердловинна суміш, потрапляючи в СА, завдяки своїй швидкості захоплює газорідинну суміш разом із відсепарованим газом із затрубного простору. Як показує практика, при цьому стабілізується робота основного насоса, корисно використовується енергія відсепарованого газу і, навіть, певною мірою збільшується дебіт свердловини [1].

Відомі і варіанти встановлення струминного апарату над динамічним рівнем [2]. Його функцією в даному випадку є відбір супутнього газу із затрубного простору, оскільки зворотний клапан, який забезпечував перепад цього газу в колекторну лінію, в умовах низьких температур може замерзати, що призводить до значного пониження динамічного рівня свердловини і, навіть, до зриву подачі насоса.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Постановка проблеми дослідження

Для створення надійних і ефективних СА для видобутку нафти потрібно керуватися теоретичними залежностями, що описують їх роботу. Завдання розробки теоретичних основ роботи струминних насосів в нафтових свердловинах висвітлюються в роботах [3, 4]. На сьогоднішній день існують залежності, що описують як роботу струминного насоса (обидва потоки в апараті є рідинами) [5], так і струмин-

ного апарату типу ежектора (один з потоків є рідиною, а інший – газом). Зокрема, аналітичні рівняння, які пов'язують між собою робочі умови у свердловині та параметри нафтогазового ежектора, дозволяють розв'язати задачу його ефективного місця розташування у нафтовій свердловині [6].

Була доведена і висока економічність нафтогазових ежекторів при їх використанні для газліфтного способу експлуатації свердловин [7, 8]. Загалом струминні апарати можуть покращити як роботу обладнання, разом з яким вони працюють, продовжуючи міжремонтний період, так і збільшити показники нафтовидобутку. Саме завдяки ряду цих переваг струминні апарати встановлюються у різних місцях всередині свердловини (біля вибою, під і над динамічним рівнем, на поверхні біля гирла) [9].

Однак, важливою і невід'ємною частиною будь-якого аналітичного дослідження є перевірка коректності одержаних залежностей на практиці. Лабораторні та промислові дослідження, які були проведені на сьогоднішній час, стосуються виявлення оптимальної геометрії струминного апарату, робочим потоком якого є газ [10], розрахунку збільшення обсягів та темпів відбору при додатковому встановленні струминного насоса всередині свердловини [11], а також порівняння ефективності роботи струминного апарату та штангового насоса [12].

При встановленні СА у нафтових свердловинах виникає необхідність у розумінні впливу тиску нафтового газу із затрубного простору, а також різниці між цим тиском і тиском робочої газоводонафтової суміші в приймальній камері апарату на його роботу. Така інформація потрібна для забезпечення оптимального місця його

розташування в свердловині вище її динамічного рівня. Основною залежністю, яка пов'язує між собою об'єми робочого та інжектованого потоків, які проходять через СА, із тисками робочого потоку на його вході та виході і в приймальній камері, є безрозмірна характеристика струминного апарату. Безрозмірна характеристика має вигляд $\Delta p_c / \Delta p_p(u)$ ($\Delta p_c = p_c - p_{in}$, $\Delta p_p = p_p - p_{in}$, $u = Q_{in} / Q_p$; p_c , p_p , p_{in} – тиски змішаного потоку на виході з струминного апарату, робочого потоку перед входом в СА і робочого та інжектованого потоків на вході у приймальну камеру; u – об'ємний коефіцієнт інжекції на вході в приймальну камеру; Q_{in} , Q_p – об'ємні витрати інжектованого та робочого потоків на вході в приймальну камеру) і до її символічного запису входять і геометричні параметри струминного апарату (діаметра сопла d_c і відношення площ f_3/f_{p1} , f_3 , f_{p1} – площі поперечних перерізів отворів камери змішування і сопла):

$$\frac{2f_{p1}}{(1+\xi_c)f_3} \left(p_p - p_{p1} + \frac{\rho_p w_p^2}{2} \right) \times \left[1 + \frac{\rho_{in} u^2}{\rho_p (f_3/f_{p1} - 1)} - \frac{f_{p1} \rho_p}{2} \left(1 + \frac{\rho_{in}}{\rho_p} u \right)^2 \left(\frac{\xi_0 + \xi_{кз} + 1}{f_3 \rho_3} + \frac{f_3 \rho_3}{f_c^2 \rho_c^2} \right) \right] - p_c \frac{\rho_3}{\rho_c} + p_{p1} = 0. \quad (1)$$

Провести експериментальне дослідження, в якому робочим потоком була б газова нафтова суміш, а інжектованим потоком – нафтовий газ, у лабораторних умовах немає можливості. Тому при проведенні лабораторного дослідження за робочий потік було взято воду, а за інжектований потік – повітря. Таким чином, дослідження виконувалось на водоповітряному СА. Однак, при конструюванні лабораторної установки було використано критерії подібності, які були знайдені за допомогою π -теорема, а тому фізичні процеси, які будуть відбуватися у моделі, є подібними до тих, що мають місце в реальній свердловині [13].

Мета і завдання дослідження

При зміні геометричних розмірів водоповітряного струминного апарату потрібно встановити тиски на вході і виході з нього і у приймальній камері, витрати води і повітря при різних тисках інжектованого повітря на вході в СА і різних навантаженнях на нього. На основі одержаних даних побудувати графіки та виконати аналіз впливу на роботу струминного апарату

його геометричних параметрів (діаметра сопла d_c і відношення площ f_3/f_{p1}), тиску повітря p_e перед СА, різниці тисків $p_e - p_{in}$, а також тиску p_c на виході з СА. Після цього можна буде зробити висновки, які ж саме геометричні параметри найбільшою мірою визначають ефективність роботи струминного апарату і в яких межах повинні знаходитися їх оптимальні значення.

Висвітлення основних методів дослідження

Для проведення лабораторного дослідження була виготовлена установка, гідравлічна схема якої зображена на рис. 1. Установка складається із приймального резервуара 1 об'ємом 200 л, електровідцентрового насоса серії JSWm15M, лічильника води GROSS MTK20 6, досліджуваного СА 7, поршневого компресора, газового редуктора 10, роторного газового лічильника G10 РЛ-ЕХ 11, вимірювальних приладів, які включають манометри 5, 9, 15 мановакууметр 14, а також кульові крани 4, 8, 13, 16, зворотні клапани 2, 3, 11, систему шлангів та різноманітну арматуру.

Лабораторна установка працює так: вода із приймального резервуара 1 подається в електровідцентровий насос, який нагнітає рідину через арматуру та лічильник води 6 у сопло струминного апарату. На виході із сопла в приймальній камері створюється понижений тиск і повітря, що подається компресором, проходить через газовий редуктор 10, газовий лічильник 11 у приймальну камеру. А далі вода і повітря перемішуються в камері змішування, суміш проходить через дифузори і гнучким трубопроводом – в приймальний резервуар установки.

Для проведення експериментального дослідження було виготовлено СА з двома різними камерами змішування (відрізняються камери змішування діаметрами отворів; у однієї камери діаметр отвору 10 мм, а в іншій – 12,5 мм), чотирма соплами, діаметр вихідного отвору яких $d_c = 5,0; 5,4; 6,2; 6,6$ мм і двома дифузорами (вихідні діаметри дифузорів 18 мм і 24 мм). Конструкція всього СА і окремо сопла зображені відповідно на рис. 2 і рис. 3.

У ході експериментального дослідження на лабораторній установці кожен дослід тривав 5 хв, записувалися значення витрати води і повітря на початку та в кінці досліду, тиск води перед СА, тиск у приймальній камері, тиск водоповітряної суміші після струминного апарату, тиск повітря на виході з газового редуктора, а також температура повітря після газового

1 – напірний резервуар; 2, 3, 12 – зворотний клапан; 4, 8, 13, 16 – кульовий кран;
5, 9, 15 – манометр; 6 – лічильник води; 7 – струминний апарат; 14 – мановакууметр;
10 – редуктор газовий; 11 – ротaційний лічильник газу

Рисунок 1 – Гідравлічна схема лабораторного стенда

Рисунок 2 – Конструкція водоповітряного струминного апарату

лічильника 11. Досліди проведено при установці в СА по черзі всіх сопел спочатку з камерою змішування $d_{кз}=12,5$ мм, а потім і з камерою змішування $d_{кз}=10$ мм. Аналогічні дослідження були здійснені і при заміні дифузора з діаметра $d_д=18$ мм на дифузор з більшим кутом розкриття. При виконанні дослідів змінювалося навантаження на СА (тиск на його вході та витрата). Найменше навантаження відповідає повністю відкритому крану 4 (рис. 1), а збільшення навантаження здійснювалося прикриванням крана 4. За допомогою газового редуктора виставлялося фіксоване значення тиску інжекто-

ваного повітря перед СА, і воно коливалося в межах 0,02 – 0,3 МПа.

Результати дослідження

Зручніше одержані результати проведених дослідів подати у вигляді графіків. На рис. 3 і рис. 4 зображено безрозмірні характеристики струминного апарату $\Delta p_c / \Delta p_p(u)$ з камерою змішування $d_{кз}=12,5$ мм для різних діаметрів сопел d_c і тиску інжектованого повітря відповідно 0,08 МПа і 0,14 МПа.

Рисунок 3 – Безрозмірна характеристика СА при тиску інжектованого повітря $p_e=0,08$ МПа та діаметрі камери змішування $d_{кз}=12,5$ мм для різних діаметрів сопла

Рисунок 4 – Безрозмірна характеристика СА при тиску інжектованого повітря $p_e=0,14$ МПа та діаметрі камери змішування $d_{кз}=12,5$ мм для різних діаметрів сопла

Збільшення коефіцієнта інжекції u , як видно на вказаних рисунках, для всіх сопел викликає зменшення безрозмірного тиску $\Delta p_c/\Delta p_p$, що зумовлено втратами тиску в камері змішування і дифузорі, а також зменшенням густини змішаного потоку на виході струминного апарату. Струминні апарати поділяються на високонапірні ($f_3/f_{p1} < 4$) та низьконапірні ($f_3/f_{p1} > 4$). Високонапірний апарат може створювати досить високий відносний тиск $\Delta p_c/\Delta p_p$ при малому коефіцієнті інжекції u . Його характеристика більш крута порівняно

з низьконапірними СА. Це наочно відображено на рис. 3 і 4. Із чотирьох сопел до високонапірного можна віднести тільки апарат з діаметром сопла $d_c=6,6$ мм. Характеристика цього струминного апарату на всіх трьох рисунках йде найбільш круто. Пояснюється це тим, що при одній і тій же площі f_3 камери змішування у випадку високонапірного струминного апарату є менша площа для входу інжектованого потоку в камеру змішування порівняно з низьконапірними СА. А тому створюється більший опір при проходженні інжектованого потоку.

При збільшенні коефіцієнта інжекції u відносний тиск $\Delta p_c / \Delta p_p$ виявляється меншим у високонапірного СА, ніж у низьконапірного. Викликано це явище тим, що при однаковому тиску на виході СА коефіцієнт інжекції низьконапірного СА є більшим, ніж у високонапірного за рахунок того, що відношення площ f_3 / f_{p1} у низьконапірного є більшим, ніж у високонапірного. Щоб порівняти відносні тиски $\Delta p_c / \Delta p_p$ у цих двох СА необхідно мати для них однакові коефіцієнти інжекції. Але при цьому тиск p_c на виході у низьконапірному СА збільшується у порівнянні з високонапірним.

Збільшення тиску p_e інжектованого повітря перед СА, як це видно із рис. 3 і 4, викликає збільшення коефіцієнта інжекції u . У випадку, коли $p_e = 0,08$ МПа, найбільший коефіцієнт інжекції $u \approx 0,37$ для СА з соплами $d_c = 5$ і $6,2$ мм (рис. 3). При $p_e = 0,14$ МПа найбільший коефіцієнт інжекції $u > 2$ для СА з соплом $d_c = 5$ мм (рис. 4).

Крім того, збільшення тиску p_e інжектованого повітря перед СА призводить до зменшення тиску на виході СА відносно тиску в його приймальній камері. В результаті відносний тиск $\Delta p_c / \Delta p_p$ стає від'ємним. Поясненням цього явища є те, що збільшення тиску повітря p_e спричиняє, з одного боку, підвищення тиску в приймальній камері і тиску робочого (водяного) потоку перед СА, а, з іншого, при цьому збільшується коефіцієнт інжекції u , що зумовлює зменшення тиску змішаного потоку на виході СА.

На рис. 5 і рис. 6 представлені залежності коефіцієнта інжекції u від тиску інжектованого повітря перед СА. Як для камери змішування $d_{кз} = 10$ мм, так і для камери змішування $d_{кз} = 12,5$ мм збільшення тиску повітря p_e забезпечує збільшення коефіцієнта інжекції u . Найбільше збільшення коефіцієнта інжекції u має місце в СА з діаметром сопла $d_c = 5$ мм, оскільки у випадку цього сопла є найбільша вільна площа поперечного перерізу камери змішування на її вході для інжектованого повітря.

Для СА з камерою змішування $d_{кз} = 12,5$ мм були проведені дослідження з більшим діапазоном зміни тиску повітря p_e . Виявилось, що існує за певного тиску повітря p_e максимум для коефіцієнта інжекції u . Наприклад, для СА з діаметром сопла $d_c = 5$ мм $u_{max} \approx 4,2$ (рис. 6).

На рис. 7 і рис. 8 зображені залежності відносного перепаду тиску $\Delta p_c / \Delta p_p$ від тиску p_e інжектованого повітря при діаметрах камери змішування відповідно $d_{кз} = 10$ мм і $d_{кз} = 12,5$ мм для чотирьох різних діаметрів сопел.

Із збільшенням тиску p_e інжектованого повітря відносний перепад тиску $\Delta p_c / \Delta p_p$ СА зменшується для обох камер змішування і всіх чотирьох сопел. Для СА з камерою змішування $d_{кз} = 12,5$ мм дослідження проводилися у більшому діапазоні тиску p_e . Виявилось, що на інтервалі $p_e = 0,1 \dots 0,15$ МПа функція $\Delta p_c / \Delta p_p(p_e)$ має мінімум для всіх сопел. При цьому величина $\Delta p_c / \Delta p_p$ стає від'ємною, оскільки тиск p_c є меншим від тиску p_{p1} у приймальній камері СА (p_{p1} – тиск робочого потоку на виході із сопла; $p_{p1} = p_{in}$).

Аналіз отриманих числових значень величин тисків p_e , p_p , p_{p1} , p_c і витрат повітря Q_n та води Q_v показує, що зі збільшенням тиску p_e інжектованого повітря витрата повітря Q_n зростає. Але при певному значенні цього тиску витрата Q_n досягає максимуму і подальше зростання тиску p_e вже не викликає збільшення витрати Q_n , а навпаки – її зменшення. З іншого боку, найбільшій витраті Q_n повітря відповідає і найбільша різниця тисків $p_e - p_{p1}$. Подальше зростання тиску p_e інжектованого повітря викликає зменшення витрати повітря Q_n і різниці тисків $p_e - p_{p1}$. Це зумовлено тим, що опір переміщенню інжектованого повітря в камері змішування досягає такої величини, за якої стає неможливим подальше збільшення витрати Q_n , а тому інтенсивніше зростає тиск у приймальній камері СА. При цьому відносний перепад тиску збільшується.

На рис. 9 зображені залежності коефіцієнта інжекції u від перепаду тиску $p_e - p_{in}$ (величини «підпору») для СА з камерою змішування $d_{кз} = 12,5$ мм і чотирма різними соплами. При збільшенні різниці тисків $p_e - p_{in}$ коефіцієнт інжекції u збільшується для СА з усіма чотирма досліджуваними соплами. Найбільше зростання величини u виявилось в СА з соплом $d_c = 5$ мм, оскільки у випадку цього сопла відношення площ f_3 / f_{p1} є найбільшим.

Рисунок 5 – Залежність коефіцієнта інжекції u від тиску інжектуюваного повітря p_e при діаметрі камери змішування $d_{kз}=10$ мм

Рисунок 6 – Залежність коефіцієнта інжекції u від тиску інжектуюваного повітря p_e при діаметрі камери змішування $d_{kз}=12,5$ мм

Як виявилось, тиск p_p робочого потоку (води) перед СА також залежить від тиску p_e інжектуюваного повітря. Для СА з камерами змішування $d_{kз}=10$ мм і $d_{kз}=12,5$ мм і різними соплами збільшення тиску p_e повітря перед СА призводить до збільшення тиску p_p робочого потоку.

Результати експериментального дослідження, а саме відносний перепад тисків на струминному апараті $\Delta p_c / \Delta p_p$, порівнювалися

зі розрахунковими результатами, отриманими за формулою (1). Порівняльне дослідження виконувалося для водоповітряного ежектора з діаметром сопла $d_c = 6,6$ мм, діаметром камери змішування $d_{kз} = 12,5$ мм, діаметром отвору при вході в сопло $d_p = 12$ мм та діаметром отвору на виході дифузора $d_c = 25,4$ мм.

Оскільки експериментальне дослідження виконувалося при надлишковому тиску повітря перед ежектором, то у такому випадку коефіцієнт інжекції буде рівним

Рисунок 7 – Залежність відносного перепаду тиску від тиску інжектуюваного повітря при діаметрі камери змішування $d_{кз}=10$ мм

Рисунок 8 – Залежність відносного перепаду тиску від тиску інжектуюваного повітря при діаметрі камери змішування $d_{кз}=12,5$ мм

Рисунок 9 – Залежність коефіцієнта інжекції u від перепаду тиску $p_e - p_{in}$ при діаметрі камери змішування $d_{кз}=12,5$ мм

Таблиця 1 – Порівняння значень відносного перепаду тиску в струминному апараті, знайдених експериментально і обчисленням

№ з/п	Вихідні змінні величини		Відносний перепад тиску в ежекторі $\Delta p_c / \Delta p_p$		Абсолютна розбіжність результатів (похибка)
	Надлишковий тиск повітря перед ежектором p_e , МПа	Надлишковий тиск на виході ежектора p_c , МПа	Експериментальні результати	Результати обчислень за формулою (1)	
1	0	0,043	0,374	0,408	0,034
2	0,02	0,052	0,257	0,280	0,023
3	0,03	0,056	0,218	0,234	0,016
4	0,04	0,059	0,185	0,138	0,047
5	0,05	0,063	0,135	0,096	0,039
6	0,06	0,066	0,076	0,060	0,016
7	0,07	0,069	0,035	0,035	0
8	0,08	0,072	0,016	0,012	0,004
9	0,09	0,074	-0,013	-0,009	0,004
10	0,10	0,080	-0,044	-0,029	0,015
11	0,12	0,090	-0,095	-0,064	0,031
12	0,15	0,105	-0,10	-0,087	0,013
13	0,165	0,115	-0,105	-0,092	0,013

$$u = \frac{\varphi_c f_{in} \sqrt{2 \frac{k}{k-1} p_e \frac{1}{\rho_e} \left[1 - \left(\frac{p_{p1}}{p_e} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}}{w_{p1} f_{p1}}, \quad (2)$$

де φ_c – коефіцієнт опору отвору для інжектування газу;

ρ_e – густина інжектowanego повітря перед ежектором.

Рівняння (2) підставлялося у (1). В результаті отримано рівняння з двома змінними величинами, а саме, тисками p_e і p_c . Після розв'язання рівняння (1) були визначені для кожної із заданих пар значень тисків p_e і p_c невідомі тиски p_{p1} і p_p , а, отже, і відносний перепад тиску в СА – $\Delta p_c / \Delta p_p$. Значення коефіцієнтів опору струминного апарату були прийняті: $\xi_c = 0,095$, $\xi_{кз} = 0,05$, $\xi_o = 0,19$ і діаметр отвору зворотного клапана, через який повітря надходить у приймальну камеру, – $d_{in} \approx 5$ мм.

Отримані результати обчислень та результати експериментального дослідження представлено у табл. 1.

Як видно із табл. 1, одержано задовільно близькі значення відносного перепаду тиску в СА, розраховані за теоретичними залежностями і вимірними експериментальним шляхом. Абсолютна похибка результатів не перевищує

0,047 при максимальному експериментальному значенні відносного перепаду тиску $\Delta p_c / \Delta p_p = 0,374$.

Висновки

Враховуючи результати виконаних дослідів і їх проведений вище аналіз, можна зробити низку висновків.

Високонапірні струминні апарати дозволяють отримати порівняно високий відносний тиск $\Delta p_c / \Delta p_p$, але при порівняно невеликому коефіцієнті інжекції u , а низьконапірні забезпечують невисокий відносний тиск, але при досить значному коефіцієнті інжекції.

Геометричні параметри струминного апарату, а саме, діаметр сопла d_c і відношення площ f_3 / f_{p1} отворів камери змішування та сопла мають велике значення при роботі водоповітряних СА. Чим менший діаметр сопла d_c , тим більший коефіцієнт інжекції u може бути досягнутий при роботі струминного апарату з різними камерами змішування.

Меншому діаметру сопла d_c відповідає вищий тиск p_p робочого потоку на вході в струминний апарат як при зростанні тиску інжектowanego повітря, так і при зростанні тиску p_c .

Зростання тиску p_e інжектованого повітря викликає збільшення коефіцієнта інжекції u для струминного апарату з різними діаметрами сопел і камер змішування. Для струминного апарату з камерою змішування $d_{кз}=12,5$ мм і соплами $d_c=5; 5,4$ і $6,2$ мм встановлено, що при тиску інжектованого повітря в діапазоні $p_e=0,15\ldots 0,18$ МПа існує максимум для коефіцієнта інжекції u .

Збільшення тиску p_e інжектованого потоку зменшує відносний перепад тиску $\Delta p_c/\Delta p_p$ і при певних значеннях цього тиску відносний перепад тиску $\Delta p_c/\Delta p_p$ стає від'ємним (при цьому тиск на вході струминного апарату менший за тиск у приймальній камері). Для струминного апарату з камерою змішування $d_{кз}=12,5$ мм встановлено існування мінімуму відносного перепаду тиску при значеннях тиску p_e в діапазоні $0,1\ldots 0,15$ МПа.

Зростання різниці тисків інжектованого повітря і тиску в приймальній камері струминного апарату $p_e - p_{in}$ збільшує коефіцієнт інжекції.

При збільшенні тиску p_e інжектованого повітря збільшується тиск робочого потоку (води) на вході в струминний апарат.

Сформульовані висновки є справедливими і для свердловинного нафтогазового ежектора. Зрозуміло, що кількісні залежності між параметрами нафтогазового і водоповітряного струминних апаратів будуть різними. Тому не можна, наприклад, при однаковій конструкції нафтогазового і водоповітряного струминних апаратів і однакових тисках інжектованих і змішаних потоків для обох ежекторів при відомому тиску робочого потоку для водоповітряного струминного апарату на його вході дати відповідь на питання, який буде тиск робочого потоку на вході в нафтогазовий ежектор. Для отримання відповіді на це і подібні питання потрібні додаткові дослідження.

Література

1. Мищенко И.Т., Губерский Х.Х., Марьенко В.П. Струйные насосы для добычи нефти. М.: Нефть и газ, 1996. 150 с.
2. Молчанова В.А., Топольников А.С. Исследование эффективности устройства для откачки газа из затрубного пространства. *Нефтепромысловое дело*. 2007. № 10. С. 34-40.
3. Telkov V.P. Improvement of oil recovery by jet and electrical centrifugal pumping technology of water/gas influence. *Works of SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. California, U.S.A. 2007. pp. 4-9.
4. Атнабаев З.М. Скважинные эжекторы для предотвращения повышения затрубного давления и срыва подачи УЭЦН. *Нефтяное хозяйство*. 2001. №4. С. 72-74.
5. Shen J., Wu X., Wang J. Application of composite jet-rod pumping system in a system in a deep heavy-oil field in Tarim China. *Works of SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Florence, Italy. 2010. P. 8.
6. Dubei O. Analytical study of the efficient operation modes of oil-gas jet pumps used in oil wells. *AGH DRILLING, OIL, GAS. QUARTERLY*. 2019. №1, Vol. 36. P. 19-29.
7. Fedorov A.E., Verbitsky V.S., Goridko K.A. Experimental studies and analysis of gas-jet device's operation characteristics for oil and gas production in abnormal operating conditions. *Works of SPE Russian Petroleum Technology Conference and Exhibition*. Moscow, 2016. P. 1-28.
8. Mei W. Surface jet pump trial test in Safania Field: evaluation and case study. *Works of SPE Kingdom of Saudi Arabia Annual Technical Symposium and Exhibition*. Dammam, Saudi Arabia. 2017. P. 1-11.
9. Drozdov A.N., Drozdov N.A. Prospects of development of jet pump's well operation technology in Russia. *Works of SPE Russian Technology Conference*. Moscow, 2015. P. 1-14.
10. Kurkjian A.L. Optimizing jet-pump production in the presence of gas. *SPE Production & Operations*. 2018. No 34 P. 1-12.
11. Kumar S., Kalwar S.A., Farouque K., Qureshi S., Anjum Z.A. Production enhancement by installation of jet pump in SSD in Pakistan Ghauri Oil Field. *Works of SPE Middle East Artificial Lift Conference and Exhibition*. Manama, Kingdom of Bahrain, 2016. P. 1-11.
12. Kalwar S.A., Awan A.Q. Optimum selection and application of hydraulic jet pump for well-1A: a case study. *Works of SPE Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference*. Abu Dhabi, UAE. 2017. P. 1-10.
13. Паневник О.В., Дубей О.Я. Моделирование работы эжектора при його одночасній компоновці зі свердловинним штанговим насосом у нафтовій свердловині. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2014. № 3(52). С. 51-59.

References

1. Mishchenko I.T., Guberskij H.H., Marenko V.P. Struynye nasosy dlya dobychi nefi. Moscow: Neft i gaz, 1996. 150 p. [in Russian]
2. Molchanova V.A., Topolnikov A.S. Issledovanie effektivnosti ustroystva dlya otkachki gaza iz zatrubnogo prostranstva *Neftepromyslovoe delo* [Oilfield Engineering]. 2007. No. 10. P. 34-40. [in Russian]
3. Telkov V.P. Improvement of oil recovery by jet and electrical centrifugal pumping technology of water/gas influence, Conference: *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, At Anaheim, California, U.S.A. 2007. P. 4-9. DOI: 10.2523/114332-STU
4. Atnabaev Z.M. Skvazhinnye ezhektory dlya predotvrascheniya povysheniya zatrubnogo davleniya i sryva podachi UECN. *Neftyanoe hozyajstvo*. 2001. No. 4. P. 72-74. [in Russian]
5. Shen J., X. Wu, Wang J. Application of composite jet-rod pumping system in a system in a deep heavy-oil field in Tarim China. *Works of SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Florence, Italy. 2010. P. 8. DOI: 10.2118/134068-MS
6. Dubei O. Analytical study of the efficient operation modes of oil-gas jet pumps used in oil wells. *AGH Drilling, Oil, Gas*. 2019. No. 1. Vol. 36. P. 19-29. DOI 10.7494/drill.2019.36.1.19
7. Fedorov A.E., Verbitsky V.S., Goridko K.A. Experimental studies and analysis of gas-jet device's operation characteristics for oil and gas production in abnormal operating conditions. *Works of SPE Russian Petroleum Technology Conference and Exhibition*. Moscow, 2016. P. 1-28.
8. Mei W. Surface jet pump trial test in Safania Field: evaluation and case study. *Works of SPE Kingdom of Saudi Arabia Annual Technical Symposium and Exhibition*. Dammam, Saudi Arabia. 2017. P. 1-11. DOI: 10.2118/187985-MS
9. Drozdov A.N., Drozdov N.A. Prospects of development of jet pump's well operation technology in Russia. *SPE Russian Petroleum Technology Conference*, 26-28 October, Moscow, Russia. 2015. P. 1-14. <https://doi.org/10.2118/176676-MS>
10. Kurkjian A.L. Optimazing jet-pump production in the presence of gas. *SPE Production & Operations*. 2018. no. 34. P. 1-12. <https://doi.org/10.2118/191382-PA>
11. Kumar S., Kalwar S.A., Farouque K., Qureshi S., Anjum Z.A. Production enhancement by installation of jet pump in SSD in Pakistan Ghauri Oil Field. *SPE Middle East Artificial Lift Conference and Exhibition*, 30 November-1 December.2016/ Manama, Kingdom of Bahrain. P. 1-11. <https://doi.org/10.2118/184205-MS>
12. Kalwar S.A., Awan A.Q. Optimum selection and application of hydraulic jet pump for well-1A: a case study. *Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference*, 13-16. November 2017. Abu Dhabi, UAE . P. 1-10.
13. Panevnyk O.V., Dubei O.Ya. Modeliuvannia roboty ezhektora pry yoho odnochasnii komponovtsi zi sverdlovynnym shtanhovym nasosom u naftovii sverdlovyni [Simulation of Jet Pump Operation when it is Simultaneously Connected with Sucker Rod Pump in Oil Well]. *Rozvidka ta rozrobka naftovykh i hazovykh rodovyshch*. [Prospecting and Development of Oil and Gas Fields]. 2014. no. 3(52). P. 41-48. [in Ukrainian]