

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВОДОГАЗОВОГО ЕЖЕКТОРА В ПРОЦЕСІ ІНЖЕКТУВАННЯ ВУГЛЕКИСЛОГО ГАЗУ

О.В. Паневник, О.Я. Дубей

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

*В останні роки запропоновано використовувати струминні апарати (ежектори) у нафтових свердловинах, що експлуатуються свердловинними штанговими насосами, при їх встановленні вище динамічного рівня свердловини. Такі ежектори відбиратимуть газ із затрубного простору, що полегшить вилучення продукції свердловини.*

*З метою перевірки можливості застосування ежекторів під час експлуатації нафтових свердловин штанговими насосами була виготовлена лабораторна водогазова ежекторна установка. Для інжекційного потоку вибрано вуглекислий газ, який розчиняється у воді так само добре, як нафтовий газ добре розчиняється у нафті. Вуглекислий газ подавався в ежектор із газового балона.*

*У ході експериментального дослідження змінювався тиск інжектowanego вуглекислого газу перед входом в ежектор, тиск на виході ежектора. Експерименти проводили зі змінними соплами і камерами змішування. Отримані результати порівнювали з результатами раніше проведеного на цій же установці дослідження в умовах інжекції повітря, що подавалося компресором. Встановлено суттєву різницю у безрозмірних характеристиках ежекторів при інжекції повітря та вуглекислого газу.*

*У випадку нафтогазового ежектора, коли інжектowanym газом є нафтовий газ із затрубного простору свердловини, на виході ежектора завжди матимемо водонафтову суміш і газ, який складається із вільного нафтового газу перед ежектором та інжектowanego нафтового газу. Крім того, після виходу із ежектора розчинений у нафті газ виділятиметься із нафти.*

**Ключові слова:** нафтова свердловина, ежектор, затрубний простір, вуглекислий газ, лабораторна водогазова ежекторна установка.

*В последние годы предложено использовать струйные аппараты (эжекторы) в нефтяных скважинах, которые эксплуатируются скважинными штанговыми насосами, при их установке выше динамического уровня скважины. Такие эжекторы будут отбирать газ из затрубного пространства, что облегчит подъем продукции скважины на поверхность.*

*С целью проверки возможности применения эжекторов при эксплуатации нефтяных скважин штанговыми насосами была изготовлена лабораторная водогазового эжекторная установка. В качестве инжекционного потока выбран углекислый газ, растворимый в воде также хорошо, как нефтяной газ хорошо растворяется в нефти. Углекислый газ подавался в эжектор из газового баллона.*

*При экспериментальном исследовании изменяли давление инжектируемого углекислого газа перед входом в эжектор, давление на выходе эжектора. Эксперименты выполнялись со сменными соплами и камерами смешения. Полученные результаты сравнивались с результатами ранее проведенного исследования на этой же установке при инжекции воздуха, который подавался компрессором. Установлена существенная разница в безразмерных характеристиках эжекторов при инжекции воздуха и углекислого газа.*

*В случае нефтегазового эжектора, когда инжектируемым газом является нефтяной газ из затрубного пространства скважины, на выходе эжектора всегда будем иметь водонефтяную смесь и газ, который состоит из свободного нефтяного газа перед эжектором и инжектируемого нефтяного газа. Кроме этого, после выхода из эжектора растворенный в нефти газ будет выделяться из нефти.*

**Ключевые слова:** нефтяная скважина, эжектор, затрубное пространство, углекислый газ, лабораторная водогазовая эжекторная установка.

*In recent years, it was suggested to use jet devices (ejectors) in oil wells, operated with the help of the sucker rod pumps, when they are installed above the dynamic head of the well. These ejectors will absorb gas from the annulus that will facilitate extraction of the well's production.*

*In order to test the possibility of ejectors usage when operating oil wells with the help of the sucker rod pumps, a water-gas ejector laboratory unit was developed. Carbon dioxide that dissolves in water just as well as petroleum gas dissolves in oil was selected for the injection flow. Carbon dioxide is fed into the ejector from the gas cylinder.*

*During the experimental study we changed the pressure of the injected carbon dioxide at the inlet of the ejector, the pressure at the outlet of the ejector. Experiments were performed with replaceable nozzles and mixing chambers. The obtained results were compared with the results of the previously conducted studies on the same unit under the conditions of injection of air fed by the compressor. A significant difference in the dimensionless characteristics of ejectors was established when injecting air and carbon dioxide.*

*In the case of oil-and-gas ejector, when the injected gas is petroleum gas from the well annulus, at the ejector outlet, we will always have water-oil mixture and gas, which consists of free petroleum gas before the ejector and injected petroleum gas. In addition, after the ejector outlet, the gas dissolved in oil will escape from it.*

**Keywords:** oil well, ejector, annular space, carbon dioxide, water-gas ejector laboratory unit.

**Вступ. Постановка проблеми.** За останні 20 років все більше використання знаходять струминні апарати (насоси) під час видобування

нафти. Їх встановлюють вище електровідцентрового насоса (ЕВН). У цьому випадку свердловинна газоводонафтова суміш після ЕВН по-

трапляє в СН. У прийомній камері СН у результаті зниження тиску робочої газодонафтової суміші відбувається захоплення нею відсепарованого газу із затрубного простору. При цьому покращується робота ЕВН, корисно використовується енергія відсепарованого газу, і навіть дещо збільшується дебіт свердловини [1].

Відомий приклад, коли струминний апарат (ежектор) встановлювали вище динамічного рівня свердловини з метою відбору нафтового газу із затрубного простору. Це було викликано незадовільною роботою перепускного диференціального клапана, який відкривається тоді, коли тиск у затрубному просторі свердловини перевищує тиск у колекторній лінії. При зниженні температури цей клапан часто замерзав, що призводило до різкого зниження динамічного рівня свердловини і до зриву подачі ЕВН. Встановлення ежектора вище динамічного рівня свердловини забезпечило стабілізацію роботи ЕВН [2].

Останнім часом запропоновано використання свердловинного ежектора у нафтових свердловинах, які експлуатуються свердловинним штанговим насосом (СШН) [3]. Такий ежектор потрібно встановлювати вище динамічного рівня свердловини. Він відбиратиме нафтовий газ із її затрубного простору, що полегшить підймання продукції свердловини на поверхню.

Під час роботи цього ежектора у свердловині тиск у його прийомній камері протягом одного циклу роботи штангового насоса змінюється. Це викликано тим, що швидкість руху робочого потоку протягом одного циклу роботи насоса змінюється від нуля до максимуму і далі знову до нуля – як під час руху плунжера насоса угору, так і вниз [4].

При змінному тиску в прийомній камері ежектора можливі декілька варіантів роботи ежектора:

- тиск у прийомній камері протягом всього циклу роботи насоса більший за тиск газу в затрубному просторі. При цьому газ із затрубного простору не надходить в ежектор;

- тиск у прийомній камері ежектора на частині циклу роботи плунжерного насоса менший за тиск газу в затрубному просторі, а тому на частині циклу газ із затрубного простору надходить в прийомну камеру ежектора;

- тиск у прийомній камері ежектора на значній частині циклу менший за тиск газу в затрубному просторі. Це викликатиме надходження попутного нафтового газу в ежектор і, крім того, в певній частині циклу насоса створюватиметься різниця між тиском газу в затрубному просторі і тиском у прийомній камері ежектора, тобто ежектор працюватиме з «підпором».

У роботі [5] наведено опис експериментального дослідження роботи водоповітряного ежектора на лабораторній установці. Тут значна увага приділена аналізу роботи ежектора при зростанні тиску повітря перед ежектором, а також при його роботі з «підпором». Висновки,

отримані за результатами виконаного дослідження, є важливими при практичному застосуванні ежекторів у нафтових свердловинах, що експлуатуються СШН. Однак залишилася ще одна невирішена проблема. Справа в тому, що інжектований нафтовий газ у нафтогазових ежекторах досить добре розчиняється у нафті, а інжектване повітря, про яке йдеться в [5], погано розчиняється у воді. У зв'язку з цим необхідно дослідити, як розчинність газу інжектваного потоку в рідині робочого потоку впливає на роботу ежектора.

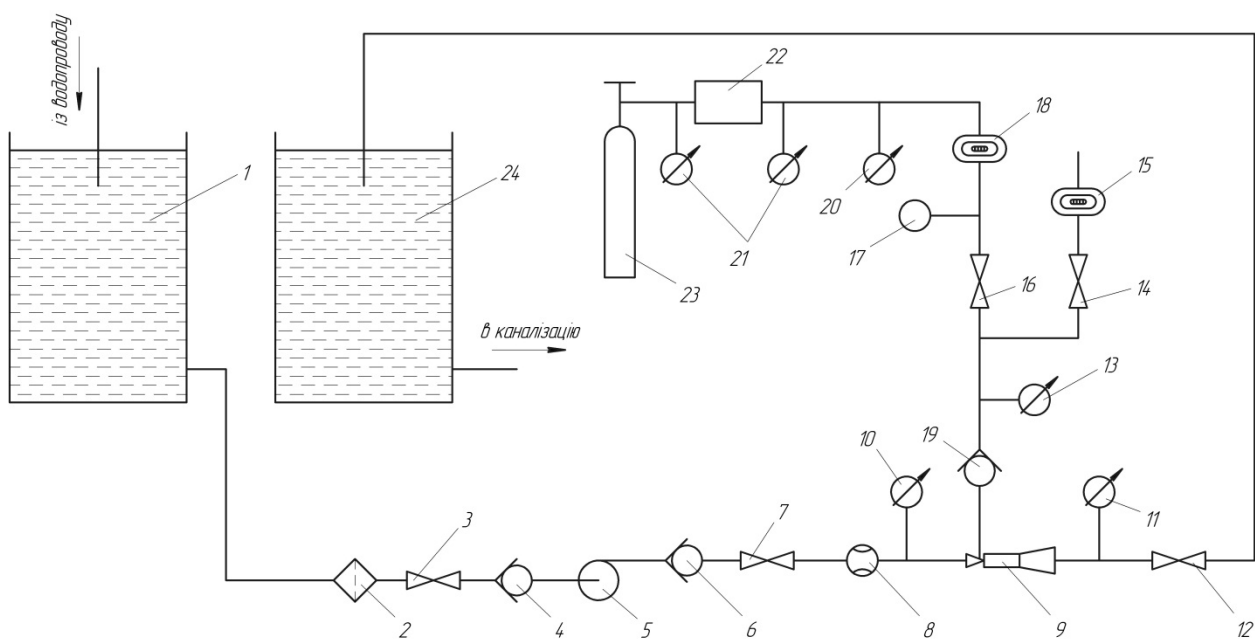
**Мета роботи.** Метою даної роботи є аналіз результатів дослідження роботи ежектора, який використовувався у ході проведення досліджень, що викладені в [5], при заміні повітряного інжектваного потоку на вуглекислий газ і порівняння отриманих результатів з результатами роботи [5].

Вибір вуглекислого газу як газу інжектваного потоку є вдалим, оскільки загальновідомо, що цей газ, на відміну від повітря, добре розчиняється у воді. Порівняння результатів досліджень з цими двома інжектованими газами в ежекторі повинно вирішити поставлену проблему.

**Основна частина.** Для проведення лабораторного дослідження використана лабораторна установка, гідравлічна схема якої зображена на рис. 1. Ця установка відрізняється від установки, описаної в [5], тільки тим, що інжектований газ надходить не від компресора, а із балона з вуглекислим газом, крім того в ній замість одного використано два резервуари: один резервуар для води, а другий резервуар є прийомним резервуаром для змішаного потоку (води з вуглекислим газом).

Установка складається із резервуара води 1, прийомного резервуара змішаного потоку 24, об'єми яких – по 200 л, відцентрового насоса JSWm15M (серія 5), лічильника води GROSS MTK20 8, досліджуваного ежектора 9, роторного газового лічильника G10 PL-EX 18, лічильника газу Арсенал GMS G6 15, газового балона з вуглекислим газом 23, редуктора балона 22, вимірювальних приладів, які включають манометри 10, 11, 20, 21, мановакууметр 13, біметалевий термометр ТБ 17, а також кульові крани 3, 7, 12, 14, 16, фільтр 2 для насоса, зворотні клапани 4, 6, 19, систему гнучких шлангів та різноманітну арматуру.

Лабораторна установка працює так: вода із резервуара 1 подається в насос 5, який нагнітає рідину через лічильник води 8 у сопло ежектора. На виході із сопла ежектора в прийомній камері створюється понижений тиск і вуглекислий газ, що подається із балона 23, проходить через редуктор 22, газовий лічильник 18 при відкритому крані 16 і закритому крані 14 надходить у прийомну камеру ежектора. А далі вода і вуглекислий газ перемішуються в камері змішування ежектора, суміш проходить через дифузор ежектора 9 і при відкритому крані 12 потрапляє гнучким трубопроводом в прийом-



1 – резервуар води; 2 – фільтр насоса; 3, 7, 12, 14, 16 – крани; 4, 6, 19 – зворотні клапани; 5 – відцентровий насос JSWm15M; 8 – лічильник води GROSS MTK20; 9 – ежектор; 10, 11, 20 – манометри ДМ 05 – МП – ЗУ 100 – 0,6 МПа; 13 – мановакуумметр ДА 05160 – (-100 +500 кПа); 15 – газовий лічильник Арсенал GMSG6; 17 – термометр ТБ – 80 – 50 0+120 – 1,5; 18 – лічильник газу ротаційний G10 РЛ – ЕХ; 21 – манометр редуктора газового балона з CO<sub>2</sub>; 22 – редуктор балона; 23 – газовий балон з CO<sub>2</sub>; 24 – приймальний резервуар для води з CO<sub>2</sub>

Рисунок 1 – Гідралічна схема лабораторної установки

ний резервуар 24. Якщо ж кран 16 закритий, а кран 14 відкритий, то повітря із атмосфери проходить у прийомну камеру ежектора. У випадку, якщо в камері створено тиск, нижчий атмосферного, тобто у цьому випадку ежектор відсмоктуватиме повітря із навколишнього середовища.

При проведенні експериментального дослідження використано дві різні камери змішування (відрізняються камери змішування діаметрами отворів; у однієї камери діаметр отвору 10 мм, а в іншій – 12,5 мм) і чотири сопла, діаметр вихідного отвору яких  $d_c = 5,0; 5,4; 6,2$  і  $6,6$  мм.

Кожен дослід на лабораторній установці тривав 5 хв, записувалися покази лічильників води і вуглекислого газу на початку та в кінці досліду, тиск води перед ежектором, тиск у прийомній камері, тиск суміші води з вуглекислим газом після ежектора, тиск вуглекислого газу перед газовим лічильником за показами манометра 20, а також температура вуглекислого газу після газового лічильника 18. Досліди було проведено при установці в ежектор по черзі всіх сопел як з камерою змішування  $d_{кз} = 12,5$  мм, так і з камерою змішування  $d_{кз} = 10$  мм. При виконанні дослідів змінювалося навантаження на ежектор. Найменше навантаження відповідає повністю відкритому крану 12 (рис. 1). Навантаження на ежектор підвищували прикриванням крана 12. Крім того, змінювався тиск інжектваного вуглекислого газу перед ежектором. Але створити суттєвий перепад тиску між показами манометра 20 і манова-

куметра 13 при відкритому крані 12 було важко, на відміну від випадку, коли інжектванним потоком було повітря. Це, очевидно, пояснюється малою витратою газу, яку можна створити через редуктор 22.

За результатами проведених дослідів побудовано низку графіків. На рис. 2 зображені безрозмірні характеристики ежекторів  $\Delta p_c / \Delta p_p (u)$  для випадку, коли діаметр камери змішування  $d_{кз} = 10$  мм ( $\Delta p_c = p_c - p_{p1}$ ,  $\Delta p_p = p_p - p_{p1}$ ;  $p_p, p_c, p_{p1}$  – тиски відповідно робочого потоку на вході в ежектор, змішаного потоку на виході з нього і тиск у прийомній камері ежектора;  $u = Q_{in} / Q_p$  – коефіцієнт інжекції на вході в прийомну камеру;  $Q_{in}, Q_p$  – об'єми інжектваного та робочого потоків на вході в прийомну камеру). Криві 1, 2, 3 на рис. 2 відповідають діаметрам сопел відповідно  $d_c = 5,4; 5$  і  $6,6$  мм. Відношення  $f_3 / f_{p1}$  – це відношення площ поперечних перерізів отворів камери змішування і сопла.

Збільшення коефіцієнта інжекції  $u$  (рис. 2), як і у випадку повітряного інжектваного потоку (див. роботу [5]), для всіх сопел викликає зменшення відносного тиску  $\Delta p_c / \Delta p_p$ , що зумовлено втратами тиску в камері змішування і дифузори, а також зменшенням густини змішаного потоку на виході ежектора.

Для випадку інжектваного вуглекислого газу не цілком справедлива класифікація струминних апаратів Е.Я. Соколова і Н.М. Зінгера

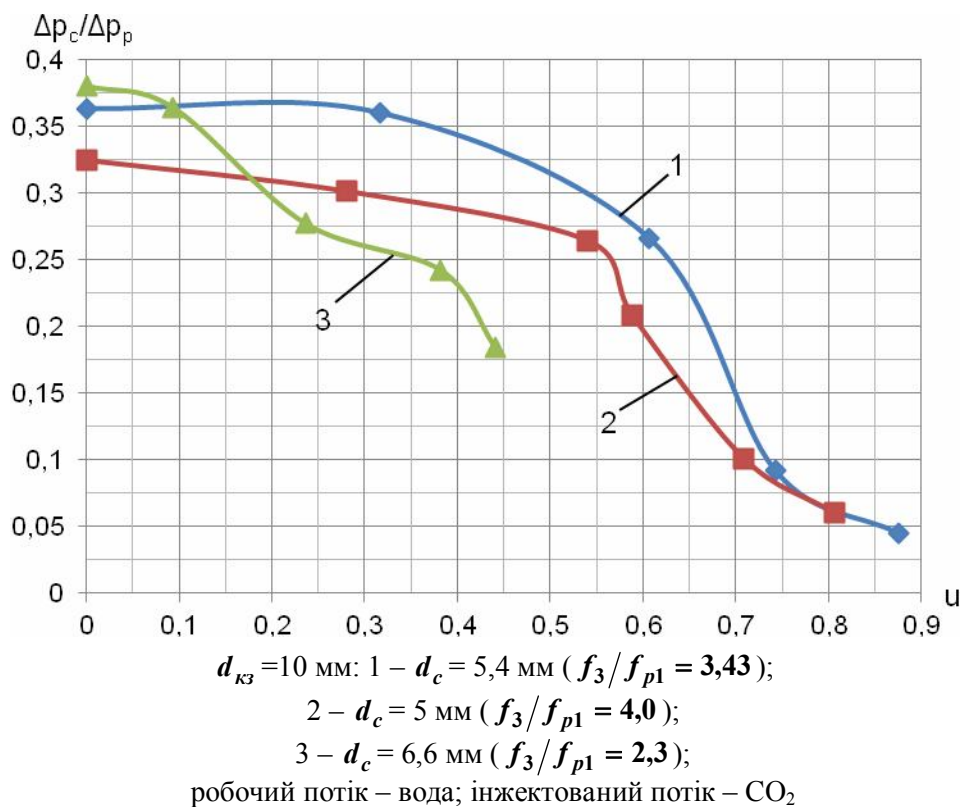


Рисунок 2 – Безрозмірні характеристики ежекторів

[6], згідно з якою апарати ділять на високонапірні ( $f_3/f_{p1} < 4$ ) і низьконапірні ( $f_3/f_{p1} \geq 4$ ). Високонапірний ежектор (апарат) створює досить високий відносний тиск  $\Delta p_c/\Delta p_p$  при малому коефіцієнті інжекції  $u$ , а низьконапірний забезпечує досить великий коефіцієнт інжекції, але при малому відносному тиску.

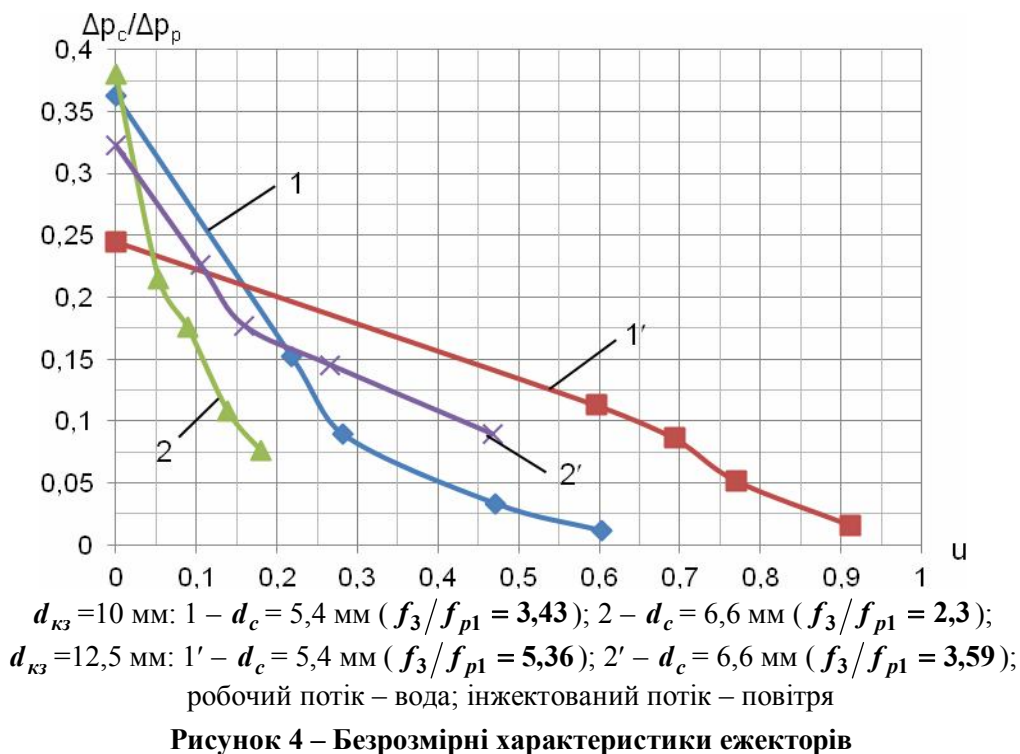
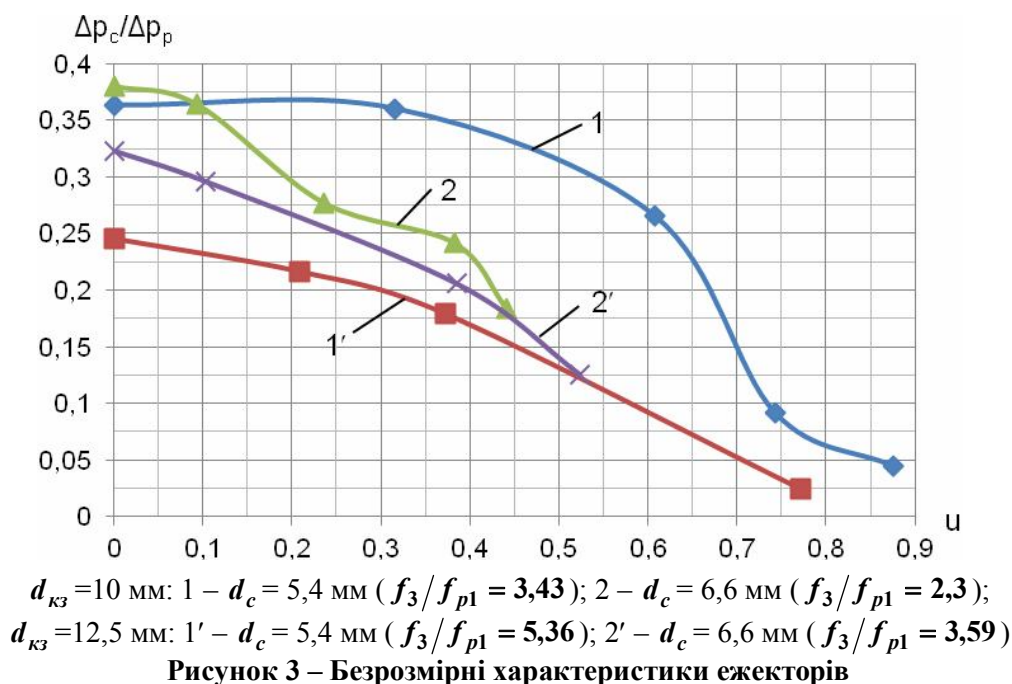
Ежектор з діаметром сопла  $d_c = 5,4 \text{ мм}$  (крива 1 на рис. 2) потрібно було б за вказаною класифікацією віднести до високонапірних ежекторів, однак він у даному випадку забезпечує досить високий коефіцієнт інжекції, і його характеристика при малих значеннях  $u$  є практично горизонтальною лінією, що не характерно для високонапірних ежекторів. Класифікацію Е.Я. Соколова і Н.М. Зінгера у даному випадку можна вважати справедливою, але при меншому граничному відношенні  $f_3/f_{p1}$  між високонапірними і низьконапірними ежекторами.

На рис. 3 і 4 зображено безрозмірні характеристики ежекторів. Ежектори, які мають однакові діаметри сопел  $d_c$  і однакові діаметри камери змішування  $d_{кз}$ , їх характеристики позначені на цих рисунках однаковими цифрами. Різниця між рисунками полягає в тому, що на рис. 3 показано безрозмірні характеристики ежекторів, коли інжектованим потоком є вуглекислий газ, а на рис. 4 безрозмірні характеристики відповідають інжектованому потоку повітря. Із рисунків добре видно, що характер відповідних кривих тим суттєвіше відрізняється

між собою, чим меншим є відношення  $f_3/f_{p1}$ . Для кривих 1 відношення  $f_3/f_{p1}$  є найбільшим ( $f_3/f_{p1} = 5,36$ ) і ці криві відрізняються між собою найменше.

Виникає питання, з чим це пов'язано. Розміщення кривих на рис. 4 пояснюється досить просто. Чим меншим є відношення  $f_3/f_{p1}$ , тим характеристика представляє собою сильніше виражену спадну функцію (крива на рисунку йде більш круто вниз). Це зумовлено тим, що зі зменшенням відношення  $f_3/f_{p1}$  при вході в камеру змішування для інжектованого повітря залишається все менша частина площі поперечного перерізу отвору камери змішування для його входу в неї і, крім того, повітря погано розчиняється у воді. Все це викликає збільшення втрат на тертя у камері змішування ежектора.

А як пояснити характер кривих на рис. 3 у випадку інжектованого вуглекислого газу, наприклад, кривої 1? Спочатку крива 1 на інтервалі  $0 \leq u \leq 0,3$  розміщена майже горизонтально, а при  $u > 0,3$  спадає. Пояснити це можна, якщо врахувати, що вуглекислий газ дуже добре розчиняється у воді, на відміну від повітря. На інтервалі  $0 \leq u \leq 0,3$  кількість вуглекислого газу, яка потрапляє в прийомну камеру ежектора є невеликою, і більша його частина розчиняється у воді (робочому потоці). Опір при цьому в камері змішування буде незначний, і характеристика ежектора буде зображатися майже горизонтальною лінією.

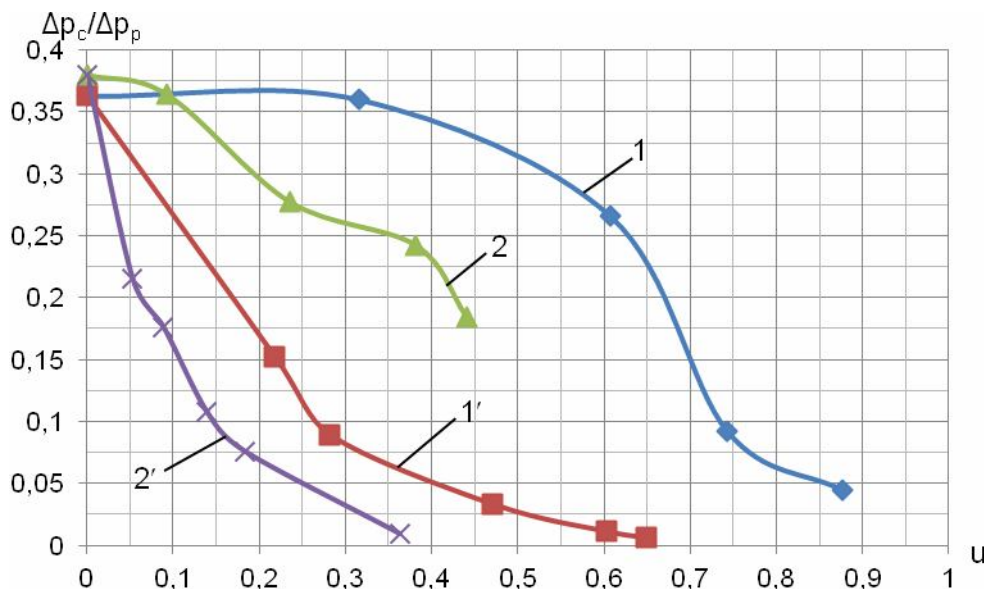


При  $u > 0,3$  кількість вуглекислого газу, яка потрапляє в приймальну камеру ежектора, суттєво збільшується, а тиск є ще незначним, тож щораз більша кількість вуглекислого газу не може розчинитися у воді. Вільний вуглекислий газ, потрапляючи до камери змішування ежектора, викликає збільшення втрат на тертя, і характеристика ежектора є при цьому спадною функцією.

Для  $u > 0,75$  тиск у приймальній камері ежектора досягає такого значення, що, не зважаючи на значну кількість вуглекислого газу, який потрапляє в неї, він практично майже весь

розчиняється у воді, і характеристика ежектора знову стає майже горизонтальною лінією.

Крива 2 на рис. 3 є характеристикою ежектора, у якого діаметр камери змішування  $d_{кз}=10$  мм, а діаметр сопла  $d_c = 6,6$  мм. Ця характеристика відображається спадною функцією, але крутизна кривої 2 є значно меншою за крутизну кривої 2 на рис. 4 у випадку інжектованого повітря. Це означає, що значна кількість вуглекислого газу розчиняється у воді, а та його частина, що не розчинилася, створює опір, який є меншим за опір інжектованого повітря такого ж ежектора.



$d_{кз}=10$  мм: 1 –  $d_c = 5,4$  мм ( $f_3/f_{p1} = 3,43$ ); 2 –  $d_c = 6,6$  мм ( $f_3/f_{p1} = 2,3$ ) – інжектований потік вуглекислий газ; 1' –  $d_c = 5,4$  мм ( $f_3/f_{p1} = 3,43$ ); 2' –  $d_c = 6,6$  мм ( $f_3/f_{p1} = 2,3$ ) – інжектований потік повітря

Рисунок 5 – Безрозмірні характеристики ежекторів

Порівнюючи відповідні характеристики, зображені на рис. 3 і 4, можна стверджувати, що при однаковому коефіцієнті інжекції  $u$  відносний тиск  $\Delta p_c/\Delta p_p$  є більший у випадку інжектованого вуглекислого газу. Це ще раз підтверджує, що вуглекислий газ при переміщенні в ежекторі розчиняється у воді. В результаті розчинності цього газу густина суміші на виході є більшою за густину суміші води з повітрям, тому тиск на виході із ежектора при інжектованому вуглекислому газі є більшим за тиск у випадку інжектованого повітря при одному і тому ж коефіцієнті інжекції (в обох випадках змішані потоки транспортуються у приймальний резервуар за допомогою гнучкого шланга на одну і ту ж висоту при відкритому крані 12 (рис. 1)).

Процес розчинення вуглекислого газу у воді при його перебуванні в ежекторі можна було б описати математично, користуючись законом Генрі, якби було відомо, як цей процес пов'язаний з часом. Але оскільки така інформація відсутня, то описувати математично процес розчинності газу у воді немає сенсу.

Закон Генрі, що описує розчинні газів у рідинах, записують так [7]:

$$p = H(T) \cdot N', \quad (1)$$

де  $p$  – парціальний тиск газу над рідиною, МПа;

$H(T)$  – коефіцієнт Генрі, МПа;

$N'$  – відношення числа молей розчинених компонентів до загального числа молей рідини і всіх розчинених газових компонентів.

Коефіцієнти Генрі, визначені за даними експериментальних досліджень, апроксимуються залежно від температури рівнянням

$$\ln H = A + B/T + C \ln T + D \cdot T, \quad (2)$$

де  $H$  – коефіцієнт Генрі, МПа;  
 $T$  – абсолютна температура, К;  
 $A, B, C, D$  – безрозмірні коефіцієнти.

Коефіцієнти рівняння (2) при розчиненні газів у воді даються у літературі [7].

Користуючись (1) і (2), а також значеннями безрозмірних коефіцієнтів, що входять до рівняння (2) для різних газів, отримуємо такі значення для розчинності вуглекислого газу і повітря у воді за нормальних умов ( $p_0 = 0,1013$  МПа,  $T_0 = 273,15$  К):

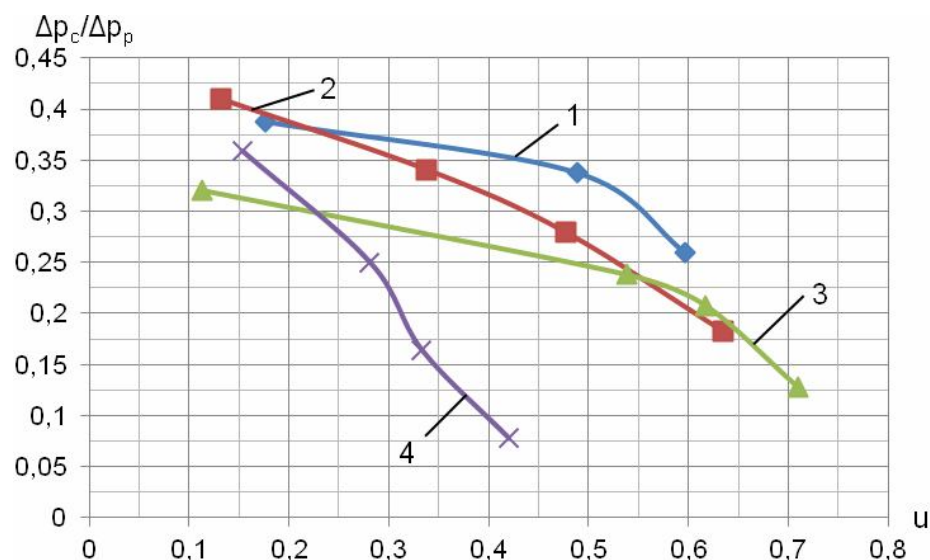
$$V_{CO_2} \cong 1,763 \frac{м^3}{1м^3 \text{ води}}, V_{нов} \cong 0,0289 \frac{м^3}{1м^3 \text{ води}}.$$

$$\frac{V_{CO_2}}{V_{нов}} = \frac{1,763}{0,0289} \cong 61 \text{ раз.}$$

Таким чином, розчинність вуглекислого газу в порівнянні з розчинністю повітря у воді за нормальних умов у 61 раз більша. Це є основною причиною, яка зумовлює різницю в безрозмірних характеристиках одного і того ж ежектора при інжектуванні ним повітря і вуглекислого газу.

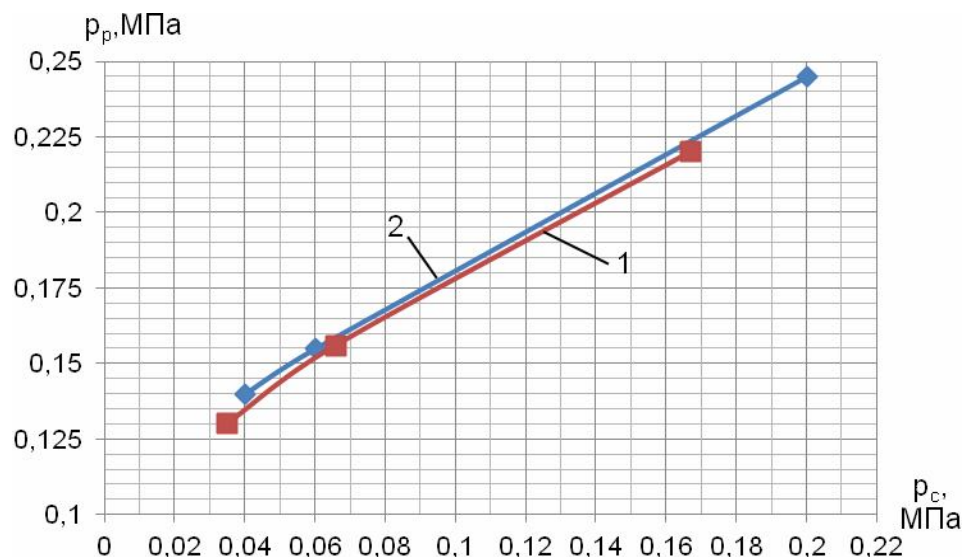
На рис. 5 зображено безрозмірні характеристики двох ежекторів ( $d_{кз}=10$  мм,  $d_c = 5,4$  мм і  $d_{кз}=10$  мм,  $d_c = 6,6$  мм) для двох випадків: 1-ий випадок інжектований потік – вуглекислий газ; 2-ий випадок інжектований потік – повітря.

Цей рисунок наочно підтверджує раніше сказане про різницю між безрозмірними харак-



$d_{кз}=10$  мм: 1 –  $d_c = 5,4$  мм ( $f_3/f_{p1} = 3,43$ ); 2 –  $d_c = 6,2$  мм ( $f_3/f_{p1} = 2,6$ );  
3 –  $d_c = 5$  мм ( $f_3/f_{p1} = 4,0$ ); 4 –  $d_c = 6,6$  мм ( $f_3/f_{p1} = 2,3$ )  
(кран 12 прикритий; інжектований потік – CO<sub>2</sub>)

Рисунок 6 – Безрозмірні характеристики ежекторів



$d_{кз}=12,5$  мм,  $d_c = 6,6$  мм; робочий потік – вода;  
1 – інжектований потік вуглекислий газ; 2 – без інжектованого потоку

Рисунок 7 – Залежність тиску  $p_p$  перед входом у ежектор від тиску  $p_c$  на його виході

теристиками однакових ежекторів при інжектуванні ними різних газів (повітря і вуглекислого газу). Крім того, ще потрібно відмітити, що при одному і тому ж відносному тиску  $\Delta p_c/\Delta p_p$  коефіцієнт інжекції  $u$  більший у випадку інжектованого вуглекислого газу, що добре видно на рис. 5.

Безрозмірні характеристики чотирьох ежекторів ( $d_{кз}=10$  мм: 1 –  $d_c = 5,4$  мм; 2 –  $d_c = 6,2$  мм; 3 –  $d_c = 5$  мм і 4 –  $d_c = 6,6$  мм) при інжектуванні вуглекислого газу і збільшенні навантаження на них (прикривання крана 12 (рис. 1)) показано на рис. 6. Розміщення характеристик

на рис. 6 подібне до їх розміщення, коли кран 12 повністю відкритий (див. рис. 2, 3 і 5). Різниця полягає лише в тому, що характеристики у випадку прикритого крана 12 мають більш виражені спадні функції у порівнянні з випадком повністю відкритого крана 12.

На рис. 7 зображена залежність тиску  $p_p$  перед входом у ежектор від тиску  $p_c$  на його виході для випадків інжекції вуглекислого газу і відсутності інжектованого потоку. Графіки на рис. 7 розміщені близько між собою. Крива 1, яка відповідає випадку інжекції вуглекислого газу, розміщена дещо нижче кривої 2. Це пояс-

нуються тим, що при виході змішаного потоку із ежектора практично весь вуглекислий газ розчинений у воді, а це дещо зменшує густину змішаного потоку, а тому тиск  $p_c$  трохи менший, ніж у випадку, коли на виході із ежектора наявна чиста вода без газу.

Потрібно зауважити, що при проведенні дослідів на водогазовій ежекторній установці, коли інжектованим газом є вуглекислий газ, незалежно від його кількості, що потрапляє в ежектор, рух гнучким шлангом змішаного потоку між виходом із ежектора і приймальним резервуаром відбувається без його вібрації, як і у випадку проходження через ежектор тільки однієї води. В той же час, коли на цій же ежекторній установці інжектованим газом було повітря, то були помічені вібрації гнучкого шланга і тим сильніші, чим більша кількість повітря потрапляла в ежектор. Цей факт ще раз підтверджує те, що при проходженні вуглекислого газу через водогазовий ежектор має місце його значне або повне розчинення у воді залежно від тиску на виході з нього, а також кількості газу, яка входить в ежектор.

Що стосується вуглеводневих газів, які входять до складу нафтового газу, то, як вказують автори роботи [8], їх розчинність майже не відхиляється від закону Генрі при порівняно низьких тисках. Із всіх неуглеводневих газів, які є компонентами нафтового газу, найбільшу розчинність у нафті має вуглекислий газ, а найменшу – азот. Тут прослідковується певна аналогія між розчинністю вуглекислого газу і азоту в нафті та воді.

Якщо розчинність вуглекислого газу призводить до того, що при виході із водогазового ежектора він значною мірою або повністю розчиняється у воді, то у випадку нафтового газу при його інжектуванні нафтогазовим ежектором, встановленим вище динамічного рівня у свердловині, змішаний потік не буде тільки рідиною з розчиненим у ній газом.

Вільний нафтовий газ, який у загальному випадку присутній в робочому газоводонафтовому потоці, не може розчинитися у нафті в ежекторі, оскільки тиск по всій довжині ежектора менший за тиск перед входом в ежектор. Відсепарований нафтовий газ, що знаходиться у затрубному просторі свердловини, який є інжектованим потоком у нафтогазовому ежекторі, не може розчинятися у нафті в ежекторі за винятком, коли тиск на виході ежектора більший за тиск на вході в свердловинний штанговий насос.

### **Висновки**

За результатами виконаних дослідів і проведеного їх аналізу можна зробити низку висновків:

1. Геометричні параметри ежектора, а саме, діаметр сопла  $d_c$  і відношення площ  $f_3/f_{p1}$  отворів камери змішування та сопла, мають велике значення при роботі водогазового ежектора, в якому інжектованим потоком є ву-

глекислий газ, аналогічно як і у випадку водоповітряного ежектора. Класифікація струминних апаратів на високонапірні ( $f_3/f_{p1} < 4$ ) і низьконапірні ( $f_3/f_{p1} \geq 4$ ) підтверджується, але за меншого граничного значення відношення  $f_3/f_{p1}$ .

2. При потраплянні інжектованого вуглекислого газу у водогазовий ежектор відбувається його значне розчинення у воді.

3. Безрозмірні характеристики однакових ежекторів при інжектуванні ними повітря та вуглекислого газу відрізняються між собою тим більше, чим менше відношення  $f_3/f_{p1}$ . Головною причиною цього явища є розчинність вуглекислого газу у воді при проходженні через ежектор.

4. Відмінність безрозмірних характеристик однакових водогазових ежекторів при інжектуванні ними повітря і вуглекислого газу характеризується тим, що за однакового коефіцієнта інжекції  $u$  відносний тиск  $\Delta p_c/\Delta p_p$  менший у випадку водоповітряного ежектора, а за однакового відносного тиску коефіцієнт інжекції більший при інжектуванні вуглекислого газу.

5. Залежність між тиском  $p_p$  на вході в ежектор і тиском  $p_c$  на виході з нього у випадку інжектованого вуглекислого газу є близькою до залежності між вказаними тисками, коли через ежектор проходить тільки вода без інжектованого потоку.

Проведене дослідження і його аналіз нашою командою на такі висновки, які стосуються нафтогазових ежекторів, встановлених вище динамічного рівня свердловини:

– вільний нафтовий газ, який у загальному випадку присутній у робочому газоводонафтовому потоці, не може розчинитися у нафті в ежекторі, оскільки тиск по всій довжині ежектора менший за тиск перед входом в ежектор;

– відсепарований нафтовий газ, що знаходиться у затрубному просторі свердловини, який є інжектованим потоком у нафтогазовому ежекторі, не може розчинятися у нафті в ежекторі за винятком випадку, коли тиск на виході ежектора більший за тиск на вході в СШН.

Таким чином, змішаний потік на виході нафтогазового ежектора не буде тільки рідиною з розчиненим у ній газом. Крім того, потрібно сказати, що газ, який був у розчиненому стані в нафті перед входом у ежектор, після його виходу із ежектора буде виділятися з нафти. Такі висновки доцільно було б перевірити при проведенні стендових випробувань нафтогазового ежектора.

### **Література**

1. Мищенко И.Т. Струйные насосы для добычи нефти [Текст] / И.Т. Мищенко, Х.Х. Губерский, В.П. Марьенко. – М.: Нефть и газ, 1996. – 150 с.



2. Атнабаев З.М. Сквжинные эжекторы для предотвращения повышения затрубного давления и срыва подачи УЭЦН / З.М. Атнабаев // Нефтяное хозяйство. – 2001. – №4. – С. 72-74.
3. Пат. 105135 України, 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.
4. Паневник О.В. Визначення розподілу тиску, температури та швидкості руху газорідної суміші вздовж стовбура нафтової свердловини у випадку експлуатації штанговим свердловинним насосом / О.В. Паневник, О.Я. Дубей // Науковий вісник ІФНТУНГ. – Івано-Франківськ, 2014. – №1 (36). – С. 53-60.
5. Дубей О.Я. Дослідження водоповітряного ежектора при зміні його геометрії та робочих параметрів / О.Я. Дубей // Научные труды SWorld. – Иваново: Научный мир, 2015. – №2 (39). Том 6 – С. 33-42.
6. Соколов Е.Я. Струйные аппараты [Текст] / Е.Я. Соколов, Н.М. Зингер. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 352 с.
7. Намиот А.Ю. Растворимость газов в воде [Текст] / А.Ю. Намиот. – М.: Недра, 1991. – 167 с.
8. Бурдынь Т.А. Химия нефти, газа и пластовых вод [Текст] / Т.А. Бурдынь, Ю.Б. Закс. – М.: Недра, 1975. – 216 с.

*Стаття надійшла до редакційної колегії  
23.11.15*

*Рекомендована до друку  
професором **Копеєм Б.В.**  
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)  
професором **Павленком А.М.***

*(Полтавський національний технічний  
університет ім. Ю. Кондратюка, м. Полтава)*