

0000-0000-0
0-58

Івано-Франківський національний технічний університет
нафти і газу

ОНАЦКО Роман Георгійович

УДК 622.24:621.694.2

**ОБГРУНТУВАННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ
РЕЖИМІВ РОБОТИ СВЕРДЛОВИННИХ
СТРУМИННИХ НАСОСІВ**

Спеціальність 05.05.12 – Машини нафтової та газової промисловості

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

А.С.

Івано-Франківськ – 2006

П/ІНВ

0-58
221246.0 + 6661270.054(048)

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник доктор технічних наук, професор
Паневник Олександр Васильович,
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, професор кафедри безпеки життєдіяльності.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор **Копей Богдан Володимирович**, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, професор кафедри нафтогазового обладнання;
доктор технічних наук, професор **Харченко Євген Валентинович**, Національний університет «Львівська політехніка», завідувач кафедри опору матеріалів.

Провідна установа

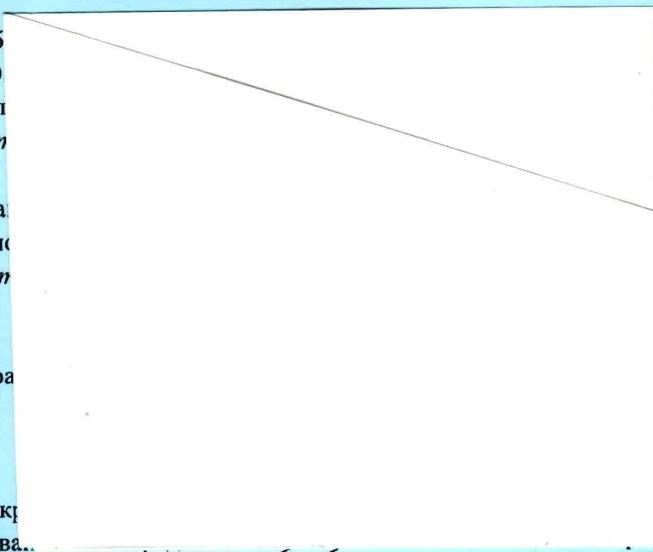
ВАТ «Український нафтогазовий інститут» Міністерства енергетики України, м.Київ.

Захист відб
ради Д20
університет
вул. Карпат

3 дисерта
національн
вул. Карпат

Авторефера

Учений секр
спеціалізова...



аної вченої
технічному
Франківськ,

нківського
Франківськ,



та

Handwritten signature or mark at the bottom center.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Ефективність управління свердловинними струминними насосами безпосередньо визначає перспективність їх застосування в нафтогазовій промисловості. Періодична зміна гірсько технічних умов під час будівництва нафтогазових свердловин приводить до необхідності регулювання техніко – економічних показників процесу буріння і, зокрема, режиму роботи свердловинних ежекційних систем. Переважна більшість ежекційних технологій, які використовуються при розробці нафтогазових родовищ передбачає розміщення струминного насоса або безпосередньо на вибої свердловини, або на значній глибині. Значна відстань між оператором та струминним насосом, а також особливості його робочого процесу ускладнюють діагностування роботи ежекційної системи з наступним регулюванням режимних параметрів у разі виникнення такої необхідності. Існуючий рівень розвитку методів управління режимом роботи свердловинних ежекційних систем є недостатнім для їх ефективного використання особливо для струминних насосів з додатковим замкненим привибійним контуром циркуляції.

Незважаючи на значну кількість розроблених конструкцій та широкий спектр застосування, ефективність використання свердловинних струминних насосів не завжди відповідає необхідним вимогам, що в значній мірі стримує поширення ежекційних технологій. Це пов'язано, в першу чергу, з незадовільним вивченням теоретичних питань розробки та використання ежекційних пристроїв. При проектуванні конструкцій струминних насосів не враховуються специфічні умови їх експлуатації в свердловині, внаслідок чого приймаються наближені значення конструктивних та експлуатаційних параметрів, як правило, на основі практично досвіду їх використання.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота носить науково-прикладний характер і спрямована на підвищення ефективності розробки нафтогазових родовищ, що є складовою частиною національної програми „Нафта і газ України до 2010 року”.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є підвищення ефективності застосування ежекційних технологій при розробці нафтогазових родовищ шляхом вдосконалення методів управління та конструкцій свердловинних струминних насосів.

Для досягнення поставленої в дисертації мети було сформульовані наступні задачі досліджень:

- на основі узагальнення світового досвіду застосування ежекційних технологій оцінити фактори, що визначають ефективність використання свердловинних струминних насосів;

- теоретично дослідити, гідравлічного зв'язку між парам



пти математичну модель
ьної рідини на вході та на

вибої свердловини при використанні ежекційної системи з додатковим замкненим привибійним контуром циркуляції;

- визначити емпіричні коефіцієнти для моделювання роботи ежекційної системи та експериментально дослідити її роботу;

- оптимізувати конструкцію ежекційної системи для буріння нафтових і газових свердловин та розробити методологічні принципи управління режимом її експлуатації.

Об'єкт дослідження: свердловинна ежекційна система для буріння та експлуатації свердловин.

Предмет дослідження: методи управління свердловинними ежекційними системами.

Методи дослідження: під час дослідження характеру змішування потоків в камері змішування струминного насоса використовувалось математичне моделювання процесу із застосуванням законів збереження, суцільності маси та кількості руху рідини потоків. При моделюванні гідравлічних зв'язків між елементами ежекційної системи застосовувалась теорія розподілу потоків у розгалуженій та замкненій гідравлічній системі. З метою узагальнення отриманих результатів використовувались критеріальні параметри: число Рейнольдса, параметр Сен-Венана, критерій Ейлера. При плануванні і аналізі результатів експериментальних досліджень використовувалась теорія подібності гідродинамічних процесів, гідравлічне моделювання та методи статистичного оцінювання.

Наукова новизна одержаних результатів. Розроблена класифікація основних методів управління та систематизовано конструкції і умови використання свердловинних струминних насосів з подальшим їх узагальненням. Все це дозволило:

- вперше теоретично підтвердити можливість роботи струминного насоса в області граничних напорів та від'ємних значень коефіцієнта інжекції;

- дослідити процес змішування потоків та визначити емпіричні коефіцієнти нерівномірності профілю швидкостей зустрічних струменів та гідравлічного опору камери змішування;

- удосконалити математичну модель гідравлічних зв'язків між елементами ежекційної системи з урахуванням можливої роботи струминного насоса в зворотному режимі.

У подальшому це дозволило:

- вперше встановити взаємозв'язок витрати змішаного потоку свердловинної ежекційної системи з густиною змішаного і тиском робочого потоків;

- розробити механізм регулювання режиму роботи свердловинної ежекційної системи залежно від умов експлуатації.

Практичне значення одержаних результатів. Цінність роботи полягає в розробці загальних принципів створення математичних моделей контролю та

регулювання режиму роботи ежекційної системи в окремих процесах буріння та експлуатації свердловин, узагальненні та класифікації відомих конструкцій ежекційних систем.

Результати викладених в дисертації досліджень реалізовані в розробці комплексу методичного забезпечення і технічних рішень, спрямованих на підвищення ефективності створення та використання ежекційного обладнання та інтенсифікації процесів будівництва та експлуатації свердловин:

- методика контролю та регулювання режиму роботи свердловинної ежекційної системи з розімкненим та замкненим контуром циркуляції;
- технічне рішення спрямоване на підвищення ефективності процесу буріння.

На основі отриманих результатів впроваджена „Методика та програма розрахунку на ЕОМ свердловинної ежекційної системи”, що затверджена ВАТ „Укрнафта”. Розроблений та виготовлений експериментальний стенд, який використовується в навчальному процесі при проведенні лабораторних занять при вивченні дисципліни ”Гідромашини та компресори”.

Особистий внесок здобувача. Основні результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно. В спільних публікаціях автору належать узагальнення та систематизація конструкцій свердловинних струминних насосів [5, 6, 13, 14, 15, 16, 20, 21, 22], розробка математичної моделі та методики визначення характеристики струминного насоса [3, 4, 7, 8, 9, 10, 18], експериментальне дослідження характеристик струминних насосів [1, 2, 17, 19], спосіб гідродинамічного контролю буріння свердловин [11], пристрій для буріння свердловин [12].

Апробація роботи. Основні результати дисертаційної роботи доповідались на: Міжнародній науково-практичній конференції „Україна наукова ‘2003”, (м. Дніпропетровськ, 2003р.); II міжнародній науково-практичній конференції „Динаміка наукових досліджень ‘2003”, (м. Дніпропетровськ, 2003р.); VI міжнародній науково-практичній конференції „Наука і освіта ‘2003”, (м. Дніпропетровськ, 2003р.); Науково-практичній конференції професорсько-викладацького складу університету, (м. Івано-Франківськ, 2003); I міжнародній науково-практичній конференції „Науковий потенціал світу ‘2004”, (м. Дніпропетровськ, 2004р.); III міжнародній науково-практичній конференції „Динаміка наукових досліджень ‘2004”, (м. Дніпропетровськ, 2004р.); VII міжнародній науково-практичній конференції „Наука і освіта ‘2004”, (м. Дніпропетровськ, 2004р.); Міжнародна науково-практична конференція „Науковий потенціал світу ‘2004”, (м. Дніпропетровськ, 2004р.); „VIII міжнародній науково-практичній конференції „Наука і освіта ‘2005”, (м. Дніпропетровськ, 2005р.); „VIII міжнародній науково-практичній конференції „Динаміка наукових досліджень ‘2005”, (м. Дніпропетровськ, 2005р.).

Результати досліджень доповідались на засіданнях кафедри нафтогазового обладнання ІФНТУНГ.

Публікації. Результати дисертаційної роботи відображено в 22 наукових роботах, в тому числі 10 статтях у фахових виданнях, 10 матеріалах тез конференцій та 2 патентах на винаходи.

Структура і обсяг роботи. Дисертаційна робота складається з вступу, 4 розділів, основних результатів, висновків та 2 додатків. Загальний обсяг роботи складає 172 сторінки, з них 21 ілюстрацій, 14 таблиць, список використаних джерел з 162 найменувань.

Основний зміст роботи

У вступі приведена загальна характеристика роботи.

В пешому розділі класифікуючи та систематизуючи області застосування струминних насосів в нафтовій промисловості, вивчаючи умови та характерні ускладнення роботи, узагальнюючи конструкції (рис.1) та досліджуючи сучасні методи управління свердловинними ежекційними системами встановлено, що висока ефективність застосування свердловинних струминних насосів дозволила підвищити рівень їх використання від розряду допоміжних до ролі основних технологій здатних вирішувати самостійні задачі при реалізації багатьох процесів нафтогазової галузі. Основною причиною відхилення режиму роботи свердловинного струминного насоса від оптимального є перевищення його напору вище допустимого, внаслідок зашламування гідравлічних ліній ежекційних систем. Сучасні схеми свердловинних ежекційних систем для буріння нафтових і газових свердловин реалізують пряме або комбіноване промивання вибою. Ежекційна система першого типу дозволяє суттєво підвищити величину витрати промивальної рідини у привибійному контурі циркуляції порівняно з продуктивністю бурового насоса. Недоліком конструкції першого типу є значна залежність витрати на вибої свердловини від степені його зашламування. Причому система не має схильності до самовідновлення: зростання об'єму шламу на вибої зменшує витрату промивальної рідини, в той самий час як відновлення нормальної циркуляції вимагає посилення її інтенсивності. В системах другого типу всмоктувальне промивання вибою дозволяє зменшити небезпеку накопичення шламу в наддолотний зоні, проте погіршується безпосереднє очищення вибою, оскільки витрата промивальної рідини, що виходить з насадок долота суттєво менша продуктивності бурового насоса. Поєднання в єдиній компоновці позитивних якостей використання відомих пристроїв може розглядатись як шлях до оптимізації конструкцій свердловинних ежекційних систем. Рівень розвитку методів управління режимом роботи свердловинних ежекційних систем є недостатнім для їх ефективного використання особливо для струминних насосів з додатковим замкненим привибійним контуром циркуляції. В процесі проведених досліджень теоретично встановлено можливість здійснювати управління роботою ежекційних систем з додатковим замкненим привибійним контуром циркуляції шляхом моделювання взаємозв'язку між фактичними параметрами

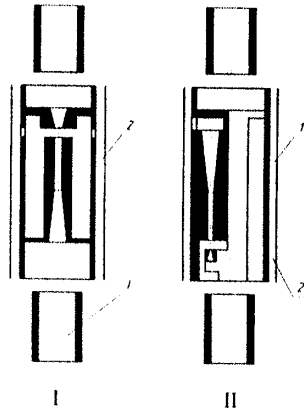


Рис. 1 – Схема з'єднання елементів свердловинних ежекційних систем: I – пряме, II – комбіноване промивання вибою.

потіку промивальної рідини на вході в свердловину та їх теоретичними значеннями на вибої свердловини.

Оптимізацію свердловинних ежекційних систем для буріння нафтових і газових свердловин, необхідно здійснювати за двома взаємозв'язаними напрямками:

- вдосконалення конструкцій ежекційних систем з додатковим замкненим привибійним контуром циркуляції;
- розробка методів контролю та регулювання режиму роботи вищезгаданих ежекційних систем.

Другий розділ присвячено побудові математичної моделі робочого процесу свердловинного струминного насоса.

Мета математичного моделювання – встановлення функціональної залежності між тиском в маніфольді бурових насосів P_H та витратою промивальної рідини Q_H у привибійному контурі циркуляції свердловини. В процесі побудови математичної моделі, згідно формули (1), враховано такі параметри

$$P_H = f(Q_H, Q_B, Q_T, \rho, \vartheta, \tau, \eta, d_{кв}, d_{гн}, d_0, N, d_к, d_с, H_с, \mu_{гн}, \mu_0) \quad (1)$$

В процесі побудови математичної моделі прийнято наступні припущення:

- 1) потік рідини вважається одновимірним: $V = V_x$; $V_y = 0$; $V_z = 0$;
- 2) поглинання $Q_{пог}$ та флюїдопрояви $Q_{фл}$ у свердловині відсутні: $Q_{пог} = 0$;
 $Q_{фл} = 0$;
- 3) потік рідини є суцільним: $\frac{dQ}{dx} = 0$.

Гідравлічні зв'язки між елементами гідравлічної системи моделюються на основі використання наступних законів та співвідношень гідродинаміки:

$$Q_c = \kappa \cdot \sqrt{\Delta P}; \quad (2)$$

$$d \sum (m \cdot V) = \sum F dt; \quad (3)$$

$$Q_i = Q_p \cdot (1 + i); \quad (4)$$

$$h = f(i, \bar{f}); \quad (5)$$

В рівняннях (2) – (5) позначено: Q_c – витрата промивальної рідини (середовища); k – коефіцієнт пропорційності; ΔP – різниця тисків у двох точках потоку; $d \sum (m \cdot V)$ – зміна кількості руху середовища; Fdt – імпульс сили; Q_i, Q_p – витрати відповідно змішаного та робочого потоків; i – коефіцієнт інжекції струминного насоса; h – відносний напір струминного насоса; \bar{f} – відносна площа насадок струминного насоса та долота.

Границі використання запропонованої моделі обмежені спеціальними властивостями промивальних рідин та здатністю характеристики для коефіцієнта витрати насадок насоса та долота зберігати постійні значення у певному діапазоні зміни числа Рейнольдса.

Виходячи з цього сформульовано границі використання розробленої моделі:

1) збереження суцільності потоку $P_{\text{min}} > P_{\text{шт}}$, де $P_{\text{шт}}$ – тиск насичених парів рідини;

2) значення числа Рейнольдса для потоку що рухається в насадках струминного насоса та долота не повинне бути менше величини $Re = 3000$.

У процесі аналізу існуючих методів удосконалення контролю за режимом роботи вибійного струминного насоса встановлена можливість визначення параметрів експлуатації свердловинної ежекційної системи на основі значень тиску потоку робочої рідини на вході в свердловину. Для реалізації такої можливості необхідно попередньо встановити аналітичну залежність значень тиску робочого потоку від характеристик ежекційної системи на всьому діапазоні зміни її робочих параметрів. Зокрема, робота струминного насоса може здійснюватись у, так званому, режимі перевищення граничного напору, коли напрям руху інжектваного потоку здійснюється на протилежний. Виявлення умов, що відповідають неробочому режиму роботи струминного насоса дозволяє встановити гранично допустимі характеристики ежекційної системи, тобто допустимий діапазон зміни його параметрів. Теоретичні дослідження роботи струминного насоса у зворотному режимі до цього часу не проводилась, що робить актуальним розробку математичної моделі процесу і, зокрема, виведення рівняння роботи ежекційної системи з від'ємними значеннями коефіцієнта інжекції, яке отримано у вигляді

$$h = \frac{\varphi_p^2}{K_{CH}} \cdot \left[2 \cdot \varphi_k - \left(2 \cdot \varphi_k - \frac{1}{\varphi_{\text{ек}}^2} \right) \cdot \frac{i^2}{K_{CH} - 1} - (2 - \beta_{\text{диф}}^2) \cdot \frac{(1 - i)^2}{K_{CH}} \right] \quad (6)$$

де K_{CH} – співвідношення площ перерізів камери змішування та робочої насадки; $\varphi_p, \varphi_k, \varphi_{\text{ек}}$ – коефіцієнти швидкостей потоків в характерних перерізах проточної частини струминного насоса.

Розроблена математична модель дозволила встановити взаємозв'язок між тиском в маніфольді бурового насоса та витратою промивальної рідини у привибійному контурі циркуляції.

У третьому розділі наведені результати дослідної перевірки математичної моделі роботи струминного насоса.

Рівняння "зворотної" характеристики струминного насоса містить складову, що визначає коефіцієнт швидкості потоку на вході в камеру змішування, величину якого необхідно встановити експериментальним шляхом.

Додаткова мета проведення експериментальних досліджень – визначення гідравлічних втрат, пов'язаних з змішуванням робочого та інжектваного потоків, що дасть можливість обґрунтувати вибір вихідних рівнянь, які стали основою побудови математичної моделі роботи струминного насоса. Крім того, необхідно підтвердити адекватність отриманого в другому розділі рівняння зворотної характеристики струминного насоса.

Враховуючи різні геометричні розміри елементів струминного насоса розмішеного на лабораторній установці і в компоновці бурильної колони необхідно визначити умови перенесення результатів експериментальних досліджень на реальну конструкцію пристрою для буріння.

Геометрична подібність

$$\frac{d_1^{(P)}}{d_1^{(M)}} = \frac{d_3^{(P)}}{d_3^{(M)}} = \frac{l_1^{(P)}}{l_1^{(M)}} = \frac{l_2^{(P)}}{l_2^{(M)}} = a_l = const \quad (7)$$

Кінематична подібність

$$\frac{V_1^{(P)}}{V_1^{(M)}} = \frac{V_t^{(P)}}{V_t^{(M)}} = \frac{V_3^{(P)}}{V_3^{(M)}} = a_v; \quad i^{(M)} = i^{(P)} \quad (8)$$

Динамічна подібність

$$\frac{Re_1^{(P)}}{Re_1^{(M)}} = \frac{Re_t^{(P)}}{Re_t^{(M)}} = \frac{Re_3^{(P)}}{Re_3^{(M)}} = a_p \quad (9)$$

Враховуючи проведенний аналіз результати експериментальних досліджень можуть бути перенесені на реальні конструкції для однакових співвідношень характерних геометричних розмірів, коефіцієнтів інжекції та чисел Рейнольдса.

Коефіцієнт швидкості визначає зменшення фактичної швидкості руху рідини порівняно з теоретичною або, інакше кажучи, зв'язує швидкості руху рідини для реального та ідеального потоку.

Розподіл швидкостей відповідає певній функції $V_i = f(z_i)$, яка визначає величину швидкості V_i на будь-якій відстані z_i від осі камери змішування. Вигляд цієї функції в загальному випадку є невідомим. На схемі (рис.2) показано також рівномірний профіль швидкості ідеального інжектваного потоку, швидкість якого u_i . В центральній частині інжектваного потоку виконується співвідношення $V_i > u_i$. Біля стінки камери змішування, а також на границі контакту з робочим потоком швидкість інжектваного потоку зменшується до нуля. Наявність протилежно

спрямованого робочого потоку є причиною несиметричного характеру профілю швидкості інжектowanego потоку. Коефіцієнт швидкості вхідного перерізу камери змішування $\varphi_{\text{вх}}$, таким чином, визначається співвідношенням середньої та максимальної швидкості руху інжектowanego потоку $\varphi_{\text{вх}} = \frac{u_i}{V_i}$.

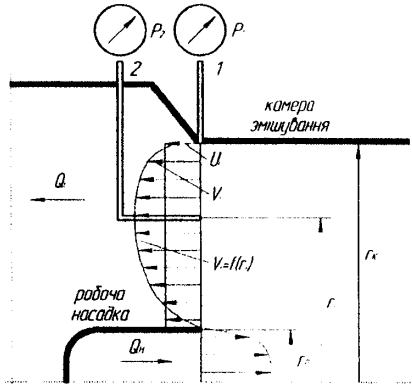


Рис. 2 – Розподіл швидкостей у вхідному перерізі камери змішування u_i – середня швидкість інжектowanego потоку; V_i – реальна швидкість інжектowanego потоку; $V_i = f(r_i)$ – експериментальний розподіл швидкостей; r_p , r_k , r_i – радіуси робочої насадки, камери змішування та окремого перерізу; Q_n , Q_i , Q – об'ємні витрати робочого, інжектowanego та змішаного потоку. 1 – п'езометрична трубка; 2 – трубка Піто.

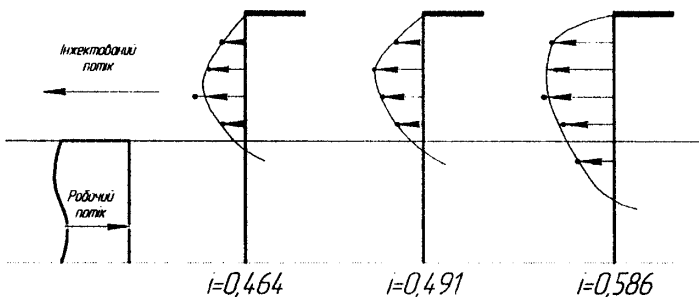


Рис.3 – Визначення коефіцієнта швидкості

Максимальна швидкість руху потоку $V_{\text{гнмх}}$ визначена шляхом дослідження експериментального розподілу швидкостей $V_i = f(r_i)$ за допомогою першої похідної.

Експериментальні профілі швидкостей руху інжектowanego потоку та залежність коефіцієнта швидкостей від коефіцієнта інжекції приведені на рис.3, 4. Величина гідравлічних втрат в камері змішування $\Delta P_{\text{зм}}$ визначається як різниця

втрата тиску в струминному насосі $\Delta P_{ст}$ для випадку його роботи з позитивними $i > 0$ та нульовими $i = 0$ значеннями коефіцієнта інжекції (рис. 5).

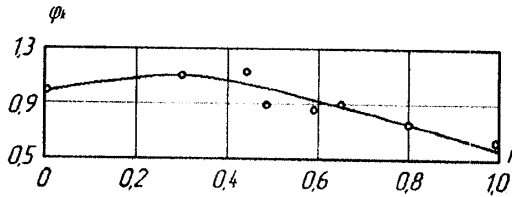


Рис.4 – Залежність коефіцієнта швидкості від коефіцієнта інжекції

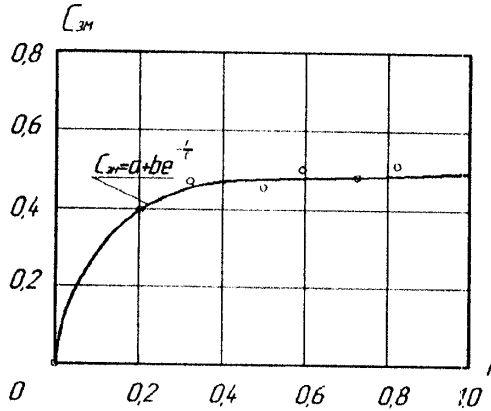


Рис. 5 – Коефіцієнт гідравлічного опору камери змішування струминного насоса

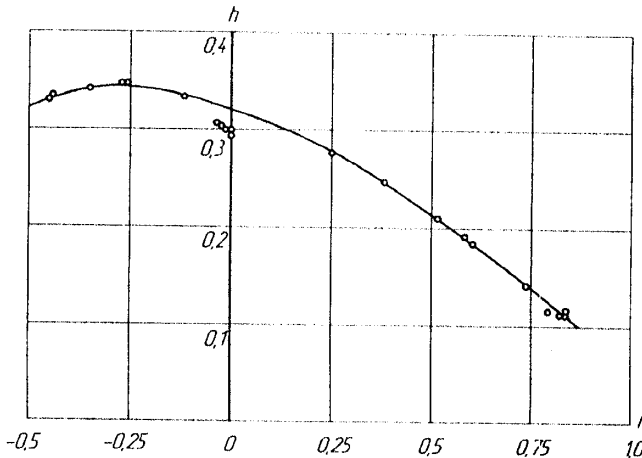


Рис. 6 – Повна характеристика струминного насоса

Експериментальна залежність $h = f(i)$ для прямого та зворотного режимів роботи струминного насоса показана на єдиному графіку (рис.6). Вигляд

експериментальної характеристики для від'ємних значень коефіцієнта інжекції підтверджує екстремальний характер залежності, отриманий при аналізі результатів теоретичних досліджень.

У четвертому розділі на основі проведених теоретичних та експериментальних досліджень розроблено новий пристрій для буріння та методи вибору раціональних режимів роботи свердловинних ежекційних систем, які дозволяють підвищити техніко-економічну ефективність процесів буріння та експлуатації свердловин.

Розроблено номограму, яка дозволяє визначити фактичний режим роботи свердловинної ежекційної системи з замкненим привибійним контуром циркуляції промивальної рідини за показами манометра, встановленого на маніфольді поверхневого насосного агрегату. Розроблена номограма дозволяє підтримувати оптимальний режим роботи ежекційної системи без здійснення додаткових спускопідймальних операцій. Визначені тиски є граничними, перевищення яких свідчить про зашламування вибою, зростання гідравлічного опору привибійної зони, зниження коефіцієнта інжекції струминного насоса та витрати потоку у привибійному контурі циркуляції.

Короткочасне підвищення продуктивності поверхневого силового приводу дозволяє інтенсифікувати промивання приибійної зони, зменшити степінь його зашламування та відновити початковий режим роботи струминного насоса.

Для ежекційних систем з розімкненими всмоктувальною та напірною лініями розроблена методика розрахунку та номограма, яка дозволяє визначити відхилення параметрів роботи струминного насоса від номінальних значень шляхом вимірів густини потоку на виході з свердловини.

Регулювання режиму роботи струминного насоса для даної схеми його включення в ежекційну систему пропонується здійснювати шляхом зміни ступені відкриття вентиля, розміщеного на вихідній лінії свердловини з використанням розробленої номограми.

Розроблені методи контролю та регулювання доцільно використовувати в комплексі. Запропоновані методи контролю та регулювання характеристик ежекційних систем дозволяють збільшити ККД струминного насоса на 17–63%.

В роботі запропонована конструкція пристрою [12], яка дозволяє підвищити техніко-економічні показники буріння (рис.7). У випадку “чистого” вибою працює основний струминний насос (позиція 4 на рис.7), який за рахунок наявності додаткового контуру циркуляції забезпечує витрату бурового розчину на вибої більшу, ніж продуктивність бурового насоса. У випадку зашламування вибою частина потоку подається на допоміжний струминний насос (позиція 3 на рис.7). За рахунок реалізації всмоктувального промивання при цьому створюються умови для ліквідації шламової пробки.

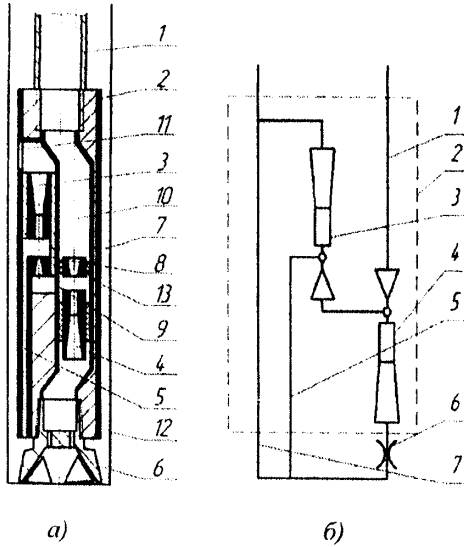


Рис. 7 – Пристрій для буріння свердловин: а) конструкція; б) гідравлічна схема
 1 – колона бурильних труб; 2 – наддолотний перехідник; 3 – допоміжний струминний насос; 4 – основний струминний насос; 5 – шламові канали; 6 – долото; 7 – кільцевий канал; 8 – сопло допоміжного струминного насоса; 9 – радіальний канал; 10 – промивальний патрубкок; 11 – радіальний канал; 12 – стінка свердловини; 13 – сопло основного струминного насоса.

Робочий процес пристрою для буріння свердловин описується системою рівнянь

$$h_1' = f_1'(i, K_{CH}, \varphi_K, \varphi_P, \varphi_{ac}, \beta_{опф}); \quad (10)$$

$$h_2' = f_2'(i, K_{CH}, \varphi_K, \varphi_P, \varphi_{ac}, \beta_{опф}); \quad (11)$$

$$\varphi_K = \begin{cases} const; i \geq 0; \\ f(i); i < 0. \end{cases}$$

$$P_r' = \rho \cdot g \cdot H_C + K_r' \cdot Q_H^2 + K_1 \cdot Q_H^2 + A \cdot Q_H^2 \cdot (1+i)^2; \quad (12)$$

$$A = \begin{cases} K_d + K_n; i > -1; \\ K_r'; i = -1. \end{cases}$$

$$P_3' = \rho \cdot g \cdot H_C + K_1 \cdot Q_H^2 + (K_d + K_n) \cdot Q_H^2 \cdot (1+i)^2; \quad (13)$$

$$P_i' = \rho \cdot g \cdot H_c + B \cdot K_p'' \cdot Q_{ii}^2 \cdot i'^2 + K_3 \cdot Q_{ii}^2; \quad (14)$$

$$B = \begin{cases} -1; i > 0; \\ 1; i < 0; \\ 0; i = 0. \end{cases}$$

$$h' = \left\{ 1 + K_p' \cdot \left[K_3 + (K_o + K_n) \cdot (1 + i')^2 + K_p'' \cdot i'^2 \right]^{-1} \right\}^{-1}; \quad (15)$$

$$P_3'' = \rho \cdot g \cdot H_c + K_3 \cdot Q_{ii}^2; \quad (16)$$

$$P_p'' = \rho \cdot g \cdot H_c + K_3 \cdot Q_{ii}^2 + K_p'' \cdot Q_{ii}^2 \cdot i'^2; \quad (17)$$

$$P_i'' = \rho \cdot g \cdot H_c + K_3 \cdot Q_{ii}^2; \quad (18)$$

$$h'' = \frac{P_3'' - P_i''}{P_p'' - P_i''}; \quad (19)$$

$$f''(i, K_{сис}, \varphi_k, \varphi_p, \varphi_{ак}, \beta_{эф}) = 0; \quad (20)$$

де h' ; h'' – відносний напір відповідно основного та допоміжного струминного насоса;

P_3' , P_p' , P_i' , P_3'' , P_p'' , P_i'' – значення тисків змішаного, робочого та інжектованого потоків відповідно для основного та допоміжного струминного насоса;

K_p' ; K_p'' – коефіцієнти гідравлічного опору відповідно для основного та допоміжного струминного насоса;

i' – коефіцієнт інжекції основного струминного насоса.

Дамо додаткові пояснення приведеним рівнянням. Рівняння (10) визначає характеристику основного струминного насоса, який працює в режимі позитивних значень коефіцієнта інжекції. Приведене рівняння містить постійні коефіцієнти, визначені Е.Я.Соколовим, і, зокрема коефіцієнт швидкості камери змішування φ_k . Рівняння (11), отримане автором в розділі 2, визначає роботу струминного насоса в режимі від'ємних значень коефіцієнта інжекції. Коефіцієнт швидкості φ_k , що входить в рівняння (11) отриманий автором в процесі проведення експериментальних досліджень, методика яких та результати приведені в розділі 3. Рівняння (12) визначає величину робочого тиску ежекційної системи. Параметр „А”, що входить в рівняння визначається величиною коефіцієнта інжекції, причому значення $i = -1$ відповідає граничному випадку роботи основного струминного насоса, коли весь потік, що надходить на робочу насадку прямує до допоміжного

насоса, а витрата змішаного потоку відсутня $Q_3' = 0$. Рівняння (13) характеризує величину гідродинамічного тиску на виході основного струминного насоса і визначається значенням гідростатичного тиску та гідравлічними втратами в затрубному просторі, в насадках долота та на вибої. Рівняння (14) характеризує величину гідродинамічного тиску інжектowanego потоку. Коефіцієнт B визначає знак перед останньою складовою рівняння залежно від позитивних або від'ємних значень коефіцієнта інжекції. У випадку нульових значень коефіцієнта інжекції $i = 0$ остання складова рівняння (14) відсутня, тобто $B = 0$. Рівняння (15) є характеристикою гідравлічної системи основного струминного насоса і визначається співвідношенням тисків змішаного P_3' , робочого P_p' , та інжектowanego P_i' потоків. Рівняння (16)–(18) характеризують величини гідродинамічних тисків в характерних перерізах гідравлічної системи допоміжного струминного насоса. Складові цих рівнянь визначають величину гідростатичного тиску на вибої свердловини та значення гідравлічних втрат у відповідних елементах системи. Рівняння (19) визначає характеристику гідравлічної системи, в якій працює допоміжний струминний насос. Аналіз співвідношення величин гідродинамічних тисків змішаного P_3'' , та інжектowanego P_i'' потоків свідчить про роботу струминного насоса в режимі нульового напору. Нульові значення відносного напору зумовлюють вигляд рівняння характеристики допоміжного струминного насоса (формула 20). Робота струминного насоса в режимі нульового напору зумовлює сталі значення величини коефіцієнта інжекції. Спільний розв'язок рівнянь (10)–(20) дозволяє визначити гідродинамічні параметри свердловинної ежекційної системи.

Таке запропоноване технічне рішення дозволяє підвищити механічну швидкість буріння до 20%, а проходження на долото – до 15%.

Можливість отримання техніко-економічної ефективності полягає в наступному:

1. Оперативне дистанційне регулювання характеристик свердловинних ежекційних систем дозволяє без проведення додаткових спускопідіймальних операцій здійснювати експлуатацію струминного насоса в оптимальному, з точки зору матеріальних факторів, режимі.
2. Представлений в роботі пристрій для буріння дозволяє зберегти матеріальні ресурси за рахунок підвищення механічної швидкості буріння та зростання проходження на долото.

Основні результати та висновки

У дисертаційній роботі наведено теоретичне узагальнення і вирішення наукової задачі дистанційного регулювання режиму роботи свердловинної ежекційної системи шляхом встановлення характеру гідравлічних зв'язків її елементів.

1. В результаті аналізу умов та характеристик ускладнень, класифікації та систематизації сучасних методів управління і узагальнення конструкцій свердловинних ежекційних систем встановлено

- основна причина відхилення характеристик від оптимальних – зашламування гідравлічних ліній свердловинних ежекційних систем;
- доцільно використовувати непрямі методи контролю та технологічні методи регулювання характеристик свердловинних струминних насосів шляхом визначення тиску і зміни витрати робочого потоку (для замкнених ежекційних систем) та визначення густини та зміни тиску змішаного потоку (для розімкнених ежекційних систем);
- перспективними з точки зору відновлення оптимальних характеристик в умовах зашламування гідравлічних каналів є ежекційні системи, що поєднують пряме та комбіноване місцеве промивання свердловини.

2. Розроблена узагальнена математична модель роботи струминного насоса у складі системи циркуляції свердловини з прямим місцевим промиванням вибою на основі моделювання гідравлічних зв'язків між елементами ежекційної системи, яка дозволила

- розробити гідравлічну модель змішування потоків у вигляді системи потенціальних струменів протилежного спрямування, що дозволило додатково розширити область аналітичного визначення характеристик струминного насоса на діапазон зміни коефіцієнта інжекції від $i = 0$ до $i = -1$;
- вперше встановлено взаємозв'язок між тиском промивальної рідини на вході в свердловину та витратою потоку у привибійному контурі циркуляції у вигляді нелінійної експериментальної залежності, яка дозволяє здійснювати дистанційний контроль та оперативне регулювання режиму роботи струминного насоса.

3. На основі визначення гідродинамічних параметрів в характерних перерізах проточної частини струминного насоса з використанням розробленого стенда проведені необхідні для побудови гідравлічної моделі ежекційної системи експериментальні дослідження

- доведено, що процес змішування робочого та інжектваного потоків супроводжується незначними (до 1% від загальних) гідравлічними втратами, внаслідок чого отриману закономірність зміни коефіцієнта гідравлічного опору камери змішування струминного насоса доцільно використовувати при розрахунках ежекційних систем з невисоким (до 1МПа) загальним рівнем тиску;
- встановлена значна (до 56%) нерівномірність профілю швидкостей в камері змішування струминного насоса та визначена емпірична залежність для її характеристик при моделюванні роботи ежекційної системи в діапазоні зміни коефіцієнта інжекції від $i = 0$ до $i = -1$;

– підтверджена адекватність (в межах 10% рівня значущості) гідравлічної моделі та аналітичної характеристики струминного насоса.

4. Розроблено єдиний підхід (пат. 65949) до регулювання свердловинних ежекційних систем, який полягає у співставленні фактичних та граничних характеристик з наступною зміною гідродинамічних параметрів робочого (для замкнених ежекційних систем) або змішаного (для розімкнених ежекційних систем) потоків, що дозволило підвищити ККД струминного насоса на 17 – 63%. Розроблено пристрій для буріння свердловин (пат. 67442), який за рахунок автоматичного встановлення оптимального за даних умов типу промивання вибою (пряме або комбіноване) дозволяє підвищити швидкість буріння на 20% і проходження на долото – на 15%.

ПУБЛІКАЦІ ПО ТЕМІ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ:

1. Онацко Р.Г. Экспериментальное исследование характеристики скважинной эжекционной системы // Нефтепромысловое дело. – 2005. – № 7. – С. 24 – 27.
2. Паневник О.В., Онацко Р.Г. Визначення умов подібності при фізичному моделюванні робочого процесу свердловинного струминного насоса // Науковий вісник. – 2004. – № 1(10). – С. 77 – 81.
3. Паневник О.В., Онацко Р.Г. Гідродинамічні основи розробки методів контролю та регулювання режиму роботи свердловинних ежекційних систем // Розвідка та розробка нафтових та газових родовищ. – 2003. – №1(6). – С. 25 – 29.
4. Паневник О.В., Онацко Р.Г. Исследования уравнения характеристики скважинного струйного насоса // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2004. – №3. – С.22–24.
5. Паневник О.В., Онацко Р.Г. Класифікація методів регулювання характеристик свердловинних ежекційних систем // Нафтова і газова промисловість. – 2004. – №4. – С. 9 – 11.
6. Паневник О.В., Онацко Р.Г. Контроль характеристик свердловинних струминних насосів // Методи та прилади контролю. – 2003. – №10. – С. 50 – 54.
7. Паневник О.В., Онацко Р.Г. Математична модель роботи свердловинного струминного насоса в зворотному режимі // Розвідка та розробка нафтових та газових родовищ. – 2003. – №3(8). – С. 42 – 46.
8. Паневник О.В., Онацко Р.Г. Методика контролю свердловинної ежекційної системи // Методи та прилади контролю. – 2005. – №13. – С. 83 – 86.
9. Паневник О.В., Онацко Р.Г. Підвищення ефективності використання свердловинних ежекційних систем // Розвідка та розробка нафтових та газових родовищ. – 2005. – № 3(16). – С. 5 – 8.
10. Паневник О.В., Онацко Р.Г. Свердловинна ежекційна система і методика її розрахунку // Науковий вісник. – 2005. – № 2(11). – С. 59 – 63.

11. Пат. 65949 А України, МКИ⁷ E21B47/06. Спосіб гідродинамічного контролю буріння свердловин / О.В.Паневник, Р.Г.Онацко. – №2003076292; Заявл. 08.07.2003; Опубл.15.04.2004, Бюл.№4.

12. Пат. 67442 А України, МКИ⁷ E21B10/18. Пристрій для буріння свердловин / О.В.Паневник, Р.Г.Онацко. – №2003108888; Заявл. 01.10.2003; Опубл.15.06.2004, Бюл.№6.

13. Онацко Р.Г. Вивчення умов та характерних ускладнень роботи струминного насоса в свердловині // Матеріали I міжнародної науково-практичної конференції „Науковий потенціал світу ‘2004’”. – Том 62. – Дніпропетровськ: Наука і освіта, 2004. – С. 14 – 15.

14. Онацко Р.Г. Методи дослідження характеристик свердловинних струминних насосів // Матеріали III міжнародної науково-практичної конференції „Динаміка наукових досліджень ‘2004’”. – Том 63. – Дніпропетровськ: Наука і освіта, 2004. – С. 57.

15. Паневник О.В., Онацко Р.Г. Аналіз методів контролю та регулювання режиму роботи свердловинних ежекційних систем // Матеріали VI міжнародної науково-практичної конференції „Наука і освіта ‘2003’”. – Том 12. – Дніпропетровськ: Наука і освіта, 2003. – С. 32.

16. Паневник О.В., Онацко Р.Г. Дослідження сучасних методів управління свердловинними струминними насосів // Матеріали III міжнародної науково-практичної конференції „Динаміка наукових досліджень ‘2004’”. – Том 63. – Дніпропетровськ: Наука і освіта, 2004. – С. 57 – 58.

17. Паневник О.В., Онацко Р.Г. Експериментальне дослідження роботи струминного насоса // Матеріали VIII міжнародної науково-практичної конференції „Наука і освіта ‘2005’”. – Том 63. – Дніпропетровськ: Наука і освіта, 2005. – С. 11 – 12.

18. Паневник О.В., Онацко Р.Г. Методи контролю характеристик свердловинних струминних насосів // Матеріали міжнародної науково-практичної конференції „Україна наукова ‘2003’”. – Том 29. – Дніпропетровськ: Наука і освіта, 2003. – С. 44.

19. Паневник О.В., Онацко Р.Г. Підвищення ефективності промислового використання свердловинних струминних насосів // Матеріали VIII міжнародної науково – практичної конференції „Динаміка наукових досліджень ‘2005’”. – Том 53. – Дніпропетровськ: Наука і освіта, 2005. – С. 22 – 23.

20. Паневник О.В., Онацко Р.Г. Систематизація конструкцій свердловинних ежекційних систем // Матеріали II міжнародної науково-практичної конференції „Динаміка наукових досліджень ‘2003’”. – Том 34. – Дніпропетровськ: Наука і освіта, 2003. – С. 33.

21. Паневник О.В., Онацко Р.Г. Узагальнення конструкцій свердловинних ежекційних систем. // Матеріали I міжнародної науково-практичної конференції „Науковий потенціал світу ‘2004’”. – Том 62. – Дніпропетровськ: Наука і освіта, 2004. – С. 18 – 19.

22. Паневник О.В., Онацко Р.Г. Перспективи використання ежекційних технологій // Матеріали VII міжнародної науково-практичної конференції „Наука і освіта ‘2004”. – Том 45. – Дніпропетровськ: Наука і освіта, 2004. – С. 25 – 26.

АНОТАЦІЯ

Онацко Р.Г. Регулювання характеристик свердловинних струминних насосів. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.12 – машини нафтової та газової промисловості. – Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ, 2005.

Дисертацію присвячено проблемі підвищення ефективності застосування ежекційних технологій при розробці нафтогазових родовищ. У дисертації розроблена узагальнена математична модель роботи струминного насоса у складі системи циркуляції свердловини з прямим місцевим промиванням вибою на основі моделювання гідравлічних зв'язків між елементами ежекційної системи, яка дозволила розробити гідравлічну модель змішування потоків у вигляді системи потенціальних струменів протилежного спрямування, що дає можливість розширити область аналітичного визначення характеристик струминного насоса на діапазон зміни коефіцієнта інжекції від $i = 0$ до $i = -1$. Встановлено взаємозв'язок між тиском промивальної рідини на вході в свердловину та витратою потоку у привибійному контурі циркуляції у вигляді нелінійної екстремальної залежності, який дозволяє здійснювати дистанційний контроль та оперативне регулювання режиму роботи струминного насоса. Розроблено пристрій для буріння свердловин, який за рахунок встановлення оптимального за даних умов типу промивання вибою (пряме або комбіноване) дозволяє підвищити швидкість буріння на 20% і проходження на долото – на 15%.

Ключові слова: свердловинний струминний насос, система циркуляції свердловини, привибійний контур циркуляції.

АННОТАЦИЯ

Онацко Р.Г. Регулирование характеристик скважинных струйных насосов. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.05.12 – машины нефтяной и газовой промышленности. – Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, Ивано-Франковск, 2005.

Диссертация посвящена вопросам повышения эффективности использования эжекционных технологий при разработке нефтегазовых месторождений путем совершенствования методов управления и конструкций скважинных струйных насосов. Разработана классификация основных методов управления, систематизированы конструкции и условия использования скважинных струйных насосов с последующим их обобщением. Все это позволило впервые теоретически подтвердить возможность работы струйного насоса в области граничных напоров и отрицательных значений коэффициента инжекции, исследовать процесс смешивания потоков и определить эмпирические коэффициенты неравномерности профиля скоростей встречных струй и гидравлического сопротивления камеры смешения, усовершенствовать математическую модель гидравлических связей между элементами эжекционной системы с учетом возможности работы струйного насоса в обратном режиме. В диссертации разработана обобщенная математическая модель работы струйного насоса в системе циркуляции скважины с прямым местным промыванием забоя, на основе моделирования гидравлических связей между элементами эжекционной системы, которая позволяет разработать гидравлическую модель смешивания потоков в виде системы потенциальных струй противоположного направления, что дает возможность расширить область аналитического определения характеристик струйного насоса на диапазон изменения коэффициента инжекции от $i=0$ до $i=-1$. Установлено взаимосвязь между давлением промывочной жидкости на входе в скважину и расходом потока в призабойном контуре циркуляции в виде нелинейной экстремальной зависимости, которая позволяет осуществлять дистанционный контроль и оперативное регулирование режим работы струйного насоса. Разработан единый подход к регулированию скважинных эжекционных систем, который состоит в сопоставлении фактических и граничных характеристик с последующим изменением гидродинамических параметров рабочего или смешанного потоков, что позволит повысить КПД струйного насоса на 17–63%. Разработано приспособление для бурения скважин, которое за счет автоматического выбора оптимального для данных условий типа промывания забоя (прямой или комбинированный) позволяет повысить скорость бурения на 20% и проходку на долото – на 15%.

Результаты изложенных в диссертации исследований реализованных в разработке комплекса методического обеспечения и технических решений, направленных на повышение эффективности создания и использования эжекционного оборудования и интенсификации процессов строительства и эксплуатации скважин.

Ключевые слова: скважинный струйный насос, система циркуляции скважины, призабойный контур циркуляции.

THE SUMMARY

Onatsko R.G. Regulation of performances downhole jet pumps. – Manuscript.

A thesis on competition of a scientific degree of Cand. Tech. Sci. in speciality 05.05.12 - Machines used in oil and the gas industry. – Ivano – Frankivsk National Technical university of Oil and Gas, Ivano – Frankivsk, 2005.

The thesis is devoted to questions of a heightening efficiency of use jet techniques at mining oil-and-gas deposits. In a thesis the generalized mathematical model of operation of the jet pump in system of circulation of well with direct local flushing out of working face designed on the basis simulation hydraulic links between devices jet systems which allows to develop a hydraulic analog of blending streams as system of potential jets an opposite direction that enables to expand field of analytical definition performances of jet pump on a gamut change of coefficient injection from $i = 0$ up to $i = -1$. It is established correlation between pressure of wash liquid on an input in well and expenditure of stream in a face contour of circulation as nonlinear extreme dependence which allows to realize a remote monitoring and operative regulation an operating mode of the jet pump. Accommodating for drilling wells designed, which at the expense of a self-acting select optimum for datas of requirements such as flushing out of working face (direct or combined) allows to raise a drilling rate on 20 % and passing on the chisel – on 15 %.

Keywords: downhole the jet pump, system circulation of well, face contour of circulation.