

6 11.747.6
П16

Івано-Франківський державний технічний університет
нафти і газу

ПАНЕВНИК Олександр Васильович

УДК 622.24:621.694.2

17/168

**ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПОБУДОВИ УЗАГАЛЬНЕНИХ
ГІДРАВЛІЧНИХ МОДЕЛЕЙ СВЕРДЛОВИННИХ
СТРУМИННИХ НАСОСІВ**

Спеціальність 05.05.12 – Машини нафтової та газової промисловості

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук



Івано-Франківськ – 2000

Дисертацією є рукопис.

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

Науковий консультант Доктор технічних наук, професор **Яремійчук Роман Семенович**, завідувач кафедри морських нафтогазових споруд Івано-Франківського державного технічного університету нафти і газу

Офіційні опоненти

1. Доктор технічних наук, доцент **Копей Богдан Володимирович**, професор кафедри нафтового обладнання Івано-Франківського державного технічного університету нафти і газу
2. Доктор технічних наук, доцент **Молчанов Олександр Георгійович**, професор кафедри машин та обладнання нафтової і газової промисловості Російського державного університету нафти і газу ім. І.М. Губкіна
3. Доктор технічних наук, доцент **Харченко Євген Валентинович**, професор кафедри деталей машин державного університету "Львівська політехніка"

Провідна установа

ВАТ "Український нафтогазовий інститут" Міністерства енергетики України, м. Київ

Захис-
тованс-
ному у
вул. Ка

алі-
ніч-
ськ.

З дисе-
ного т
Карпа

кав-
вул.

Автор

Вчени
спеціа

222/х

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність проблеми. Інтенсифікація бурових робіт може здійснюватись шляхом використання ежекційних технологій під час буріння, ліквідації ускладнень та освоєння свердловин.

Значна ефективність використання ежекційних технологій зумовлена здатністю струминного насоса знижувати диференціальний тиск в свердловині, створювати додаткове гідравлічне зусилля на долото, оптимізувати характер розподілу тисків на вибої, інтенсифікувати промивання привибійної зони (не змінюючи продуктивності бурового насоса) та реалізовувати пульсуючий режим промивання свердловини і динамічне навантаження на долото.

Найбільший досвід використання струминного насоса накопичений у Всесоюзному науково-дослідному Інституті бурової техніки, Всесоюзному науково-дослідному Інституті нафти, Державній академії нафти і газу ім. І.М. Губкіна, Спеціальному конструкторському бюро "Геотехніка", Уфимському нафтовому Інституті, Гіпротюменнафтогаз, Французькому інституті нафти, Каліфорнійському університеті, фірмами "Боуен", «Крістенсен», «Вілсон», «Помона». Серед вітчизняних організацій необхідно відмітити роботи науково-дослідного інституту "УкрВодГео", Українського науково-дослідного геологорозвідувального інституту, Криворізького гірничорудного інституту.

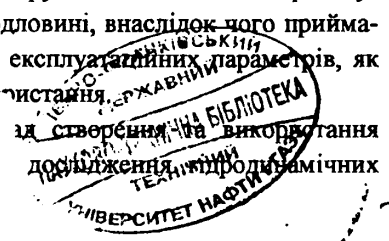
Вагомий вклад у вивчення проблем, пов'язаних з теорією і практикою використання струминних свердловинних насосів внесли Каменев П.Н., Яремійчук Р.С., Дерусов В.П., Волков А.С. Питанням розробки та промислового впровадження струминних насосів присвячені роботи Акопова Е.А., Антонова В.Ф., Богданова А.А., Вдовиченко А.І., Глебова В.А., Жидовцева Н.А., Казака А.С., Коснирева Б.А., Кук'яна А.А., Курнева Е. М., Мислока М.А., Міщенко І.Т., Сазонова Ю.А., Султанова Б.З., Цепляєва Ю.А., Чернобильського А.Г., Шоле Г., Яфарова А.У.

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 практичного досвіду.

Мета роботи. Пошук шляхів удосконалення конструкцій свердловинних струминних насосів.



as698



характеристик потоків в елементах ежекційної системи.

Основні задачі досліджень. Враховуючи актуальність та мету роботи сформульовано основні завдання досліджень:

1. Проаналізувати сучасні уявлення про стан теоретичних досліджень стосовно поширення та областей використання струминних насосів з метою оцінки ефективності їх застосування для інтенсифікації процесів буріння та ліквідації ускладнень і освоєння свердловин. Класифікувати конструктивні варіанти ежекційних свердловинних систем.

2. Розробити аналітичну модель роботи струминного насоса з врахуванням типу схеми включення, призначення та можливості експлуатації в екстремальному режимі в системі циркуляції свердловини.

3. Дослідити робочі процеси та границі використання струминного насоса при будівництві свердловин.

4. Експериментально перевірити розроблені математичні моделі роботи свердловинного струминного насоса.

5. Розробити рекомендації по створенню та використанню ежекційних пристроїв для інтенсифікації процесів буріння та освоєння свердловин.

Для розв'язку сформульованих задач застосовувались аналітичні методи досліджень з використанням ЕОМ та експериментальною перевіркою основних результатів. Проведений комплекс досліджень базується на теорії гідродинаміки, подібності і гідравлічного моделювання, а саме: поширення хвиль в рідині, графоаналітичний метод Бержерона, стаціонарний і коливальний рух тіла у висхідному і низхідному стисненому потоках, закон Гука з врахуванням пружних властивостей елементів гідравлічної системи, рух рідини під змінний рівень при постійному і змінному напорі, гідравлічний удар, кавітаційні явища, розподіл потоків в елементах розгалуженої замкненої і розімкненої гідравлічної системи, рух затоплених турбулентних струменів.

Вірогідність результатів роботи забезпечується коректною постановкою теоретичних проблем у вигляді окремих задач з застосуванням апробованих методів аналізу гідравлічних явищ в системі циркуляції свердловини, експериментальною перевіркою основних отриманих результатів з використанням методів математичної статистики, узгодженням отриманих результатів з даними промислових досліджень.

Наукова новизна. Розроблена класифікація основних схем використання струминного насоса в свердловині з подальшим їх узагальненням для розробки принципів побудови математичних моделей свердловинних ежекційних систем, незалежно від призначення, конструкції та їх робочих процесів. Все це дозво-

лило отримати аналітичні залежності для оцінки закономірностей роботи струминних насосів:

- для будь яких співвідношень геометричних параметрів його проточної частини;
- в загальному вигляді для всіх основних схем використання ежекційної системи в свердловині;
- для граничних випадків використання ежекційних систем з подальшою оцінкою поля його характеристик.

В подальшому це дозволило:

- дослідити гідродинамічні параметри свердловинних ежекційних систем за рахунок систематизації основних конструктивних та режимних показників, які впливають на характеристики гідравлічних елементів, їхню взаємну орієнтацію та степінь гідравлічного зв'язку;
- експериментально перевірити основні результати теоретичних досліджень характеристик свердловинного струминного насоса, при цьому розбіжність дослідних та аналітичних величин не перевищує 10 %;
- розробити нові елементи конструкцій струминних насосів для свердловинних ежекційних систем, які захищені авторськими свідоцтвами на патенти.

Теоретична і практична цінність досліджень. Теоретична цінність роботи полягає в розробці загальних принципів створення математичних моделей використання ежекційних систем в окремих процесах буріння та освоєння свердловин, узагальненні та класифікації відомих конструкцій ежекційних систем, виявленні загальних та часткових закономірностей створення ежекційного обладнання та граничних параметрів його експлуатації.

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

- методики визначення граничних та раціональних співвідношень основних конструктивних та експлуатаційних параметрів;
- рекомендації по заміні в конструкціях ежекційного обладнання групи паралельно з'єднаних струминних насосів еквівалентним одиничним насосом;
- універсальний метод блочного використання обмеженої кількості уніфікованих структурних елементів ежекційного обладнання;
- технічні рішення, спрямовані на підвищення ефективності процесів буріння, ліквідації прихоплень бурильної колони, очищення вибою свердловини.

Рівень реалізації і впровадження наукових розробок. Основні питання, розв'язані в дисертаційній роботі входили до складу міжвузівської науково-

технічної програми фундаментальних досліджень “Нафта і газ України” (1995, 1997-1999 рр.), “Тематичний план науково-дослідних та експериментально-конструкторських робіт” (1997-1999 рр.) АТ “Укргазпром”, плани НДР корпорації Роснафта” (1994 р.), СКТБ “Надра” (1999 р.), ДК “Укргазвидобування” НАК “Нафтогаз України” (1999 р.).

Отримані результати впроваджені в період виконання робіт згідно координаційного плану фінансування науково-дослідних фундаментальних досліджень Відділенням з питань науки міністерства освіти України, а також за угодами між Івано-Франківським державним технічним університетом нафти і газу та АТ “Укргазпром”, ДК “Укргазвидобування” НАК “Нафтогаз України”, державною академією нафти і газу ім. І.М. Губкіна та корпорацією “Роснафта” в таких формах: “Методика та програма розрахунку на ЕОМ характеристик вібраційного гідроударника для ліквідації прихоплень бурильної колони в вертикальних, похилих та горизонтальних свердловинах (АТ “Укргазпром”, 1997 р.); “Інструкція по визначенню основних конструкторських та експлуатаційних параметрів віброежекційного гідроімпульсного пристрою для буріння свердловин” (АТ “Укргазпром”, 1998 р.); “Методика гидравлического расчета вибрационного гидроударника” (корпорація “Роснафта”, 1994 р.); “Інструкція по визначенню граничних параметрів використання струминного насоса в процесі освоєння свердловин” (спеціальне конструкторсько-технологічне бюро “Надра”, 1999 р.); “Інструкція по визначенню параметрів ежекційного обладнання при бурінні свердловин” (ДК “Укргазвидобування” НАК “Нафтогаз України”, 1999 р.); довідкові таблиці: Вибір оптимальних параметрів свердловинних струминних насосів (Івано-Франківський державний технічний університет нафти і газу, 1999. - 366 с.).

Результати досліджень використовувались в учбовому процесі при виконанні курсових робіт за спеціальністю 7.090305 по курсу “Гідромашини і компресори”, дипломних робіт за спеціальністю 7.090306, курсових та дипломних робіт за спеціальністю 7.090217, курсових робіт за спеціальністю 7.090304, 7.090306 по курсу “Прикладна математика”.

Особистий внесок здобувача. Основні результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно. В спільних публікаціях автору належать узагальнення схем використання струминних насосів [49], розробка математичних моделей та методик визначення характеристик струминного насоса [1, 2, 3, 4, 6, 8, 10, 14, 19, 21, 35, 47], теоретичне обґрунтування вибору параметрів, прийнятих для оптимізації робочого процесу струминного насоса [43], теоретичний аналіз переваг використання та механізм реалізації пульсуючого режиму промивання привибійної зони в процесі буріння [16,18], експериментальне дослідження уловлювача шарошок [6], узагальнення та аналіз результатів експерименталь-

них досліджень магнітного пристрою [37], розробка універсального методу блочного використання уніфікованих структурних елементів бурового обладнання [15,24,33,42], визначення області використання та розробка методики промислових випробувань гідроударника [7], розробка вузлів з'єднання уловлювача з повітряною камерою [29] та для динамічної дії на бурильну колону [32] і долото [31].

Апробація результатів роботи. Основні результати роботи оприлюднено в доповідях та повідомленнях науково-технічної конференції ДАНГ ім. І.М. Губкіна "Актуальні проблеми стану та розвитку нафтогазового комплексу Росії", (м. Москва, 1994 р.); науково-технічної конференції УНГА "Стан, проблеми і перспективи розвитку нафтогазового комплексу Західного регіону України", (м. Львів, 1995 р.); науково-практичної конференції УНГА "Нафта і газ України-96", (м. Харків, 1996 р.); науково-практичної конференції АТ "Укрнафта" "Проблеми і перспективи науково-технічного прогресу АТ "Укрнафта" в умовах ринку", (м. Івано-Франківськ, 1996 р.); науково-практичної конференції "Шляхи підвищення якості підготовки спеціалістів для будівництва та експлуатації систем трубопровідного транспорту", (м. Івано-Франківськ, 1998 р.); науково-практичної конференції "Стан і перспективи розвитку розвідувального та експлуатаційного буріння й закінчення свердловин в Україні" (м. Харків, 1998 р.); 5-ї міжнародної конференції УНГА "Нафта і газ України-98", (м. Полтава, 1998 р.); науково-технічних конференцій професорсько-викладацького складу університету нафти і газу (м. Івано-Франківськ, 1995-1998 рр.).

Окремі положення роботи заслухано на наукових семінарах кафедри нафтогазової гідромеханіки (вересень 1996 р.) та наукової ради механічного факультету Івано-Франківського державного технічного університету нафти і газу (жовтень 1996 р.), розширеному науковому семінарі кафедри нафтового обладнання (листопад 1996 р.). В повному обсязі роботу було заслухано на міжкафедральному семінарі кафедр нафтового обладнання, морських нафтогазових споруд, нафтогазової гідромеханіки (лютий 1999 р.) та розширеному семінарі кафедри нафтового обладнання (грудень 1999 р.).

Публікації. Результати дисертаційної роботи відображено в 49 наукових роботах, в тому числі 1 монографії, 1 довідковому посібнику, 25 статтях та 5 патентах на винаходи загальним обсягом 47,5 друкованих аркушів, з них 28,5 друкованих аркушів - автора.

Структура і обсяг роботи. Дисертаційна робота складається з вступу, 5 розділів, основних результатів і висновків та додатків. Загальний обсяг роботи складає 359 сторінок, з них 73 ілюстрації, 16 таблиць, список використаних

джерел з 298 найменувань та 5 додатків.

Автор висловлює подяку докт. техн. наук проф. Яремійчуку Р.С. і докт. техн. наук проф. Векееру В.І. за постійну увагу до роботи, консультації та допомогу.

Основний зміст роботи

У вступі приведена загальна характеристика роботи.

В першому розділі на основі аналізу досвіду використання струминних свердловинних насосів визначено області та ефективність їх застосування в процесах буріння та освоєння свердловин.

Дослідження характеру зв'язку гідравлічних елементів ежекційних систем дозволило розробити класифікаційну схему використання струминного насоса в свердловині, яка стала основою вибору вихідних даних для побудови математичних моделей його застосування. Основні схеми розміщення струминного насоса в свердловині можуть бути зведені до 6 типів, кожен з яких визначається характером зв'язку гідравлічних елементів ежекційних систем (рис. 1). Основні конструкції ежекційних систем дозволяють реалізувати процеси буріння [схеми 1(2), 1(3), I I, III, V, VI], очищення вибою [схема 1(1)], ліквідації прихоплень бурильної колони [схема 1(4)], видобування води [схеми IV(1), IV(2)], виклику припливу з продуктивного горизонту [схема IV(3)], промивання піскових пробок [схема IV (4)].

Режим роботи ежекційного пристрою, незалежно від схеми включення та призначення, визначається спільним розв'язком рівнянь характеристики струминного насоса та гідравлічної системи, в якій він працює.

Характеристика струминного насоса в загальному вигляді визначається залежністю співвідношення тисків змішаного P_s , робочого P_p та інжектowanego P_i потоків, представлених у вигляді відносного напору $h = \frac{(P_s - P_i)}{(P_p - P_i)}$

$$h = f(i, K_{сн} l_c, l_k), \quad (1)$$

де i - коефіцієнт інжекції, $i = Q_i / Q_n$; $K_{сн}$ - співвідношення площ перерізів камери змішування та робочої насадки; l_c, l_k - відстань від робочої насадки до вхідного перерізу камери змішування та її довжина.

Методики аналітичного визначення характеристики струминного насоса Соколова Е.Я.-Зінгера Н.М., Подвідца Л.Г.-Кириловського Ю.А., Дунчевського Г.М. встановлюють залежність напору від двох перших параметрів виразу (1), що значно ускладнює проектування та експлуатацію ежекційних пристроїв.

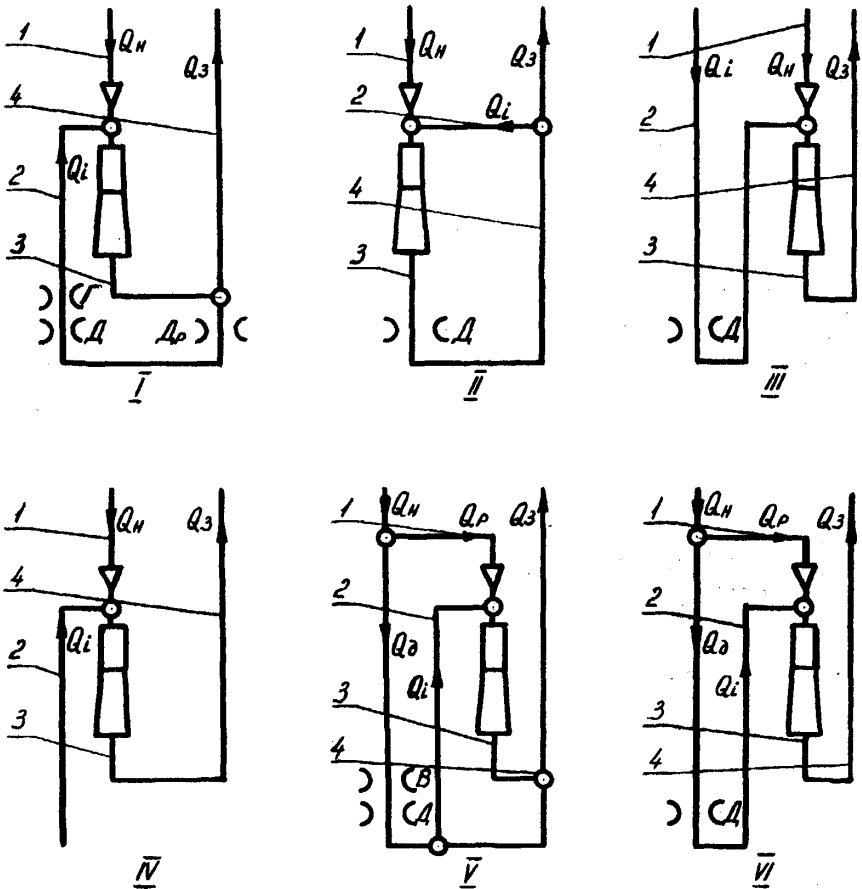


Рис. 1 - Схеми розміщення струминного насоса в свердловині при послідовному (I, II, III та IV) і паралельному (V, VI) з'єднаннях

I - зі зворотною промивкою; II - з прямою привибійною промивкою; III - з поверхневим джерелом інжектованого потоку; IV - з Ізольованими напірною і всмоктувальною лініями;

V - з гідравлічно зв'язаними напірною і всмоктувальною лініями; VI - з відокремленою привибійною зоною

1 - робоча; 2 - всмоктувальна; 3 - напірна лінії струминного насоса; 4 - канал виходу рідини до гирла свердловини;

Д - долото; Г - гідроударник; Др - дроселюючий елемент; В - вібратор; Q_N, Q_P, Q_i, Q_3, Q_0 - відповідно, продуктивність поверхневого насосного агрегата, витрати робочого, інжектованого, змішаного потоків та на вибої свердловини

Відомі методики розрахунку гідравлічної системи струминного свердловинного насоса не враховують характер гідравлічного зв'язку елементів ежекційної системи та в'язкість потоку (Каменев П.Н., Турк В.І., Дерусов В.П.). Окремі математичні моделі мають напівемпіричний характер і вимагають попереднього проведення промислових досліджень (Яремійчук Р.С., Петрі Х.Л.). Відомі моделі не враховують граничних та раціональних умов експлуатації струминного насоса в свердловині, що знижує ефективність його застосування. На жаль, до цього часу відсутні методики визначення режиму роботи струминного насоса при прямому місцевому промиванні вибою; наявності рухомого об'єкту в інжектваному потоці; зниженні та рості тиску в процесі виклику припливу з продуктивного горизонту. Недостатній розвиток теорії використання струминного насоса в свердловині є проблемою при проектуванні ежекційного обладнання.

Другий розділ присвячено розробці загальних принципів побудови математичних моделей робочого процесу свердловинного струминного насоса.

Математична модель робочого процесу струминного насоса розроблена у вигляді системи потенціальних потоків (робочого та інжектваного) і розміщеного між ними турбулентного шару (зона змішування) з нерівномірними профілями швидкостей та тисків

$$\begin{aligned} \varphi_2 (\alpha_p G_p V_{2p} + \alpha_i G_i V_{2i}) + \rho_3 \int_s V_{2c}^2(r) dS - G_3 V_3 = \\ = p_3 f_3 - p_{2p} f_{2p} - p_{2i} (f_3 - f_{2i}) - \int_s p_{2c}(r) dS; \end{aligned} \quad (2)$$

$$\frac{V_{2c} - V_{2i}}{V_{2p} - V_{2i}} = f(\eta_1) = (1 - \eta_1^{1.5})^2; \quad \eta_1 = \frac{r}{r_{2i}}; \quad (3)$$

$$\frac{p_{2c} - p_{2p}}{p_{2i} - p_{2p}} = f(\eta_2) = \eta_2; \quad \eta_2 = \frac{r - r_{2p}}{r_{2i} - r_{2p}}; \quad (4)$$

де α_p, α_i - коефіцієнти зменшення витрат потенціальних потоків на вході в камеру змішування; φ_2 - коефіцієнт швидкості; G_p, G_i, G_3 - масові витрати робочого, інжектваного і змішаного потоків; $f_{2p}, f_{2i}, f_3, r_{2p}, r_{2i}$ - площі та радіуси характерних перерізів насоса; $V_{2p}, V_{2i}, V_{2c}, V_3, p_{2p}, p_{2i}, p_{2c}, p_3$ - швидкості та тиски в характерних перерізах насоса; ρ_3 - густина змішаного потоку.

Рівняння (2) визначає закон збереження кількості руху рідини в об'ємі камери змішування, а рівняння (3), (4) - відповідно, профілі швидкостей та тисків в прилеглому турбулентному шарі. Розв'язок системи (2) - (4) отримано у вигляді рівняння

$$h = B_1 i^2 + B_2 i + B_3, \quad (5)$$

коефіцієнти якого визначаються параметрами K_{cu}, l_c .

Частковим розв'язком задачі (у випадку $l_c = 0$) є відоме рівняння Соколова Е.Я.-Зінгера Н.М.

Для визначення довжини камери змішування розв'язана задача про рух змішаного потоку на ділянках приєднання турбулентного струменя та стабілізації його гідродинамічних параметрів при таких припущеннях: 1) потік рідини вважаємо осесиметричним; 2) величина коефіцієнта інжекції в примежовому турбулентному шарі постійна $\frac{di}{dx} = 0$; 3) в примежовому турбулентному шарі вздовж осі камери змішування зберігається подібність профіля швидкостей. При цьому була використана система рівнянь, яка описує рух змішаного потоку і збереження його суцільності (6, 7); кількості руху рідини в турбулентному струмені (8), витрату турбулентного потоку (9)

$$\frac{dV_i}{dt} + V_j \frac{\partial V_i}{\partial x_j} = F_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \nabla^2 V_i + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho V_i' V_j'); \quad (6)$$

$$\partial_i \partial V_i = 0; \quad \partial_i \partial V_i = \frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial V_z}{\partial z}; \quad (7)$$

$$\int_0^{r_p} V_x^2 r dr = A; \quad A = const; \quad (8)$$

$$2\pi \int_0^{r_p} V_x r dr = Q_s; \quad (9)$$

де V_i, V_j - компоненти осереднених в часі швидкостей в напрямку координатних осей ($i=1,2,3; j=1,2,3$); F_i - компоненти вектора одиничних масових сил; ν - коефіцієнт кінематичної в'язкості; ∇^2 - оператор Лапласа; $\partial_i \partial V_i$ - оператор дивергенції; V_i', V_j' - компоненти пульсаційних складових швидкостей.

Математична постановка задачі про стабілізацію гідродинамічних параметрів змішаного потоку полягає у визначенні розв'язку $V_x(r, x)$ рівняння (6) для $0 \leq r \leq r_3$ і $0 \leq x \leq l_k$, для чого використано метод Фур'є з застосуванням при інтегруванні функцій Бесселя. Отримані рівняння дозволяють додатково враховувати взаємну орієнтацію елементів струминного насоса, внаслідок чого точність визначення напору та довжини камери змішування, порівняно з використанням відомих методик, зростає відповідно на 41,2% і 15,3%.

Побудова математичних моделей ежекційних систем передбачає попереднє визначення тисків в характерних перерізах струминного насоса. Величини тисків визначено на основі використання законів збереження маси, енергії та

кількості руху рідини і метода електрогідродинамічних аналогій з врахуванням характеру гідравлічного зв'язку елементів ежекційної системи і стану потоків в умовах дії гідростатичного тиску. Тиск на вході в струминний насос P_p визначено з урахуванням гідравлічних втрат, пов'язаних з приєднанням інжектваної маси рідини. При цьому експериментальним шляхом отримано емпіричну залежність коефіцієнта опору камери змішування K_T від режиму руху робочого потоку $K_T = f(Re)$. Після спрощень і введення коефіцієнта гідравлічного зв'язку напірної і всмоктувальної ліній ε ($0 \leq \varepsilon \leq 1$) і коефіцієнта β зниження пластового тиску $P_{пл}$ порівняно з гідростатичним P_r ($\beta = \frac{P_{пл}}{P_r}$) рівняння характеристики гідравлічної системи струминного насоса записано у вигляді

$$h = \left\{ 1 + \frac{K_T K_p \left[1 + (K_p / K_n)^{0.5} \right]^2 Q_n^2}{P_r (1 - \beta) + K_n Q_n^2 \left[1 + i(1 - \varepsilon) \right]^2 (1 - \varepsilon) + K_3 Q_n^2 (1 + i)^2 + K_c Q_n^2 i^2 + (Q_c / K_c)^{1/n}} \right\}^{-1}, \quad (10)$$

де K_n, K_3, K_p, K_i, K_n - відповідно опори напірної лінії, зосередженого елемента напірної лінії, робочої насадки, всмоктувальної лінії, паралельної ланки струминного насоса; Q_n - продуктивність поверхневого насосного агрегата; n - показник фільтрації пластової рідини, Q_c, K_c - відповідно продуктивність та коефіцієнт продуктивності свердловини.

Для прикладу наведено вигляд характеристики гідравлічної системи (рівняння 11) струминного насоса з поверхневим джерелом інжектваного потоку (схема III). Після підстановки в залежність (10) значень коефіцієнтів, що відповідають даному випадку використання струминного насоса ($K_n = \infty, K_3 = 0, \beta = 1, \varepsilon = 0, Q_c / K_c = 0$) отримаємо

$$h = \left[1 + \frac{K_T K_p}{K_n (1 + i)^2 + K_i i^2} \right]^{-1}. \quad (11)$$

Загальний принцип побудови математичних моделей використання струминного насоса в процесах буріння та освоєння свердловин передбачає: встановлення характеру гідравлічних зв'язків та аналіз стану потоків в елементах ежекційної системи; визначення тисків в характерних перерізах гідравлічної системи; представлення значень тисків у вигляді відносного напору; спільний розв'язок рівнянь характеристик насоса та його гідравлічної системи; визначення граничних та раціональних параметрів насоса; знаходження характерних параметрів для процесів, які реалізуються з використанням струминного насоса.

Розроблені математичні моделі дозволяють підвищити точність оцінки гідродинамічних параметрів свердловинних ежекційних систем (порівняно з відо-

ними методиками) на 6,9 – 56,4 %.

Третій розділ присвячений дослідженню робочих процесів свердловинних ежекційних систем.

В процесі теоретичного дослідження витратної характеристики струминного насоса $h = f(i)$ встановлено, що основні схеми його використання (рис. 2) можна поділити на три групи. Для першої групи схем коефіцієнт інжекції є функцією співвідношення коефіцієнтів місцевих опорів елементів ежекційної системи, а також характерних лінійних розмірів $\varepsilon = f(\xi, A)$ (наприклад, співвідношення діаметрів отворів насадок долота і насоса). Друга група схем передбачає додаткову залежність коефіцієнта інжекції від числа Рейнольдса $\varepsilon = f(\xi, A, Re)$, а третя - від числа Ейлера напірної лінії $\varepsilon = f(\xi, A, E_v)$. Отримані закономірності дозволяють прогнозувати вигляд характеристик свердловинних ежекційних систем на стадії їх проектування з подальшим уточненням при експлуатації.

Граничні режими роботи ежекційної системи можуть бути представлені у вигляді екстремальних співвідношень глибини розміщення в свердловині H_n та витрати робочого потоку Q_n , які визначають поля характеристик свердловинного струминного насоса. Робота останнього в режимах кавітації та граничного напору визначає відповідно мінімально $H_{nmin} = f(Q_n)$ та максимально $H_{nmax} = f(Q_n)$ допустимі глибини його розміщення в свердловині. Мінімально допустима глибина розміщення ежекційної системи в свердловині визначена за умови прогнозування виникнення кавітації в робочій насадці $H_{nmin}^{(p)}$ або камері змішування $H_{nmin}^{(i)}$ шляхом розв'язку рівнянь: характеристики насоса та його гідравлічної системи, збереження енергії та маси потоку з використанням кавітаційних критеріїв, записаних у вигляді чисел Ейлера

$$H_{nmin}^{(p)} = \frac{\left\{ \varphi_1^2 f_p^{-2} \left[1 + (K_p / K_n)^{0.5} \right]^2 - 2 \frac{K_3}{\rho} (1+i) \right\} Q_n^2}{2g \left\{ 1 + i_r \left[1 + (1-\varepsilon)i \right]^2 \right\}}; \quad (12)$$

$$H_{nmin}^{(i)} = \frac{\chi^2 f_i^{-2} \left[1 + (K_p / K_n)^{0.5} \right]^2 + 2 \frac{K_i}{\rho} Q_i^2 + \frac{2}{\rho} (Q_c / K_c)^{1/n}}{2g \left\{ \beta + i_r \left[1 + (1-\varepsilon)i \right]^2 \varepsilon \right\}}; \quad (13)$$

де φ_1 - коефіцієнт швидкості для робочої насадки; f_p, f_i - площі перерізу робочого і інжектваного потоків; i_r - гідравлічний нахил напірної лінії; χ - число кавітації.

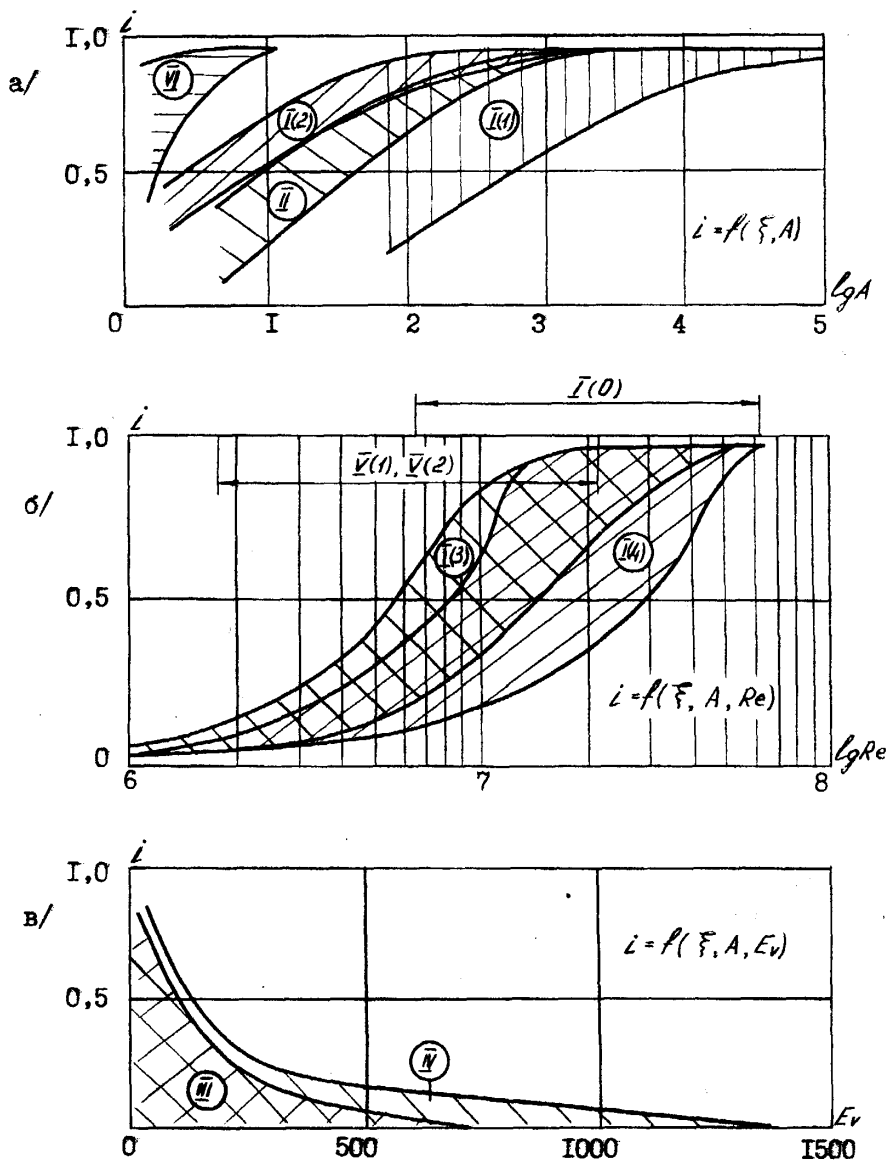


Рис. 2 – Залежність відносного коефіцієнта інжекції струминного насоса (i) від коефіцієнтів місцевих опорів (ξ) та співвідношення лінійних розмірів елементів гідравлічної системи A (а), числа Рейнольдса Re (б) і числа Ейлера E_v (в) напірної лінії.

Позначення поданих схем відповідає рис. 1

Максимально допустима глибина розміщення ежекційної системи визначена за умови попередження роботи струминного насоса в режимі граничного напору шляхом розв'язку рівняння (10) відносно H_n після підстановки значень параметрів $\varepsilon=0; i=0; h=h_{max}$

$$H_{nmax} = \frac{K_{ph} \left[1 + (K_r / K_n)^{0.5} \right]^2 h_{max} Q_n^2}{(1 - \beta + i_v)(1 - h_{max})}, \quad (14)$$

де K_{ph} - опір робочої насадки, визначений для втрат напору.

Для аналізу граничних характеристик ежекційних систем введено безрозмірні комплекси (аналогі чисел Фруда) у вигляді критерія кавітації $\Pi_k = V_{pn}^2 / gH_{nmin}$ та режиму граничного напору $\Pi_r = V_{pn}^2 / gH_{nmax}$, де V_{pn} - швидкість руху потоку в робочій насадці. В процесі критеріального аналізу встановлені співвідношення параметрів $K_{cn} - i$, які відповідають одночасному зародженню та розвитку кавітації в робочій насадці і камері змішування, а також імовірність роботи струминного насоса, в екстремальному режимі для заданих схем використання.

На основі дослідження витратної характеристики визначено умови роботи струминного насоса в режимі нульового напору ($h=0, i=i_{max}$). Дослідженням закономірностей впливу прогнозованих експлуатаційних умов на величину коефіцієнта інжекції встановлено, що забезпечення роботи струминного насоса в режимі нульового напора є одним з шляхів підвищення ефективності використання ежекційних систем.

На основі класифікації, систематизації та дослідження гідродинамічних характеристик отримані аналітичні вирази для визначення характерних конструктивних та режимних параметрів ежекційних систем (табл.1).

В табл.1 позначено: Q_{nmin} - мінімальна витрата робочого потоку, що відповідає початку переміщення рухомого об'єкта у всмоктувальній лінії струминного насоса; V_{po} - швидкість переміщення рухомого об'єкта; F_r - зусилля, що діє на прихоплену ділянку бурильної колони; $(d_\delta / d_{pn})_{kp}$ - критичне співвідношення діаметрів насадок долота і насоса за умови досягнення граничних значень коефіцієнта інжекції ($i=0, i=i_{max}$) або нульових витрат ($Q_k=0$) в додатковому контурі циркуляції; $\Delta P_B, F_r$ - зниження тиску на вибої та додаткове гідравлічне зусилля на долото; β_{kp} - критична величина коефіцієнта зниження тиску, що відповідає умові $i=0$; Q_{nmax} - максимальна витрата робочого потоку, що відповідає умові $P_i=0$.

Характерні параметри свердловинних ежекційних систем

№ схеми	Характер зв'язку напірної і всмоктувальної ліній	Тип включення насоса	Характерні величини
I (1)	Гідравлічно зв'язані	Послідовне	$\frac{Q_{i \min} (V_{po} = 0)}{F_r (V_{po} > 0)}$
I(4)			
II			
V		Паралельне	$\left(\frac{d\delta}{d\rho_n}\right)_{kp} (Q_k = 0)$
I(3)		Послідовне	$\Delta P_B, F_r$ $(h < h_{max})$
III	β_{kp} $(i = 0)$		
IV(1)			$Q_{k \max}$ $(P_i = 0)$
IV(2)			
IV(3)			$Q_{k \min}$ $(V_{po} = 0)$
IV(4)			
VI	Паралельне		$\left(\frac{d\delta}{d\rho_n}\right)_{kp} (i = i_{max})$

Характерні величини параметрів процесів, що реалізуються з використанням ежекційних систем визначені з метою виявлення робочих інтервалів зміни конструктивних та експлуатаційних параметрів свердловинних струминних насосів.

Ефективність використання струминного насоса під час виклику припливу з продуктивного горизонту визначається величиною та темпами зниження та відновлення тиску в підпакерній зоні, що зумовлює необхідність розробки математичних моделей цих процесів.

Характеристика ежекційної системи для випадку зниження тиску в підпакерній зоні (аналог рівняння (10)) отримана з використанням закону Гука та методу кінцевих різниць

$$h = \left\{ 1 + \frac{\Delta P_{p''}}{P_i + \Delta P_n - \left[P_{ij-1} - (Q_{ij-1} + Q_{ij}) \frac{\Delta t_j E_n}{2V_n} \right]} \right\}^{-1}, \quad (15)$$

де $\Delta P_{p''}, \Delta P_n$ - гідравлічні втрати в робочій насадці та напірній лінії струминного насоса; E_n, V_n - модуль пружності та об'єм підпакерного простору.

Для побудови математичної моделі використання струминного насоса в процесі відновлення тиску в підпакерній зоні використано метод Бержерона, який враховує зміни тиску і витрати рідини під час її нестационарного руху за допомогою інерційної складової тиску

$$P_{n,t} = P_{n \pm 1, t - \frac{L}{c}} \pm \frac{\rho c}{f} \left(q_{n \pm 1, t - \frac{L}{c}} - q_{n,t} \right), \quad (16)$$

де P, q - тиск і витрати потоку; f - площа перерізу каналу; t - час процесу; L - довжина колони насосно-компресорних труб.

Знаки в рівнянні (16) приймаються залежно від напрямку розповсюдження хвиль тиску в системі циркуляції свердловини. Індекс "n" вказує на нумерацію характерного перерізу ($n = 1 \dots 4$).

Проведеними дослідженнями встановлено вплив конструкції ежекційної системи і свердловини та експлуатаційних параметрів на динаміку процесу зниження і відновлення тиску в підпакерній зоні при використанні струминного насоса.

У четвертому розділі наведені результати дослідної перевірки математичних моделей роботи струминного насоса.

Дослідна перевірка проводилась для всіх основних схем вмикання струминного насоса. Для перевірки адекватності розроблених математичних моделей використано результати досліджень автора [схеми I(1), I(4), II, V] та експериментальний матеріал, отриманий іншими дослідниками: схема III - Дерусовим В.П., схема IV(2) - Косниревим Б.А., схема I(4) - Чернобильским А.Г., схема IV (3) - Яремійчуком Р.С.В. Стендових та промислових умовах досліджувались також граничні режими роботи струминного насоса: режим нульового напору, максимального ККД, граничного напору. Для проведення експериментальних досліджень було виготовлено три стенда (обладнаних чотирма силовими насосами 4P-700), які реалізують роботу струминного насоса в режимі прямого і зворотного промивання, забезпечують його паралельне вмикання і в складі свердловинної компоновки.

Під час дослідження схеми I(1) (рис. 3.1) визначався діапазон витрат робочого потоку Q_{nmin} , що забезпечує попадання шарошки в робочу порожнину уловлювача для стендових та промислових умов. Для схеми I(4) в промислових умовах визначалось зусилля F_r , що діє на прихоплену ділянку бурильної колони. Перевірка математичної моделі схеми II здійснювалась шляхом визначення залежності коефіцієнта інжекції від коефіцієнта опору ξ_i всмоктувальної лінії (рис. 3.11). Для аналізу схем III, IV(2) використовувались експериментальні значення витрати інжектваного потоку Q_i , що відповідають різним глибинам розміщення струминного насоса H_n (рис. 3.III, IV a), а для схеми IV(3) - залежність тиску в підпакерній зоні P_i від витрати робочого потоку Q_n (рис. 3.IV, б). В процесі дослідження схеми V(2) визначалась продуктивність поверхневого насосного агрегата Q_{nmin} , що забезпечує видалення з вибою металічних уламків різної форми та розмірів.

При перевірці роботи струминного насоса в режимі нульового напору досліджувались автотомельні та неавтотомельні (по відношенню коефіцієнта інжекції до числа Рейнольдса) ежекційні системи. Враховуючи отримані результати (рис. 4) експериментально доказана робота струминного насоса в режимі нульового напору у випадку незначних (до 0,025 МПа) гідравлічних втрат у всмоктувальній лінії. Похибка у визначенні теоретичної напірної характеристики при цьому не перевищує 1,54%.

Ефективність методики вибору раціональних режимів роботи ежекційної системи оцінено шляхом визначення залежності величини ККД струминного насоса від коефіцієнта інжекції (рис.5) $\eta = f(i)$. Розбіжність між теоретичними та експериментальними значеннями ККД не перевищує 5,77%.

Можливість роботи струминного насоса в режимі граничного напору проілюстрована визначенням максимальних його значень. В процесі досліджень використовувався струминний насос з геометричним параметром $K_{сн} = 16$, $K_{сн} = 25$ та результати досліджень отримані проф. Р.С. Яремійчуком ($K_{сн} = 2,878$).

Проведені експериментальні дослідження показали, що методика вибору раціональних параметрів струминного насоса дозволяє в середньому в 1,34 рази підвищити його ККД.

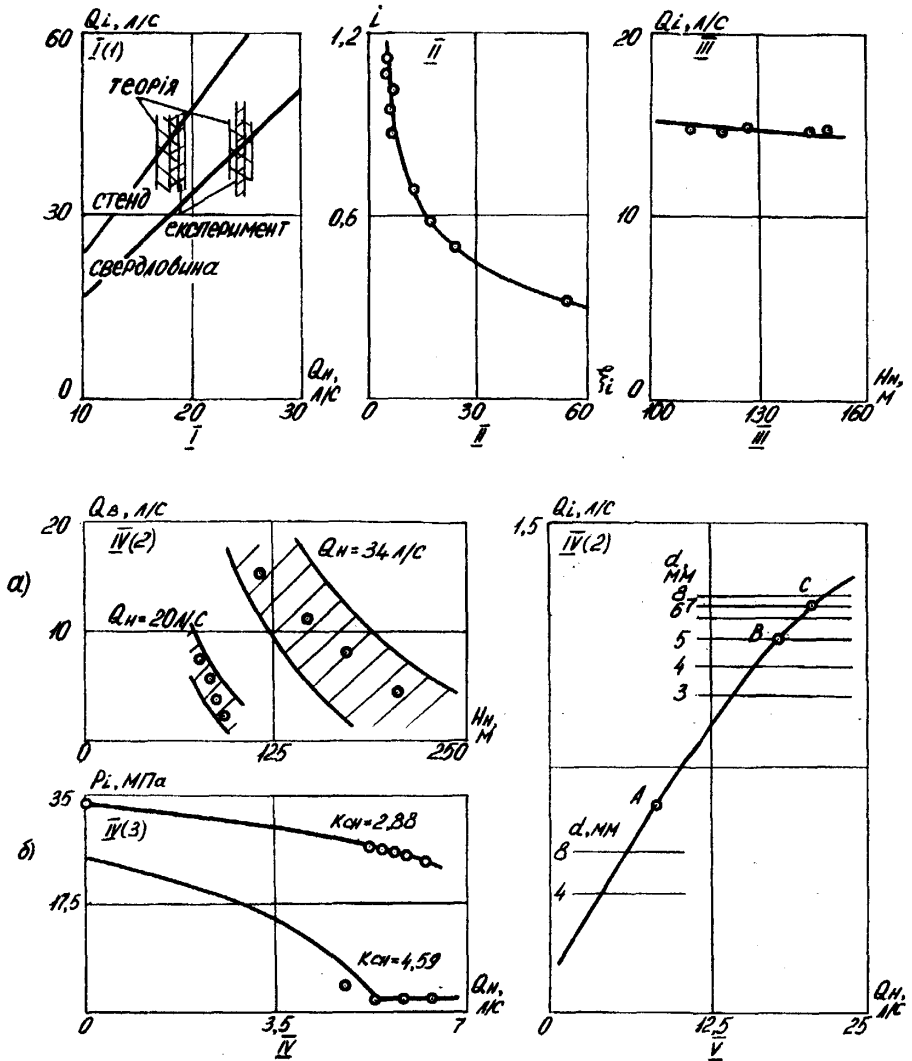


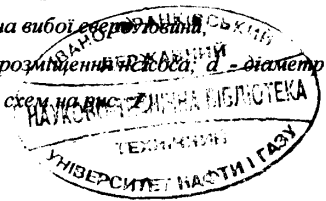
Рис. 3 - Дослідна перевірка математичних моделей робочого процесу струминного насоса

а) видобування води; б) освоєння свердловин

i - коефіцієнт інжекції; Q_n - продуктивність бурового насоса;

Q_i, Q_B - витрати інжектваного потоку та на вибій свердловини

ξ_i - коефіцієнт опору всмоктувальної лінії; H_n - глибина розташування насоса; d - діаметр металічних уламків на вибій (позначення схем на рис. 2)



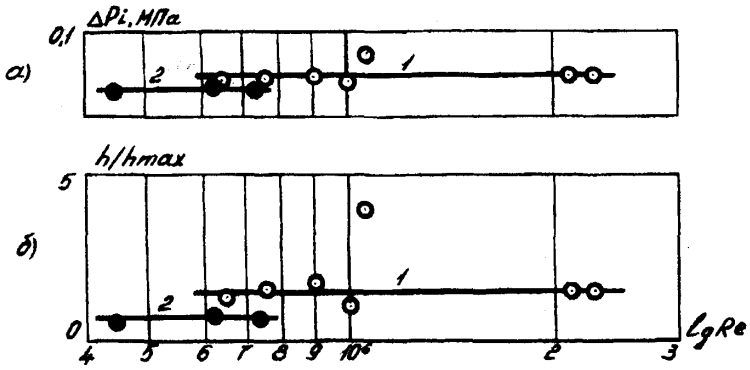


Рис. 4 – Залежність гідравлічних втрат у всмоктувальній лінії струминного насоса ΔP_i (а), відносного напору h/h_{max} від числа Рейнольдса Re : 1 - $K_{CH} = 4,0$; 2 - $K_{CH} = 3,516$

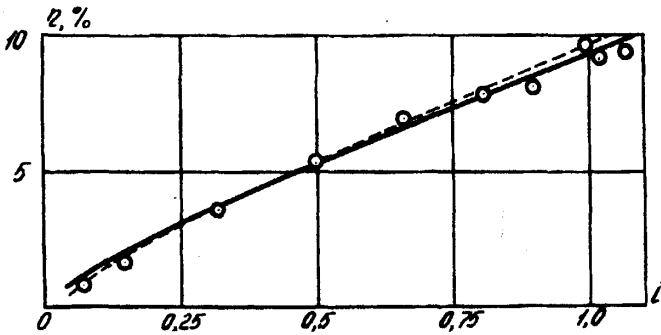


Рисунок 5 – Залежність ККД струминного насоса η від коефіцієнта інжекції i
(— експериментальна; - - - - - теоретична залежність)

П'ятий розділ присвячений розробці рекомендацій по створенню та використанню свердловинних струминних насосів.

При проектуванні струминних насосів необхідно визначити такі геометричні та кінематичні параметри: співвідношення площ перерізів камери змішування та робочої насадки K_{CH} ; коефіцієнт інжекції i , відстань від робочої насадки до камери змішування l_c , довжину камери змішування l_k , діаметр робочої насадки d_{pn} . Умови, прийняті для раціонального вибору геометричних та кінематичних параметрів струминного насоса наведені в табл. 2, в якій позначено: i_n - коефіцієнт інжекції по піску; Q_B - витрата на вибої свердловини.

Таблиця 2

Вибір раціональних параметрів струминних насосів

Параметр	Номера схем	Умова раціональності
K_{CH}	IV(3); IV(4)	$dh / di < 0$
	I, II, III, IV(1), IV(2), V(3)	$d\eta / dK_{CH} = 0$
	V(1), V(2), VI	$K_{CH} = K_{CHmin}$
i	IV(3), IV(4)	$d\eta / di = 0$
	I, II, III, IV(1), IV(2), V(3)	$d\eta / di = 0$
	V(1), V(2), VI	$i = i_{max}$
l_c	I - VI	$dh / dl_c = 0$
l_k	I - VI	$\eta = \eta_{max}$
d_{pn}	IV(3)	$P_t = P_{tmin}$
	IV(4)	$i_n = i_{nmax}$
	I, II, III, IV(1), IV(2), V(3)	$\eta = \eta_{max}$
	V(1), V(2), VI	$Q_B = Q_{Bmax}$

На основі прийнятих умов та розроблених математичних моделях отримані раціональні співвідношення кінематичних та геометричних параметрів при застосуванні свердловинного струминного насоса (подані у вигляді номограм та довідкових таблиць в роботі).

Для визначення поля характеристик струминного насоса встановлено граничні співвідношення глибин його розміщення в свердловині та витрати робочого потоку. Для більшості схем використання струминного насоса мінімальна глибина його розміщення в свердловині визначається за умови попередження виникнення кавітації в робочій насадці (схема I (рис. 1) є базовою з точки зору визначення умов, що зумовлюють роботу ежекційної системи в кавітаційному режимі)

$$H_{\text{нminII,III,IV(1),IV(2),V,VI}} = kH_{\text{нminI}}, \quad (17)$$

де k - коефіцієнт пропорційності, величина якого визначається видом схеми включення струминного насоса.

Мінімальна глибина розміщення струминного насоса при використанні схем IV(3), IV(4) визначається за умови попередження виникнення кавітації в робочій насадці або в камері змішування залежно від співвідношення $K_{\text{сн}} - i$, яке має місце під час процесів виклику припливу (схема IV(3)) або промивання піскових пробок (схема IV(4)) (див. рис. 1).

Максимальна глибина розміщення (задається за умови попередження роботи в режимі граничного напору) визначена для ежекційних систем з відокремленими напірною і всмоктувальною лініями (схеми III, IV, VI) (рис. 1) у вигляді залежності від режимних та конструктивних параметрів струминного насоса, умов його використання і конструкції свердловини ($D_c, d_{\text{кз}}$).

$$H_{\text{нmax}} = f(h_{\text{max}}, K_{\text{сн}}, d_{\text{пр}}, Q_{\text{н}}, D_c, d_{\text{кз}}, \beta). \quad (18)$$

Граничні витрати робочого потоку, враховуючи табл. 1, визначені для ежекційних систем з рухомим об'єктом у всмоктувальній лінії ($Q_{\text{нminI(1),I(4),IV(4)}}$) за умови $V_{\text{po}} > 0$ та для ежекційної системи, що реалізує процес виклику припливу ($Q_{\text{нmaxIV(3)}}$) за умови $P_i = 0$.

Шляхом розв'язку задачі про паралельну роботу групи струминних насосів з сильними робочою, всмоктувальною та напірною лініями встановлена доцільність її використання виключно у випадку реалізації режиму нульового напору ежекційної системи.

Розв'язані задачі визначення гідродинамічних характеристик ежекційної системи з:

- лінійним гідравлічним опором у вигляді ділянки бурильної колони, розміщеної між долотом і струминним насосом, довжина якої визначається його роботою в режимі, близькому до кавітаційного [схема I(5), рис. 1];

- паралельним включенням струминного насоса і частково суміщеними напірною і всмоктувальною лініями [схема V(3), рис. 1].

На основі розв'язаних задач удосконалено існуючі конструкції ежекційних систем, в яких досягається зниження диференціального тиску у свердловині в 3 – 3,5 рази та витрати на вибої до 30%.

Узагальнення основних схем використання струминних насосів та дослідження характеру розподілу потоків в ежекційній системі дозволило розробити блочний метод універсального використання обмеженої кількості уніфікованих структурних елементів (рис. 6). Сполучення в різних комбінаціях системи перехідників та окремих елементів ежекційної системи дозволяє реалізувати всі основні схеми вмикання струминного насоса.

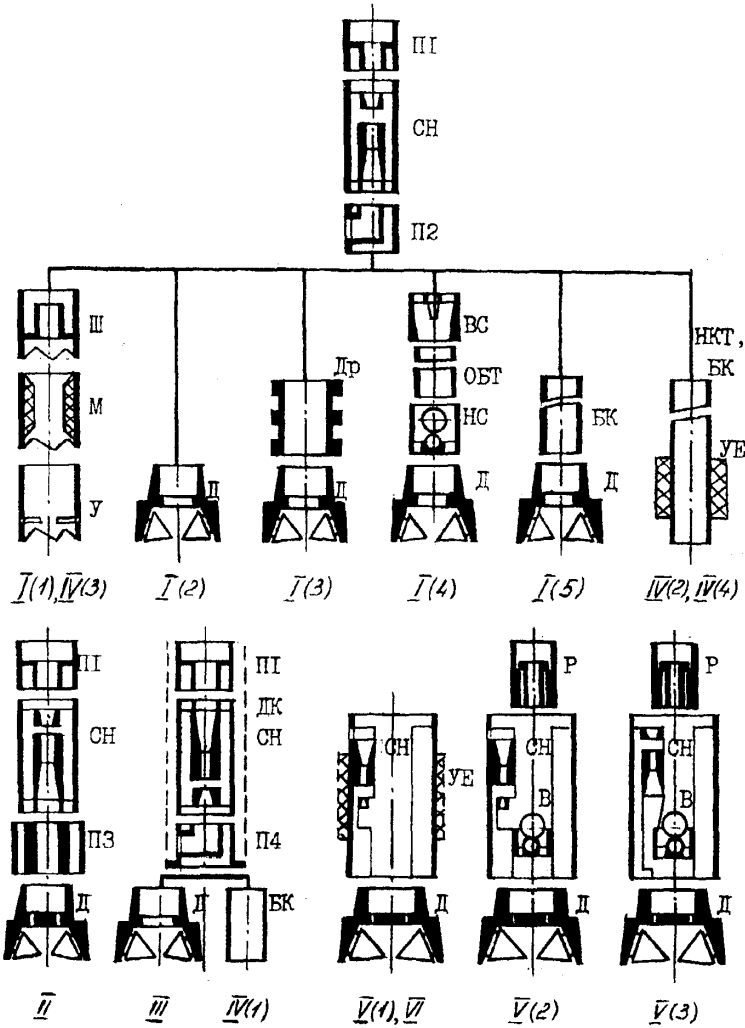


Рис. 6 – Уніфікація елементів ежекційних систем

Ш – шламоуловлювач; М – металоуловлювач; У – уловлювач великих об'єктів; Д – долото;
 Др – дротоселючий елемент; СН – струминний насос; ВС – верхнє сідло гідроударника;
 НС – нижнє сідло гідроударника; ОБТ – обважені бурильні труби; БК – бурильна колона;
 НКТ – насосно-компресорні труби; УЕ – ущільнючий елемент; ДК – подвійна колона труб;
 П – розділювач бурильної колони; В – вібратор; П1, П2, П3, П4 – перехідники
 (нумерація подана на рис. 1)

В роботі запропоновано ряд нових конструкцій, що мають патентну новизну та захищені авторськими свідоцтвами на патенти і дозволяють підвищити ефективність використання свердловинних ежекційних систем. До них відносяться:

- віброежекційний пристрій для буріння в складі струминного насоса і кульового вібратора з сферичним обмежувачем осьових переміщень;
- пристрій для ліквідації прихоплень бурильної колони у вигляді струминного насоса та нижнього і верхнього сидла змінного перерізу;
- ударно-ежекційний пристрій для буріння, що складається з струминного насоса і ударного механізму, привід якого здійснюється за рахунок обертових коливань бурильної колони;
- протиаварійний комплекс з поверхневим струминним насосом, призначеним для підвищення темпів зниження тиску в процесі реалізації гідропульсного способу ліквідації прихоплень бурильної колони;
- пристрій для очищення вибою імпульсного типу з повітряною камерою у вигляді частини бурильної колони.

Основні результати та висновки роботи

1. Розроблена узагальнена концепція створення математичних моделей свердловинного струминного насоса на основі класифікації та встановленні характеристик гідравлічних зв'язків елементів ежекційної системи, яка дозволила:

- сформулювати єдиний підхід до побудови математичних моделей свердловинних ежекційних систем для будь-яких схем та процесів, що реалізуються з використанням струминних насосів;
- вперше розробити математичні моделі струминного насоса для прямого місцевого промивання вибою, при наявності рухомого об'єкту в інжектваному потоці та нестационарного режиму роботи ежекційної системи;
- теоретично довести необхідність визначення границь використання струминного насоса в свердловині;
- розробити методики вибору конструктивних та експлуатаційних параметрів струминного насоса для 15 основних випадків його застосування в свердловині;
- підвищити точність оцінки геометричних, гідродинамічних та режимних параметрів на 6,9 – 75% за рахунок залучення для побудови математичних моделей більш широкого банку даних, що дозволило врахувати взаємну орієнтацію та конструкцію елементів струминного насоса і ежекційної системи.

2. Розроблено математичну модель змішування потоків у вигляді системи потенціальних струменів і розміщеним між ними примежовим турбулентним

шаром з нерівномірним профілем швидкостей та тисків. Отримані узагальнені рівняння характеристики насоса та стабілізації його гідродинамічних параметрів дозволяють додатково враховувати взаємну орієнтацію робочої насадки І камери змішування та забезпечують підвищення точності визначення напору струминного насоса та шляху стабілізації змішаного потоку відповідно на 41,2% і 15,3%.

3. Теоретично обґрунтовано та визначено поле характеристик свердловинного струминного насоса на основі розробки математичних моделей та дослідження граничних режимів його роботи. Сформульовані принципи оцінки границь використання різних типів струминних насосів в свердловині.

4. Систематизовано характерні параметри свердловинних струминних насосів та встановлено степінь їх залежності від конструкції ежекційної системи:

- схеми з гідравлічно зв'язаними лініями на відміну від схем з ізольованими лініями відзначаються більшими в 2-2,5 рази значеннями коефіцієнта інжекції;

- схеми з гідравлічно зв'язаними і незначними (до 0,025 МПа) гідравлічними втратами в інжектованому потоці характеризуються автономністю величини коефіцієнта інжекції по відношенню до конструктивних та режимних параметрів;

- схеми з гідравлічно зв'язаними лініями і постійним опором інжектованому потоку відзначаються залежністю величини коефіцієнта інжекції від співвідношення лінійних розмірів елементів ежекційної системи. При наявності змінного опору інжектованого потоку має місце незначна (до 10%) додаткова залежність величини коефіцієнта інжекції від продуктивності поверхневого насосного агрегата;

- схеми з відокремленими лініями відзначаються додатковою залежністю від глибини розміщення насоса в свердловині.

Отримані закономірності дозволяють прогнозувати вигляд характеристик (витратних, кавітаційних, граничного напору, максимального ККД) на стадії їх проектування з подальшим уточненням при експлуатації.

5. Розроблено єдиний підхід до проектування ежекційного обладнання, який полягає у визначенні раціональних геометричних розмірів струминного насоса та встановленні робочого діапазону його використання з наступною перевіркою отриманих граничних характеристик. Використання розробленого методу вибору раціональних параметрів струминного насоса дозволяє в 1,33-1,35 разів підвищити його ККД.

6. Сформульовано принципи уніфікації та стандартизації елементів ежекційних систем, реалізовані в розробці універсального блочного методу їх побудови на основі класифікації та узагальненні основних схем використання стру-

минного насоса. Використання розробленого методу дозволяє зменшити витрати на проектування, експлуатацію та ремонт ежекційного обладнання.

7. Встановлено доцільність заміни одиничного струминного насоса еквівалентною групою паралельно-з'єднаних насосів виключно у випадку реалізації роботи ежекційної системи в режимі нульового напору. При цьому зменшується мінімально допустима глибина розміщення насоса в свердловині та імовірність його роботи в кавітаційному режимі.

8. Основні конструкції ежекційних систем доповнено двома удосконаленими варіантами, в яких досягається зниження диференціального тиску в свердловині в 3-3,5 рази та витрати на вибої - до 30%.

9. Розроблено перспективні конструкції ежекційного обладнання, захищені авторськими свідоцтвами на патенти України: віброежекційний пристрій для буріння (пат. 25180) пристрій для ліквідації прихоплень бурильної колони (пат. 25088); ударно-ежекційний пристрій для буріння (пат. 14918); протиаварійний комплекс (пат. 20819); пристрій для очищення вибою (пат. 20118).

Розроблена концепція побудови математичних моделей, принципи оцінки границь використання, узагальнення, класифікація і систематизація характерних параметрів, методи вибору раціональних геометричних та режимних співвідношень, основи уніфікації і стандартизації елементів ежекційних систем, нові елементи конструкцій та окремі технічні рішення в сукупності визначають розвиток перспективного напрямку по підвищенню технічного рівня свердловинних струминних насосів.

Основний зміст дисертації відображено в 49 наукових роботах, в тому числі:

1. Паневник О.В., Яремійчук Р.С., Чернобыльский А.Г. Використання ежекційно-хвильових процесів для ліквідації ускладнень при бурінні. - Київ: Українська книга, 1998. - 211 с.
2. Паневник О.В., Яремійчук Р.С., Векерик В.І. Вибір оптимальних параметрів свердловинних струминних насосів. - Івано-Франківськ: Факел, 1999. - 366 с. (тираж 50 прим.).
3. Чернобыльский А.Г., Паневник А.В. Гидравлический расчет универсального ловителя шарошек // Нефтяная и газовая промышленность. Сер. Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. - М.: ВНИИОЭНГ, 1994. - № 8. - С.26-28.
4. Яремійчук Р.С., Паневник О.В., Твердушко О.Р. Визначення режиму роботи струминного апарату пристрою гідроімпульсної дії // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. Сер. Розробка нафтових і газових родовищ. - Івано-Франківськ: Івано-Франк. держ. техн. універс. нафти і газу. - 1994. - вип. 31. - С.111-118.

5. Паневник О.В. Визначення режимів потоку в свердловині у процесі використання гідроімпульсного способу ліквідації прихватів бурильної колони //Нафтова і газова промисловість. - 1995. - №2. - С. 20-22.

6. Чернобыльский А.Г., Паневник А.В. Универсальный гидравлический ловитель шарошек //Газовая промышленность.- 1995. - № 2. - С. 18-19.

7. Чернобыльский А.Г., Паневник А.В. Вибрационный гидроударник //Газовая промышленность.- 1995. - № 3. - С.20.

8. Паневник О.В., Яремійчук Р.С. Дослідження кавітаційних характеристик струминних свердловинних апаратів //Розвідка та розробка нафтових і газових свердловин. Сер. Нафтогазопромислове обладнання. - Івано-Франківськ: Івано-Франк. держ. техн. універс. нафти і газу.-1995. - вип.32. - С. 80-85.

9. Паневник О.В. Визначення класифікаційних ознак конструкції кульового свердловинного вібратора //Розвідка та розробка нафтових і газових свердловин Сер. Нафтогазопромислове обладнання. - Івано-Франківськ: Івано-Франк. держ. техн. універс. нафти і газу.-1995. - вип. 32. - С.85-89.

10. Яремійчук Р.С., Паневник О.В., Твердушко О.Р. Пристрій для очищення вибою свердловини і визначення режиму його роботи //Нафтова і газова промисловість.-1996. - № 2. - С.23-25.

11. Паневник О.В. Перспективи розвитку компоновок бурильної колони //Нафтова і газова промисловість.-1996. - № 3. - С.26-27.

12. Паневник О.В. Методика визначення режиму роботи струминного свердловинного апарата //Нафтова і газова промисловість.-1996. - № 4. - С.6-8.

13. Паневник О.В. Особливості розрахунку робочого процесу струминного насоса при паралельному включенні в систему циркуляції свердловини //Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. Сер. Буріння нафтових і газових свердловин. - Івано-Франківськ: Івано-Франк. держ. техн. універс. нафти і газу.-1996. - вип.33. - С.75-81.

14. Паневник О.В., Яремійчук Р.С. Визначення характеристики струминного насоса в процесі реалізації режиму прямої місцевої промивки привибійної зони свердловини //Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. Сер. Буріння нафтових і газових свердловин. - Івано-Франківськ: Івано-Франк. держ. техн. універс. нафти і газу.-1996.-вип. 33. - С.81-87.

15. Паневник О.В., Чернобыльский А.Г. Застосування ежекційно-хвильових процесів для ліквідації аварій під час буріння свердловин //Нафтова і газова промисловість.-1997. - № 1. - С. 12-14.

16. Паневник О.В., Миронов Ю.В., Яремійчук Р.С. Шляхи вдосконалення процесу промивки свердловин //Нафтова і газова промисловість. -1997. - № 2. - С. 16-18.

17. Паневник О.В. Методика розрахунку ежекційної системи з від-

окремленою привибійною зоною //Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. Сер. Нафтогазопромислове обладнання. - Івано-Франківськ: Івано-Франк. держ. техн. універс. нафти і газу. - 1997. - вип. 34. - С.91-98.

18. Марик В.Б., Паневник О.В. Шляхи вдосконалення промивальних вузлів тришарошкових доліт //Нафтова і газова промисловість.- 1997. - № 3. - С. 11 - 13.

19. Векерик В.І., Паневник О.В. Дослідження характеристик струминного свердловинного насоса //Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. Сер. Буріння нафтових і газових свердловин. - Івано-Франківськ: Івано-Франк. держ. техн. універс. нафти і газу. - 1998. - вип.35. -Т. 2. - С. 98-104.

20. Паневник О.В. Теоретичні основи використання струминного свердловинного насоса для ліквідації прихоплень бурильної колони //Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. Сер. Буріння нафтових і газових свердловин. - Івано-Франківськ: Івано-Франк. держ. техн. універс. нафти і газу. - 1998. - вип. 35. - Т. 2 - С. 104-111.

21. Паневник О.В., Концур І.Ф., Марко І.В. Застосування струминного насоса для підвищення ефективності буріння свердловин //Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. Сер. Нафтогазопромислове обладнання. - Івано-Франківськ: Івано-Франк. держ. техн. універс. нафти і газу. -1998. - вип. 35. - т. 4. - С.53-62.

22. Паневник О.В. Використання ежекційних технологій для підвищення ефективності буріння свердловин ПСГ //Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. Сер. Транспорт і зберігання нафти і газу. - Івано-Франківськ: Івано-Франк. держ. техн. універс. нафти і газу.- вип. 35. - т. 5. - С. 116-121.

23. Паневник А.В. Определение глубины спуска насоса в скважину //Газовая промышленность.-1998. - № 2. - С.58-59.

24. Паневник О.В., Яремійчук Р.С. Створення і вдосконалення обладнання динамічної дії на вибій для буріння свердловин //Нафтова і газова промисловість.-1998. - № 5. - С. 22-24.

25. Паневник О.В. Визначення режиму перетікання рідини в свердловині під дією різниці гідростатичних тисків //Нафтова і газова промисловість. - 1999. - № 5. - С. 21 - 22.

26. Паневник О.В. Визначення характеристики гідравлічної системи струминного свердловинного насоса //Нафтова і газова промисловість. - 1999. - № 6. - С. 23 - 25.

27. Паневник О.В. Методика розрахунку свердловинного струминного насоса при наявності дроселюючого елемента в інжектваному потоці //Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. Сер. Нафтогазопромислове обладнання. - Івано-Франківськ: Івано-Франк. держ. техн. універс. нафти і газу.-1999. - вип.

36. - т.-4. - С. 82-89.

28. Пат.14918 А України, МКИ Е 21 В 7/00. Пристрій для буріння свердловин /О.В.Паневник (Україна). - № 94107267; Заявлено 17.10.94; Опубл. 04.03.97, Бюл. № 3.

29. Пат.20118 А України, МКИ Е 21 В 31/03. Пристрій для очищення вибою свердловини /Р.С.Яремійчук, О.В.Паневник, О.Р.Твердушко (Україна). - №94127958; Заявлено 12.12.94; Опубл.25.12.97, Бюл. № 6.

30. Пат.20819 А України, МКИ Е 21 В 31/113. Комплекс обладнання для здійснення гідроімпульсу в свердловині /О.В.Паневник (Україна). - № 94107351; Заявлено 17.10.94. Опубл.27.02.98, Бюл. № 1.

31. Пат.25180 А України, МКИ Е 21 В 10/18. Пристрій для буріння свердловин /О.В.Паневник, Р.С.Яремійчук (Україна). - № 97031449; Заявлено 27.03.97; Опубл.25.12.98, Бюл. № 6.

32. Пат.25088 А України, МКИ Е 21 В 23/00. Пристрій для ліквідації прихоплень бурильної колони /О.В.Паневник, Р.С.Яремійчук (Україна).- № 97031450; Заявлено 27.03.97; Опубл.25.12.98, Бюл. № 6.

33. Зайцев Ю.В., Чернобыльский А.Г., Паневник А.В. Оборудование и технология для интенсификации процесса глубокого бурения на основе управления динамическими процессами в скважине /Тез. научн.-техн. конф. «Актуальные проблемы состояния и развития нефтегазового комплекса России». - М.: ГАНГ им. И.М.Губкина. - 1994. - 204 с.

34. Паневник О.В. Ударно-демпфіруюча компоновка бурильної колони /Тези доп.і повідомлень наук.-практ. конф. «Стан, проблеми і перспективи розвитку нафтогазового комплексу Західного регіону України». - Львів: УНГА.- 1995.-С.148.

35. Яремійчук Р.С., Паневник О.В. Визначення режиму очищення вибою свердловини при використанні струминних апаратів /Тези наук.-техн. конф. проф.-викл. складу універс .-Ч.1. - Івано-Франківськ: Івано-Франк. держ. техн. універс. нафти і газу.-1995.-С.83.

36. Паневник О.В. Використання метода Бержерона для розрахунку гідроімпульсного способу ліквідації прихватів бурильної колони /Тези наук.-техн. конф. проф.-викл. складу універс. - Ч.1. - Івано-Франківськ: Івано-Франк.держ. техн. універс. нафти і газу.-1995.-С.85.

37. Чернобыльский А.Г., Сабан Т.Й., Паневник О.В. Стенові випробування магнітного пристрою для очищення вибою свердловини /Тези наук.-практ. конф. «Нафта і газ України-96». - т. 3. - Харків: УкрНДІгаз.- 1996. -С. 209-211.

38. Паневник О.В. Графо-аналітичний метод визначення режиму роботи свердловинного струминного насоса /Тези наук.-техн. конф. проф.-викл. складу універс .-Ч. III. -Івано-Франківськ: Івано-Франк. держ. техн. універс.нафти і га-

зу.-1996. - С.74.

39. Паневник О.В. Вплив експлуатаційних факторів на процес перетоку рідини в свердловині під дією різниці гідростатичних тисків /Тези наук.-практ.конф. “Проблеми і перспективи науково-технічного прогресу АТ “Укрнафта” в умовах ринку”. - Івано-Франківськ: ВАТ «Укрнафта». -- 1996. - С. 106-107.

40. Паневник О.В. Класифікація схем використання струминних насосів в свердловині /Тези наук.-техн. конф. проф.-викл. складу універс. -Ч.ІІ. - Івано-Франківськ: Івано-Франк. держ. техн. універс. нафти і газу. - 1997. - С.55.

41. Паневник О.В. Екстремальні режими роботи струминного насоса в свердловині /Тези наук.-техн. конф. проф.-викл. складу універс. - Ч.ІІ. – Івано-Франківськ: Івано-Франк. держ. техн. універс. нафти і газу.-1997. - С.56.

42. Паневник О.В., Яремійчук Р.С. Розробка обладнання для використання ежекційно-хвильових процесів при бурінні свердловин /Тези наук.-техн. конф. проф.-викл. складу універс. - Ч.ІІ.- Івано-Франківськ: Івано-Франк. держ. техн. універс. нафти і газу.-1997. - С.57.

43. Паневник О.В., Яремійчук Р.С. Визначення основних конструктивних параметрів струминного свердловинного насоса /Тези наук.-практ. конф. “Шляхи підвищення якості підготовки спеціалістів для будівництва та експлуатації систем трубопровідного транспорту”. - Івано-Франківськ: Івано-Франк. держ. техн. універс. нафти і газу. - 1998. - С.29.

44. Паневник О.В. Области використання струминних свердловинних насосів /Тези наук.-практ.конф. “Шляхи підвищення якості підготовки спеціалістів для будівництва та експлуатації систем трубопровідного транспорту”. - Івано-Франківськ: Івано-Франк. держ. техн. універс. нафти і газу. - 1998. - С.32-33.

45. Паневник О.В Аналітична модель роботи струминного свердловинного насоса /Тези наук.-техн. конф. проф.-викл. складу універс. нафти і газу. - Івано-Франківськ: Івано-Франк. держ. техн. універс. нафти і газу.-1998. – С. 171-172.

46. Паневник О.В. Визначення раціональної схеми використання струминного свердловинного насоса /Тези 5 міжнародної конференції “Нафта і газ України – 98”. – Полтава: УНГА. – 1998. – С. 208-209.

47. Паневник О.В., Яремійчук Р.С. Визначення режиму роботи струминного насоса в процесі виклику припливу з продуктивного горизонту / Тези 5 міжнародної конференції “Нафта і газ України – 98”. – Полтава: УНГА. – 1998. – С. 209-210.

48. Паневник О.В. Застосування струминних свердловинних насосів для інтенсифікації процесів будівництва свердловин / Тези наук.-практ. конференції “Стан і перспективи розвитку розвідувального та експлуатаційного буріння й закінчення свердловин в Україні”. – Харків: УНГА. – 1998. – С. 142-143.

49. Паневник О.В., Яремійчук Р.С. Узагальнення схем використання струминних насосів у свердловині /Тези наук.-практ. конф. "Стан і перспективи розвитку розвідувального та експлуатаційного буріння й закінчення свердловин в Україні". - Харків: УНГА. -1998. - С.145.

АНОТАЦІЯ

Паневник О.В. Теоретичні основи побудови узагальнених гідравлічних моделей свердловинних струминних насосів. - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.05.12 - машини нафтової і газової промисловості. - Івано-Франківський державний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ, 2000.

Дисертацію присвячено проблемі розробки узагальнених гідравлічних моделей свердловинних струминних насосів, які використовуються під час буріння та освоєння свердловин. В дисертації розроблена загальна концепція побудови математичних моделей та досліджено робочий процес свердловинного струминного насоса на основі моделювання гідравлічних зв'язків між елементами ежекційної системи з врахуванням граничних режимів її роботи. До побудови математичних моделей залучено банк даних, який дозволив підвищити точність оцінки геометричних, гідродинамічних та режимних параметрів струминного насоса на 6,9-75 %. На основі узагальнення, класифікації та систематизації характеристик струминного насоса розроблено методи вибору конструктивних та режимних параметрів для 15 основних випадків його застосування в свердловині, що призвело до підвищення ККД ежекційної системи в 1,33 – 1,35 разів. Основні результати роботи реалізовані при проектуванні свердловинних ежекційних систем з покращеними технічними характеристиками провідними (в галузі використання струминних насосів) підприємствами.

Ключові слова: свердловинний струминний насос, математичне моделювання, граничні та раціональні режими експлуатації.

АННОТАЦИЯ

Паневник А.В. Теоретические основы создания обобщенных гидравлических моделей скважинных струйных насосов. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.05.12 – машины нефтяной и газовой промышленности. - Ивано-Франковский государственный технический университет нефти и газа, Ивано-Франковск, 2000.

Диссертация посвящена вопросам разработки обобщенных гидравлических моделей скважинных струйных насосов, используемых при бурении и освоении

скважин. В диссертации разработана обобщенная концепция построения математических моделей рабочего процесса скважинного струйного насоса на основе моделирования гидравлических связей между элементами эжекционной системы с учетом предельных режимов ее работы. В работе приведена математическая модель смешивания потоков в виде системы потенциальных струй и расположенного между ними пограничного турбулентного слоя с неравномерными профилями скоростей и давлений. Получены уравнения характеристики насоса и стабилизации его гидродинамических параметров, а также обобщенные уравнения характеристики эжекционной системы и предельных режимов ее работы.

Путем использования для построения математических моделей более представительного исходного материала (дополнительно учитывалась взаимная ориентация и конструкция элементов насоса и эжекционной системы) повышена точность оценки геометрических, гидродинамических и режимных параметров струйного насоса на 6,9 – 75%. На основе обобщения, классификации и систематизации характеристик струйного насоса разработаны методы выбора конструктивных и режимных параметров для 15 основных вариантов его использования в скважине, которые позволяют в 1,33 – 1,35 раз повысить КПД эжекционной системы. В работе дано теоретическое обоснование и определено поле характеристик скважинного струйного насоса, которое определяет границы его применимости. На основе использования разработанных математических моделей предельных режимов работы сформулированы принципы оценки границ применимости различных типов струйных насосов в скважине.

Благодаря систематизации характерных параметров скважинных струйных насосов установлена степень их зависимости от конструкции эжекционной системы. Полученные при этом закономерности позволяют прогнозировать вид характеристик (расходных, кавитационных, предельного напора, максимального КПД) струйного насоса на стадии их проектирования с последующим уточнением при эксплуатации. Путем классификации и обобщения основных схем использования струйного насоса сформулированы принципы унификации и стандартизации его элементов, реализованные в разработке универсального блочного метода синтеза конструкций эжекционных систем.

Результаты проведенных исследований позволили разработать новые элементы конструкций струйных насосов, защищенных авторскими свидетельствами на патенты.

Разработанная концепция построения математических моделей, принципы оценки границ применимости, обобщение, классификация и систематизация характерных параметров, методы выбора рациональных геометрических и режимных соотношений, основы унификации и стандартизации элементов эжек-

ционных систем, новые элементы конструкций и отдельные технические решения в совокупности определяют развитие перспективного направления по повышению технического уровня скважинных струйных насосов.

Основные результаты работы использованы при проектировании скважинных эжекционных систем с улучшенными техническими характеристиками ведущими (в области использования струйных насосов) предприятиями.

Ключевые слова: скважинный струйный насос, математическое моделирование, предельные и рациональные режимы эксплуатации.

ANNOTATION

Panevnyk O.V. Theoretical Principles of Creating Versatile Hydraulic Models of Well Jet Pumps. - Manuscript.

Thesis for the degree of Doctor (Engineering) in speciality 05.05.12 - Machines Used in Oil and Gas Industry. - Ivano-Frankivsk State Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, 2000.

The thesis focuses on the elaboration of versatile hydraulic models of well jet pumps used in the process of drilling and completing wells. The elaboration of the general concept of creating mathematical models and investigation of the process of operation of well jet pumps on the basis of mathematical simulation of hydraulic links between the elements of ejection system taking into consideration the boundary conditions of its operation are done in the thesis. Due to the use of a more representative initial material in the process of creating mathematical models the certainty of estimation of geometric, hydrodynamic and regime parameters of the jet pump was increased by 6.9-75%. On the basis of generalization, classification and systematization of the characteristics of jet pumps the techniques for choosing design and regime parameters for their 15 major uses in wells have been elaborated in the thesis, which will enable to increase the efficiency of the ejection system 1.33-1.35 times. The basic data obtained have been implemented by the leading (in the field of using jet pumps) enterprises when designing well ejection systems with improved technical characteristics.

Key words: well jet pump, mathematical simulation, boundary and optimum operation regimes.