

ОБГРУНТУВАННЯ МЕТОДУ МОДЕЛЮВАННЯ ЦИРКУЛЯЦІЙНИХ ПОТОКІВ ПРИ ОБЕРТАННІ НАДДОЛОТНОГО СТРУМИННОГО НАСОСА

Д. О. Паневник

*ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15; тел.(0342) 727101,
e-mail: den.panevnik@gmail.com*

Вибрано схему теоретичного аналізу впливу обертового руху на робочий процес наддолотного струминного насоса, визначено методи її реалізації та границі використання. На основі теорії потенціальних потоків з використанням елементарних гідродинамічних функцій комплексної змінної розроблено основи побудови аналітичних моделей робочого процесу наддолотного струминного насоса для умов його обертання в свердловині. Складові змішаного потоку моделюємо у вигляді функцій вихорovitoku та паралельно-струминної течії. Накладання окремих гідродинамічних функцій комплексної змінної дозволило поєднати часткові розв'язки диференціальних рівнянь руху елементарних течій та виявити структуру функцій змішаного потоку. Рівняння руху змішаного потоку представлено у вигляді комплексного потенціалу, складові якого відповідають рівнянням Лапласа та умовам Коші-Рімана і визначають кінематику безвихорової течії. Показана можливість використання теорії функції комплексної змінної для моделювання профілів швидкостей та визначення границь розмежування змішуваних потоків при обертанні наддолотного струминного насоса в свердловині. Визначений перелік гідродинамічних параметрів, які необхідно враховувати при моделюванні робочого процесу ежекційної системи, та встановлено структуру вихідних рівнянь, що характеризують кінематичну картину поля швидкостей в камері змішування струминного насоса. Сформульовано граничні умови для визначення комплексного потенціалу змішуваних потоків та границь використання запропонованого методу моделювання циркуляційних потоків. Встановлено клас гідродинамічних задач, до якого може бути віднесена задача пошуку комплексного потенціалу змішуваних потоків в камері змішування струминного насоса при його обертанні в свердловині.

Ключові слова: наддолотний струминний насос, потенціальні потоки, гідродинамічні функції, комплексний потенціал.

Выбрана схема теоретического анализа влияния вращательного движения на рабочий процесс наддолотного струйного насоса, определены методы ее реализации и границы применения. На основе теории потенциальных потоков с использованием элементарных гидродинамических функций комплексной переменной разработаны основы построения аналитических моделей рабочего процесса наддолотного струйного насоса для условий его вращения в скважине. Составляющие смешанного потока моделируем в виде функций вихреисточника и параллельно-струйного течения. Наложение отдельных гидродинамических функций комплексной переменной позволяет объединить частные решения дифференциальных уравнений движения элементарных течений и установить структуру функции смешанного потока. Показана возможность использования теории функций комплексной переменной для моделирования профилей скоростей и определения границ размежевания смешанных потоков при вращении наддолотного струйного насоса в скважине. Определен ряд гидродинамических параметров, которые необходимо учитывать при моделировании рабочего процесса ежекционной системы и установлена структура исходных уравнений, характеризующих кинематическую картину поля скоростей в камере смешивания струйного насоса. Сформулированы граничные условия для определения комплексного потенциала смешиваемых потоков и границ применения предложенного метода моделирования циркуляционных потоков. Установлен класс гидродинамических задач, к которому может быть отнесена задача поиска комплексного потенциала смешиваемых потоков в камере смешивания струйного насоса при его вращении в скважине.

Ключевые слова: наддолотный струйный насос, потенциальные потоки, гидродинамические функции, комплексный потенциал.

The scheme of theoretical analysis of the influence of rotational motion on the working process of the near-bit jet pump is chosen, the methods of its realization and limits of use are determined. On the basis of the potential flows theory with the application of elementary hydrodynamic functions of a complex variable, basics for the development of analytical models of the near-bit ejector pump operation for conditions of its rotation in a well have been worked out. Components of a mixed flow are modeled as functions of the vortex flow and parallel jet flow. Application of certain hydrodynamic functions of a complex variable has allowed to combine partial outcomes of

differential equations of elementary streams motions and to determine the structure of the mixed flow function. The equation of the mixed flow motion is given in the form of a complex potential, components of which are equal to Laplace's equation and Cauchy-Riemann Conditions, and determine the kinematics of irrotational flow. Possibility of application of the complex variable functions' theory for velocities profiles modeling and determination of limits for dissociation of mixed flows by rotation of the near-bit jet pump in a well has been shown. The list of hydrodynamic parameters, which should be taken into consideration by modeling of the ejector system working process, has been determined, and the structure of initial equations, that characterize kinematic picture of velocities field in the chamber of the ejector pump mixing has been established. Limit conditions for determination of a complex potential of mixed flows and application limits of the proposed method of circulation flows modeling have been stated. The class of hydrodynamic problems has been established, to which one may relate the problem of finding the complex potential of mixed flows in a chamber for mixing of an ejector pump by its rotation in a well.

Key words: near-bit jet pump, potential flows, hydrodynamic functions, complex potential.

Постановка проблеми

Необхідність нарощування власного видобутку вуглеводнів вимагає підвищення ефективності спорудження експлуатаційних свердловин. Процес буріння супроводжується забрудненням продуктивного горизонту, внаслідок чого погіршуються фільтраційні властивості порід, зменшується продуктивність та коефіцієнт нафтогазовіддачі свердловини і тривалість розробки родовища. Аналіз фактичних незворотних змін фільтраційної характеристики навколо свердловинної зони вказує на можливість зменшення продуктивності нафтових родовищ України в 2-12 разів.

Використання наддолотних струминних насосів для первинного розкриття нафтогазоносного горизонту дозволяє зберегти природню проникність продуктивного пласта за рахунок зменшення тиску у привибійній зоні та зростання механічної швидкості буріння. Здатність струминного насоса зменшувати диференціальний тиск у свердловині може бути підсилена одночасним використанням вихорових насадок [1]. Суттєвою перевагою наддолотних струминних насосів є можливість зменшення вартості буріння горизонтальних ділянок експлуатаційних свердловин [2]. Моделювання робочого процесу наддолотного струминного насоса засноване на взаємодії супутніх потенціальних потоків з розміщеною між ними кільцевою зсувною течією змінної структури. Складність гідродинамічних процесів вирівнювання швидкостей та тисків змішуваних потоків є причиною недостатньої точності проектування та прогнозування режимів експлуатації наддолотного струминного насоса. Дана обставина значною мірою стримує подальше поширення ежекційних технологій. Удосконалення математичної моделі наддолотного струминного насоса дозволяє підвищити ефективність первинного розкриття продуктивного горизонту і є актуальним завданням.

Аналіз останніх досліджень

Класичний метод моделювання робочого процесу наддолотної ежекційної системи передбачає [3], [4] встановлення вигляду рівняння напірної характеристики на основі використання закону збереження руху рідини в замкненому об'ємі камери змішування струминного насоса. Закон збереження кількості руху рідини є основним засобом моделювання робочого процесу свердловинних струминних насосів, які використовують в технологічних процесах освоєння, експлуатації та ремонту нафтогазових свердловин [5]. В роботі [6] для моделювання нагнітально-всмоктувальної ежекційної системи використовують закон збереження енергії, представлений у вигляді рівняння Бернуллі. Для визначення гідравлічних втрат в елементах даної ежекційної системи застосована теорема Ейлера про зміну кількості руху рідини, рівняння Вейсбаха та емпіричні співвідношення. Рівняння Бернуллі використовується також для моделювання характеристики гідравлічної системи наддолотного струминного насоса [7]. Спільний розв'язок рівнянь характеристики струминного насоса та його гідравлічної системи дозволяє визначити оптимальні конструкторські та режимні параметри вибійної компоновки. Моделювання робочого процесу наддолотної ежекційної системи, яка створює у привибійній зоні зворотну циркуляцію робочого агента, здійснюється за допомогою диференціальних рівнянь руху змішуваних потоків [8]. У цьому випадку зазвичай використовують чисельне моделювання та прикладні пакети стандартних програм.

Виділення раніше невирішеної частки проблем

На відміну від ежекційних систем, які реалізують технологічні процеси виклику припливу пластової рідини, нафтогазовидобування та промивання піщаних корків, використання наддолотного струминного насоса супроводжується його обертанням у свердловині. Обертання

струминного насоса в свердловині має місце також при використанні ежекційних систем для видалення з вибою металевих шламу та елементів підземного обладнання [9]. Внаслідок обертання бурильної колони наддолотна ежекційна система додатково набуває ознак, що характерні динамічним насосам. Виникнення в проточній частині струминного насоса циркуляційних потоків, траєкторія руху яких розміщена в площинах, перпендикулярних до осі свердловини, змінює вигляд напірної, енергетичної та кавітаційної характеристик ежекційної системи. Відомі математичні моделі наддолотного струминного насоса не враховують факту його обертання в свердловині, внаслідок чого можливо визначити лише наближені значення показників його використання.

Мета досліджень

Метою досліджень, результати яких наведені в даній роботі, є обґрунтування методу моделювання робочого процесу наддолотного струминного насоса із врахуванням його обертального руху в свердловині.

Висвітлення основного матеріалу

Низьконапірний інжектований потік внаслідок обертального руху високонапірного робочого потоку отримує додаткову кінетичну енергію, яка в подальшому перетворюється в енергію тиску. Під час обертання робочого потоку утворюються спіралеподібні лінії течії, які взаємодіють з інжектованою рідиною так само, як це відбувається в порожнині робочого колеса відцентрового насоса. Обертання робочого потоку, таким чином, викликає створення струминним насосом додаткового напору.

Обертання ежекційної системи змінює профіль швидкостей потоків у камері змішування струминного насоса. Внаслідок дії відцентрових сил в процесі обертання відбувається зміщення границі поділу зовнішнього інжектованого та внутрішнього робочого потоків у напрямку від осі симетрії струминного насоса і зростає швидкість руху рідини в периферичних, розміщених біля стінок камери змішування, ділянках. Профіль швидкостей стає більш рівномірним, внаслідок чого зростає витрата і тиск змішаного потоку.

Відповідно до запропонованого автором механізму впливу обертання ежекційної системи на характеристику струминного насоса будемо вважати, що вирівнювання профілю швидкостей рівнозначне передачі кінетичної енергії циркуляційним потоком зовнішній інжектованій течії. Тоді порівняльний аналіз профілів

швидкостей в камері змішування для випадку обертання і для нерухомої ежекційної системи дозволяє визначити вплив циркуляційної течії на характеристику струминного насоса. Запропонована автором математична модель змішування потоків заснована на використанні гідродинамічних функцій комплексної змінної у вигляді суми часткових розв'язків диференціальних рівнянь потенціального руху радіальної, циркуляційної та однорідної течій.

Найбільш поширена гідравлічна модель робочого процесу струминного насоса враховує нерівномірність розподілу швидкостей в камері змішування за допомогою коефіцієнта швидкості φ . Даний коефіцієнт може бути визначений як співвідношення середньої і максимальної швидкостей потоку [10]. Таким чином, дослідження впливу частоти обертання ежекційної системи на її характеристику зводиться до визначення впливу даного параметра на зміну величини коефіцієнта швидкості руху потоків у камері змішування струминного насоса.

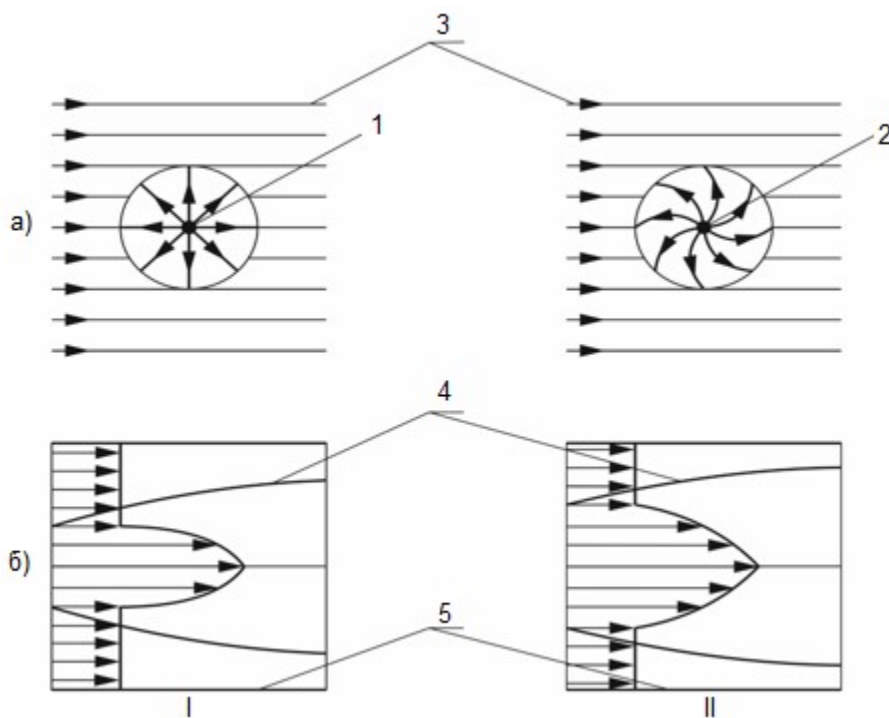
Враховуючи запропонований автором механізм впливу обертання ежекційної системи на характеристику струминного насоса, сформулюємо задачу досліджень.

Джерело потоку у вигляді точкового витіку обтікається однорідною течією.

У випадку нерухомої ежекційної системи робочий потік має вигляд радіальної (позиція 1 на рис. 1, I) течії.

Для умов обертання струминного насоса робочий потік утворюється радіально-циркуляційною (позиція 2 на рис. 1, а II) течією. Однорідна течія 3 моделює інжектований (зовнішній) потік. Границя поділу інжектованого та робочого потоків 4 (рис. 1, б), яка відокремлює однорідний потік від радіальної (рис. 1, б I) або радіально-циркуляційної (рис. 1, б II) течії, внаслідок дії сил інерції при обертанні робочого потоку зміщується в напрямку стінок камери змішування. При цьому зростає площа епюри швидкостей, середня швидкість змішаного потоку та величина коефіцієнта нерівномірності. Задача досліджень, таким чином, може бути зведена до пошуку границь розмежування інжектованого й робочого потоків та інтегрування профілю швидкостей.

Під час визначення радіуса розмежування потоків r_i , коефіцієнта нерівномірності розподілу швидкостей φ та відносного напору h струминного насоса необхідно врахувати частоту обертання ежекційної системи n , величину коефіцієнта інжекції i , геометричний пара-



а) обтікання витоку (I) та вихоровитоку (II) однорідним потоком;
 б) профілі швидкостей радіально-однорідного (I) та радіально-циркуляційно-однорідного (II) змішаного потоків
 1 – витік; 2 – вихоровитік; 3 – однорідний потік; 4 – границі розмежування потоків; 5 – стінка камери змішування

Рисунок 1 – Постановка задачі досліджень

метр K_p , радіус камери змішування r_c та відстань між робочою насадкою та камерою змішування l_w .

$$r_i, \varphi, h = f(n, r_c, i, l_w, K_p). \quad (1)$$

Вихідні рівняння, які моделюють робочий процес ежекційної системи за наявності обертання струминного насоса, мають вигляд:

$$w(z) = \varphi(x, y) + i\psi(x, y); \quad (2)$$

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = 0; \quad (3)$$

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = 0; \quad (4)$$

$$w(z) = w_1(z) + w_2(z) + \dots + w_n(z), \quad (5)$$

де $w(z)$ – комплексний потенціал;

$\varphi(x, y)$ – потенціал швидкостей в точці рідини з координатами x, y ;

$\psi(x, y)$ – функція течії в точці рідини з координатами x, y .

Рівняння (2) показує, що кожний визначений вибір аналітичної функції $w(z)$ характеризує певну систему ліній течії $\psi(x, y) = const$ та

ізопотенціальних ліній $\varphi = const$ і, таким чином, встановлює індивідуальну кінематичну картину поля швидкостей плоскої течії

$$u = \frac{\partial \varphi}{\partial x} = \frac{\partial \psi}{\partial y}; \quad (6)$$

$$v = \frac{\partial \varphi}{\partial y} = -\frac{\partial \psi}{\partial x}, \quad (7)$$

де u, v – компоненти швидкості.

Потенціал швидкостей φ та функція течії ψ відповідають рівнянням Лапласа (співвідношення (3), (4)). Функції ψ, φ повністю визначають кінематику безвихорового потоку. Самих рівнянь Лапласа, однак, недостатньо для визначення функцій ψ, φ , які відповідають кожному конкретному випадку, оскільки дані диференціальні рівняння мають безліч розв'язків. Тому необхідно сформулювати додаткові умови, що дозволили б визначити комплексний потенціал у кожному конкретному випадку. Перша гранична умова накладає додаткові обмеження на функцію φ : нормальна складова швидкості рідини на поверхні контура V_n повинна дорівнювати нулю, оскільки рідина не може проникнути всередину контура і не

може відірватись від його поверхні (обтікання безвідривне)

$$V_n = \frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0. \quad (8)$$

Наведене співвідношення є умовою ковзання для ідеальної рідини.

Друга умова стосується іншої границі потоку: на значній відстані (тобто умовно на безмежності) від контура області, яка розглядається, де збурення на потік відсутнє, течія повинна мати задану швидкість $V = V_\infty$. Обидві наведені умови стосуються значень функцій ψ , φ на границях контуру рідини і тому визначають граничні умови даної задачі. Таким чином, під час розв'язання рівняння Лапласа для даної конкретної задачі необхідно зі всього масиву функцій ψ , φ вибрати значення, які задовільняли б згаданим граничним умовам. В загальному випадку (тобто для контурів областей будь-якої форми) ця задача на сьогоднішній день не має точного розв'язку, проте окремі часткові розв'язки цих рівнянь для елементарних потоків відомі. Цих небагатьох розв'язків достатньо для отримання значної кількості розв'язків для більш складних потоків. Враховуючи, що рівняння (3), (4) є лінійними, вони мають таку саму властивість, що і сума будь-якої кількості часткових розв'язків, тобто сума окремих розв'язків теж є розв'язком рівняння Лапласа. При додаванні потенціалів швидкостей та функцій течій відповідні швидкісні поля додаються за загальним правилом складання векторних полів. Рівняння (5) визначає принцип суперпозиції або метод накладання потоків.

Рівняння (6), (7) є диференціальними рівняннями Коші-Рімана, яким задовільняють дійсна та уявна частина будь-якої регулярної функції комплексної змінної $w(z)$, де $z = x + iy$, і навпаки, якщо функції $\varphi(x, y)$ та $\psi(x, y)$ задовільняють диференціальним рівнянням (6), (7) ці функції можна розглянути відповідно як дійсну та уявну частини певної регулярної функції комплексної змінної. Ця обставина дозволяє використовувати комплексну змінну в теорії плоского потенціального потоку нестисливої рідини. Введення комплексної змінної суттєво спрощує дослідження плоского потенціального потоку і дозволяє залучити до вирішення питань гідродинаміки достатньо розроблений математичний апарат теорії функції комплексної змінної.

В процесі моделювання робочого процесу ежекційної системи за умови кругової циркуляції змішуваних потоків вважаємо, що обер-

тання частинок рідини навколо власної осі відсутнє

$$\text{rot } \vec{V} = 0;$$

або

$$\omega_x = \omega_y = \omega_z = 0, \quad (9)$$

де V – лінійна векторна швидкість руху частинки рідини за замкненою траєкторією;

ω – компоненти кутової швидкості руху частинки рідини.

При цьому допускається усталений рух рідини за концентричними траєкторіями навколо прямолінійної осі. Обертання елементарних частинок рідини відсутнє практично у всьому об'ємі потоку за винятком невеликих за розміром областей. Зокрема це області, які безпосередньо прилягають до твердих поверхонь, тобто приграничний шар рідини. Прийняте припущення, таким чином, не враховує зменшення швидкості руху рідини до нуля біля стінки камери змішування. Відсутність обертання елементарних об'ємів в потоці або безвихорова течія означає, що рідина знаходиться у потенціальному силовому полі, тобто зовнішні сили F , які діють на рідину, мають потенціал U

$$F = \text{grad } U. \quad (10)$$

Існування потенціала швидкостей, власне, і визначає характер плоского швидкісного поля

$$u = \frac{\partial \varphi}{\partial x}; \quad V = \frac{\partial \varphi}{\partial y}, \quad (11)$$

або

$$\vec{V} = \text{grad } \varphi.$$

Умова потенціальності дозволяє суттєво спростити розрахункові залежності, оскільки замість векторної функції \vec{V} достатньо знайти скалярну функцію φ .

Область використання запропонованої математичної моделі визначається застосуванням при моделюванні робочого процесу струминного насоса методу накладання змішуваних потоків. Процес змішування рідин відбувається за наявності як робочого, так і інжектowanego потоку. Робочий режим свердловинної ежекційної системи, однак, не виключає можливості експлуатації струминного насоса у випадку нульової витрати інжектowanego потоку $Q_i = 0$, яка відповідає максимальній величині відносного напору $h = h_{\text{max}}$. Враховуючи відносні показники, область використання запропонованої моделі може бути визначена умовою існування позитивних значень коефіцієнта інжекції $i = Q_i/Q_p > 0$ (де Q_p – витрата робочого потоку). Визначена область застосування запропонованої моделі, однак, не звужує границь її ви-

Таблиця 1 – Основні складові елементів формулювання постановки задачі дослідження

Мета моделювання	Встановлення відповідності між величинами $r_i, \varphi, h = f(n, r_c, i, l_w, K_p)$
Вихідні рівняння	$w(z) = \varphi(x, y) + i\psi(x, y)$ $\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = 0; \quad \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = 0$ $w(z) = w_1(z) + w_2(z) + \dots + w_n(z)$
Методи розв'язання задачі	Теорія функцій комплексної змінної
Прийняті припущення	$\text{rot } \vec{V} = 0$
Область використання	$i > 0$

користання, оскільки величина коефіцієнта інжекції може бути прийнята нескінченно малою.

Розглянуті особливості постановки задачі дослідження робочого процесу свердловинної ежекційної системи зведені в таблицю 1.

Визначимо клас гідродинамічних задач, до якого може бути віднесена задача пошуку комплексного потенціалу сумарних потоків у камері змішування струминного насоса при його обертанні в свердловині. Залежно від прийнятих граничних умов розрізняють два типи задач гідродинаміки:

1. Задача Неймана, яка передбачає визначення в даній заданій області D функції φ (яка задовільняла б рівнянню Лапласа) за відомим значенням нормальної похідної цієї функції на контурі області D .

2. Задача Дирихле, яка полягає у визначенні в заданій області D функції ψ (яка задовільняла б рівнянню Лапласа) за відомим значенням цієї функції на контурі області D .

В нашому випадку внутрішня область робочого потоку обмежена контуром розмежування (у вигляді лінії течії) однорідної (позиція 3 на рисунку 1) та радіально-циркуляційної (позиції 1, 2 на рисунку 1) течії. Контур перерізу будь-якого тіла є лінією течії, оскільки в ідеальній рідині умова, що визначає будь-яку лінію течії $\left(\frac{\partial \varphi}{\partial n}\right) = 0$, збігається з умовою на твердій

стінці і, навпаки, кожен ліній течії можна розглядати як контур перерізу твердого тіла. Лінію течії, яка характеризує тверду поверхню, прийнято вважати нульовою лінією течії $\psi = 0$. Вибір значення функції $\psi = 0$ на контурі області не суперечить фізичному змісту процесу, оскільки комплексний потенціал визначається до аддитивної постійної вигляду $c = c_1 + ic_2$, а постійні c_1, c_2 можуть бути прийняті такими, щоб виконувалась умова $\psi = 0$.

Таким чином, розв'язок рівняння Лапласа передбачає використання граничної умови у вигляді відомого значення функції течії на контурі області. Враховуючи, що функції ψ та φ є спряженими функціями поставлена гідродинамічна задача може бути класифікована як окремий різновид граничної задачі Дирихле.

Після встановлення закономірностей зміни параметрів робочого процесу свердловинної ежекційної системи необхідно провести детальний аналіз отриманих при моделюванні аналітичних залежностей.

Висновки та перспективи розвитку напрямку

1. Показана можливість моделювання робочої, інжектваної та циркуляційної течії за допомогою гідродинамічних функцій комплексної змінної.

2. Сформульовано граничні умови для визначення комплексного потенціалу змішуваних потоків та границь використання запропонованого методу моделювання робочого процесу наддолотного струминного насоса.

3. Поєднання часткових розв'язків диференціальних рівнянь руху елементарних течій дозволяє встановити структуру функції змішаного потоку, дослідити його кінематику та виявити закономірності зміни напірної та енергетичної характеристики струминного насоса в умовах його симетричного обертання в свердловині.

4. Визначено клас гідродинамічних задач, до якого може бути віднесене моделювання робочого процесу наддолотного струминного насоса з використанням гідродинамічних функцій комплексної змінної.

Сформульовані принципи моделювання змішування циркуляційних потоків в подальшому необхідно реалізувати в гідравлічній моделі струминного насоса для умов його симетричного обертання в свердловині з наступною експериментальною перевіркою аналітичних

напірної та енергетичної характеристик свердловинної ежекційної системи.

Література

1. Zhu H.- Y., Liu Q.-Y. Pressure drawdown mechanism and design principle of jet pump bit. *Scientia Iranica B*. 2015. No 22 (3). P.792-803.
2. Hughes J. Underbalanced horizontal drilling could it be the ultimate completion Technique? URL: <http://www.sunstonetechnologies.net>. (accessed 2014). 15 p.
3. Zhu H. -Y., Liu Q.-Y., Wang T. Reducing the bottom-hole differential pressure by vortex and hydraulic jet methods. *Journal of Vibroengineering*. 2014. No 16(51). P. 2224 – 2249.
4. Zhu H-Y., Deng J.-G., Jing-Ying Z. Vortex methods reducing the bottom-hole differential pressure. *Journal of Mines, Metals and Fuels*. 2012. № 5. P. 81-90.
5. Tumanyan K.A., Plyeb A.M., Kovalevsky S.A., Korneev A.A. Investigation of downhole jet pump unit for dual completion of two and more reservoirs. *Proc. SPE Russian Petroleum Technology Conference*, Moscow, 26–28 October, 2015. no SPE 176552 MS. 28 p. <https://doi.org/10.2118/176552-MS>.
6. Chen X., Gao D., Guo B. A method for optimizing jet-mit-bit hydraulics in horizontal drilling. *SPE Journal*. 2016. No 4. P. 416 – 422.
7. Паневник А.В., Концур И.Ф., Паневник Д.А. Определение эксплуатационных параметров наддолотной эжекторной компоновки. *Нефтяное хозяйство*. 2018. № 3. С. 70 – 73. <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2018-3-70-73>.
8. Huang Y., Zhu L., Zou D., Liao H., Wang J., Yan J., Zhou Y., Wang Z. Study an structure parameters of reverse circulation drill bit secondary injector device based on injector coefficient. *Proc. IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference*, Singapore. 22-24 August, 2016. IADC/SPE 180539 MS. 9 p. <https://doi.org/10.2118/180539-MS>.
9. Coll B., Laws G., Jeanpert J., Sportelli M., Svoboda C., Trimble M. Specialized Tools for wellbore debris recovery. *Oilfield Review*. 2013. No 24(4). P. 4 – 13.
10. Kryzhanivskiy Ye.I., Panevnyk, D.O. The study of the flows kinematics in the jet pumps mixing chamber. *Naykovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2019. No 1. P. 62-68. <https://doi/10.29202/nvngu/2019-1/7>.

References

1. Zhu H.- Y., Liu Q.-Y. Pressure drawdown mechanism and design principle of jet pump bit. *Scientia Iranica B*. 2015. No 22 (3). P.792-803.
2. Hughes J. Underbalanced horizontal drilling could it be the ultimate completion Technique? URL: <http://www.sunstonetechnologies.net>. (accessed 2014). 15 p.
3. Zhu H. -Y., Liu Q.-Y., Wang T. Reducing the bottom-hole differential pressure by vortex and hydraulic jet methods. *Journal of Vibroengineering*. 2014. No 16(51). P. 2224 – 2249.
4. Zhu H-Y., Deng J.-G., Jing-Ying Z. Vortex methods reducing the bottom-hole differential pressure. *Journal of Mines, Metals and Fuels*. 2012. № 5. P. 81-90.
5. Tumanyan K.A., Plyeb A.M., Kovalevsky S.A., Korneev A.A. Investigation of downhole jet pump unit for dual completion of two and more reservoirs. *Proc. SPE Russian Petroleum Technology Conference*, Moscow, 26–28 October, 2015. no SPE 176552 MS. 28 p. <https://doi.org/10.2118/176552-MS>.
6. Chen X., Gao D., Guo B. A method for optimizing jet-mit-bit hydraulics in horizontal drilling. *SPE Journal*. 2016. No 4. P. 416 – 422.
7. Panevnik A.V., Kotsur I.F., Panevnik D.A. Determination of operating parameters of near-bit ejector assembly. *Neftyanoe Khozyaistvo*. 2018. No 3. P. 70-73. <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2018-3-70-73> [in Russian].
8. Huang Y., Zhu L., Zou D., Liao H., Wang J., Yan J., Zhou Y., Wang Z. Study an structure parameters of reverse circulation drill bit secondary injector device based on injector coefficient. *Proc. IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference*, Singapore. 22-24 August, 2016. IADC/SPE 180539 MS. 9 p. <https://doi.org/10.2118/180539-MS>.
9. Coll B., Laws G., Jeanpert J., Sportelli M., Svoboda C., Trimble M. Specialized Tools for wellbore debris recovery. *Oilfield Review*. 2013. No 24(4). P. 4 – 13.
10. Kryzhanivskiy Ye.I., Panevnyk, D.O. The study of the flows kinematics in the jet pumps mixing chamber. *Naykovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2019. No 1. P. 62-68. <https://doi/10.29202/nvngu/2019-1/7>.