

ДОСЛІДЖЕННЯ КІНЕМАТИКИ РАДІАЛЬНОГО РОБОЧОГО ПОТОКУ СВЕРДЛОВИННОГО СТРУМИННОГО НАСОСА

Д. О. Паневник

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

Проаналізовано можливість застосування характеристичної функції робочого потоку, отриманої з використанням просторової функції витоку комплексної змінної, для дослідження процесу поширення робочого струменя в камері змішування свердловинного струминного насоса. Показано існування неперервних частинних похідних характеристичної функції за обома змінними: потенціалом швидкостей та функції течії, що свідчить про виконання умов Коші-Рімана. Існування умов аналітичності дозволило визначити абсолютне значення вектора швидкості робочого потоку у вигляді модуля похідної характеристичної функції. Розподіл швидкостей робочого потоку у вхідному перерізі камери змішування характеризується осесиметричною параболічною залежністю. Горизонтальна проекція швидкості робочого потоку зменшується при зростанні відстані між робочою насадкою та камерою змішування струминного насоса. Узагальнені профілі швидкостей визначені як співвідношення горизонтальних проекцій швидкостей робочого потоку до їх осевого значення. Максимальні значення швидкості робочого потоку приймає на осі камери змішування струминного насоса. Значення швидкості робочого потоку зменшується в напрямку до стінок камери змішування. Співпадання узагальнених безрозмірних профілів швидкостей, отриманих для будь-яких відстаней між робочою насадкою та камерою змішування, свідчить про їхню подібність. Визначений коефіцієнт нерівномірності розподілу швидкостей у вхідному перерізі камери змішування у вигляді співвідношення середньої та максимальної швидкостей робочого потоку. Проаналізовано вплив основних конструкторських параметрів струминного насоса на нерівномірність профілю швидкостей робочого потоку. Коефіцієнт нерівномірності розподілу швидкостей робочого потоку зростає зі збільшенням відстані між робочою насадкою і камерою змішування та зменшується зі збільшенням основного геометричного параметра струминного насоса.

Ключові слова: свердловинний струминний насос, ежекційна система, потенціальні потоки, гідродинамічні функції, комплексний потенціал, аналітичність функції.

The paper analyzes the possibility of applying the characteristic function of the working flow, obtained using the spatial leakage function of a complex variable, to study the process of working jet propagation in the mixing chamber of a downhole jet pump. The existence of continuous partial derivatives of the characteristic function for both variables, the velocity potential and the flow function, is shown, indicating that the Cauchy-Riemann conditions are satisfied. The existence of analytical conditions allowed the determination of the absolute value of the working flow velocity vector in the form of the modulus of the derivative of the characteristic function. The distribution of the working fluid velocities in the inlet section of the mixing chamber is characterized by an axisymmetric parabolic dependence. The horizontal projection of the working fluid velocity decreases with increasing distance between the working nozzle and the mixing chamber of the jet pump. Generalized velocity profiles are defined as the ratio of the horizontal projections of the working fluid velocities to their axial value. The working fluid velocity reaches its maximum value on the axis of the mixing chamber of the jet pump. The value of the working fluid velocity decreases towards the walls of the mixing chamber. The coincidence of the generalized dimensionless velocity profiles obtained for any distance between the working nozzle and the mixing chamber indicates their similarity. The coefficient of unevenness of the velocity distribution in the inlet section of the mixing chamber was determined in the form of the ratio of the average and maximum velocity of the working flow. The influence of the main design parameters of the jet pump on the unevenness of the working fluid velocity profile is analyzed. The coefficient of unevenness of the distribution of the working fluid velocities increases with the increasing distance between the working nozzle and the mixing chamber and decreases with the increasing of the main geometric parameters of the jet pump.

Key words: borehole jet pump, ejection system, potential flows, hydrodynamic functions, complex potential, analytical function.

Вступ

Сучасний рівень розробки нафтогазових родовищ відзначається існуванням стійкої тенденції до зростання глибини пробурених ек-

сплуатаційних свердловин [1], що викликає зростання тиску на вибій, вторинне подрібнення гірської породи, ускладнення умов видалення шламу та зниження техніко-економічних пока-

зників буріння. Вторинне подрібнення вибурової породи зменшує ресурс породоруйнівного інструмента та збільшує обсяги проведення спуско-піднімальних операцій, необхідних для його заміни. Зростання тиску у привибійній зоні свердловини чинить негативний вплив на збереження природної проникності продуктивного горизонту під час його первинного розкриття [2]. Умови первинного розкриття нафтогазоносного горизонту мають домінуючий вплив на ефективність його наступної розробки. Проникнення складових промивального розчину в нафтогазоносний пласт суттєво погіршує його колекторські властивості та значною мірою зменшує обсяги видобутих вуглеводнів. Визначальними факторами, що впливають на ефективність первинного розкриття нафтогазоносного пласта, є тиск у привибійній зоні свердловини та тривалість його взаємодії з компонентами промивального розчину. Зниження тиску в привибійній зоні свердловини під час первинного розкриття нафтогазоносного пласта реалізується застосуванням технологій збалансованого буріння, які дають змогу зменшити забруднення продуктивного горизонту в процесі розробки наземних [3] та прибережних [4] вуглеводневих родовищ. Технології збалансованого буріння передбачають зниження гідростатичного тиску на вибій шляхом промивання пінами [5] або продуванням [6] свердловин. Основним недоліком технології збалансованого буріння є підвищена імовірність виникнення аварійної ситуації, викликана зниженням тиску на продуктивний горизонт та виникненням в свердловині нафтогазопроявів.

Необхідність підвищити ефективність первинного розкриття нафтогазоносного пласта сприяла розробленню нетрадиційних методів зниження тиску у привибійній зоні свердловини і, зокрема, використанню наддолотних ежекційних систем, основним елементом яких є струминний насос. На відміну від технології збалансованого буріння, застосування струминного насоса дозволяє створювати область низького тиску виключно у привибійній зоні при збереженні його необхідної величини в свердловині над породоруйнівним елементом. У випадку зупинки бурового насоса та припинення циркуляції промивального розчину відбувається швидке відновлення величини гідростатичного тиску по всій глибині свердловини. Ефективне застосування наддолотних ежекційних систем вимагає використання аналітичних методів прогнозування особливостей робочого процесу та раціонального режиму їх експлуатації, удосконалення яких є актуальною задачею.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень і публікацій

Прогнозування режиму експлуатації наддолотних ежекційних систем передбачає моделювання робочого процесу свердловинного струминного насоса. Найбільш поширені математичні моделі робочого процесу струминного насоса, засновані на використанні закону збереження імпульсу руху змішуваних потоків в його проточній частині [7] з обмеженнями, які накладаються необхідністю експлуатації ежекційної системи у безкавітаційному режимі [8]. У випадку закручування змішуваних середовищ [9] застосовуються елементи теорії вихрових потоків. Особливістю конструкції наддолотних ежекційних систем є наявність декількох контурів привибійної циркуляції промивального розчину, характер розподілу потоків в яких визначається методом електрогідродинамічної аналогії [10]. Значна кількість математичних моделей робочого процесу струминного насоса ґрунтується на використанні диференціальних рівнянь руху змішуваних потоків [11], які, зазвичай, розв'язують за допомогою спеціальних комп'ютерних програм [12]. Під час аналізу особливостей експлуатації рідинно-газових струминних апаратів додатково застосовуються елементи газової динаміки [13]. В роботі [14] запропоновано використання комплексного потенціалу радіального потоку для моделювання поширення робочого струменя в проточній частині свердловинного струминного насоса.

Висвітлення невирішених раніше частин загальної проблеми

Розглянуті математичні моделі робочого процесу струминного насоса не враховують факту його обертання в свердловині. Обертний рух струминного насоса впливає на форму епюри швидкостей та величину витрати змішуваних потоків. Похибка у визначенні напірно-витратної характеристики ежекційної системи (викликана нехтуванням її відносного обертання в свердловині) є причиною неоптимального режиму роботи та може викликати кавітацію та порушити суцільність змішуваних потоків у проточній частині струминного насоса. В роботі [14] автором отримано рівняння комплексного потенціалу у вигляді характеристичної функції радіального робочого потоку, яке може бути частиною методики застосування елементарних гідродинамічних функцій при моделюванні процесів в камері змішування струминного насоса у випадку його обертання в свердловині. У запропонованій моделі робоче середовище представлене у вигляді точкового витoku,

розміщеного на одній осі з камерою змішування струминного насоса. У ході подальших досліджень необхідно на основі отриманої в процесі моделювання характеристичної функції витоку комплексної змінної [14] дослідити кінематичні параметри та профілі швидкостей робочого потоку та встановити особливості його поширення в камері змішування свердловинного струминного насоса при його симетричному обертанні в свердловині.

Формулювання цілей статті

Метою досліджень є встановлення закономірностей поширення робочого струменя в проточній частині струминного насоса на основі використання елементарної гідродинамічної функції комплексної змінної у вигляді розміщеного на одній осі з камерою змішування точкового витоку.

Поставлена мета передбачає виконання наступних завдань досліджень:

– встановлення відповідності отриманої характеристичної функції робочого потоку умовам Коші-Рімана;

– визначення особливостей поля швидкостей робочого потоку на входній ділянці камери змішування струминного насоса;

– встановлення закономірностей зміни нерівномірності розподілу швидкостей на вході в камеру змішування струминного насоса.

Висвітлення основного матеріалу дослідження

Характеристична функція робочого потоку, отримана з використанням просторової функції витоку [14], має вигляд

$$W(z) = a \left(\frac{1}{\sqrt{z^2 + r^2}} + i \frac{z}{\sqrt{z^2 + r^2}} \right), \quad (1)$$

де $W(z)$ – комплексний потенціал змінної z ;

a – елементарна витрата рідини через бокову поверхню кругового циліндра радіусом r , $a = -Q/4\pi$;

Q – витрата рідини через бокову поверхню кругового циліндра радіусом r ;

z, r – координати точки в циліндричній системі координат.

Визначимо закономірності кінематики робочого потоку на основі аналізу отриманої в процесі моделювання функції витоку. Для аналізу гідродинамічних параметрів робочого потоку застосовуємо положення теорії функції комплексної змінної.

Потенціал швидкостей та функція течії нестисливої рідини є відповідно дійсною та уяв-

ною частинами аналітичної функції комплексної змінної $W(z)$. І навпаки, кожна аналітична функція комплексної змінної $W(z)$ характеризує певний плоский рух нестисливої рідини, який відбувається в симетричних площинах. Кожний визначений вигляд аналітичної функції $W(z)$ дає певну систему ліній течії $\psi = const$ та еквіпотенціальних ліній $\varphi = const$ і, таким чином, встановлює певну кінематичну картину поля швидкостей. На цьому засновано застосування комплексної змінної до теорії плоского потенціального потоку нестисливої рідини. Враховуючи, що комплексний потенціал є аналітичною функцією комплексного числа z , похідна від $W(z)$ не залежить від напрямку диференціювання і повністю визначається положенням точки в площині, яке задане координатою z . Зокрема для декартової системи координат запишемо

$$\frac{\partial w}{\partial z} = \frac{\partial w}{\partial x} = \frac{\partial w}{\partial(iy)}; \quad (2)$$

$$\text{або} \quad \frac{\partial w}{\partial z} = \frac{\partial w}{\partial x} = \frac{\partial \varphi}{\partial x} + i \frac{\partial \psi}{\partial x}; \quad (3)$$

$$\frac{\partial w}{\partial z} = \frac{\partial w}{\partial(iy)} = -i \frac{\partial w}{\partial y} = -i \frac{\partial \varphi}{\partial y} + \frac{\partial \psi}{\partial y}, \quad (4)$$

де x, y – координати довільної точки;

i – уявна одиниця;

φ – потенціал швидкостей;

ψ – функція течії.

Враховуючи умови Коші-Рімана, запишемо рівняння для визначення компонентів швидкості у вигляді

$$V_x = \frac{\partial \varphi}{\partial x} = \frac{\partial \psi}{\partial y}; \quad V_y = \frac{\partial \varphi}{\partial y} = -\frac{\partial \psi}{\partial x}. \quad (5)$$

Тоді похідна від комплексного потенціалу може бути записана як вектор, спряжений з вектором швидкості

$$\left| \frac{\partial w}{\partial z} \right| = \sqrt{V_x^2 + V_y^2} = V. \quad (6)$$

Для циліндричної системи координат модуль похідної характеристичної функції робочого потоку визначається рівнянням

$$\left| \frac{\partial w}{\partial z} \right| = \sqrt{V_z^2 + V_r^2} = V, \quad (7)$$

де V_z, V_r – відповідно осьова та радіальна компоненти швидкості.

Компоненти швидкості в циліндричній системі координат, враховуючи умови Коші-Рімана, розраховуємо за формулами

$$V_z = \frac{\partial \varphi}{\partial z} = \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r}; \quad (8)$$

$$V_r = -\frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial z} = \frac{\partial \varphi}{\partial r}. \quad (9)$$

Перевіримо отримане рівняння характеристичної функції робочого потоку (формула (1)) на відповідність умовам Коші–Рімана.

Горизонтальну складову швидкості потоку визначаємо шляхом диференціювання функції потенціалу швидкостей в напрямку z (рівняння (8))

$$\begin{aligned} V_z &= \frac{\partial \varphi}{\partial z} = -\frac{\partial}{\partial z} \frac{Q}{4\pi} \frac{1}{\sqrt{z^2 + r^2}} = -\frac{Q}{4\pi} \frac{\partial}{\partial z} \frac{1}{\sqrt{z^2 + r^2}} = \\ &= -\frac{Q}{4\pi} \left[\frac{\partial}{\partial z} (z^2 + r^2)^{-0.5} \frac{\partial}{\partial z} (z^2) \right] = \quad (10) \\ &= -\frac{Q}{4\pi} \left[-\frac{1}{2} (z^2 + r^2)^{-1.5} \cdot 2z \right] = \frac{Qz}{4\pi (z^2 + r^2)^{1.5}}. \end{aligned}$$

Крім того, горизонтальна складова швидкості потоку може бути визначена шляхом диференціювання функції течії в напрямку r (рівняння (8))

$$\begin{aligned} V_z &= \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(-\frac{Q}{4\pi} \frac{1}{\sqrt{z^2 + r^2}} \right) = \\ &= -\frac{Q}{4\pi r} \frac{\partial}{\partial r} \frac{z}{\sqrt{z^2 + r^2}} = \\ &= -\frac{Q}{4\pi r} \frac{\frac{\partial}{\partial r} (z) \sqrt{z^2 + r^2} - z \frac{\partial}{\partial r} \sqrt{z^2 + r^2}}{z^2 + r^2} = \quad (11) \\ &= \frac{Q}{4\pi r} \frac{z \frac{\partial}{\partial r} \sqrt{z^2 + r^2}}{z^2 + r^2} = \frac{Q}{4\pi r} \frac{z}{z^2 + r^2} \frac{r}{(z^2 + r^2)^{0.5}} = \\ &= \frac{Qz}{4\pi (z^2 + r^2)^{1.5}}. \end{aligned}$$

Радіальну швидкість потоку визначаємо диференціюванням функції течії (рівняння (9)) в радіальному напрямку

$$\begin{aligned} V_r &= -\frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial z} = -\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial z} \left(-\frac{Q}{4\pi} \frac{z}{\sqrt{z^2 + r^2}} \right) = \\ &= \frac{Q}{4\pi r} \frac{\frac{\partial}{\partial z} (z) \sqrt{z^2 + r^2} - z \frac{\partial}{\partial z} \sqrt{z^2 + r^2}}{z^2 + r^2} = \quad (12) \\ &= \frac{Q}{4\pi r} \frac{\sqrt{z^2 + r^2} - \frac{1}{2} z (z^2 + r^2)^{-0.5}}{z^2 + r^2} = \\ &= \frac{Q}{4\pi r} \frac{\sqrt{z^2 + r^2} - z^2 (\sqrt{z^2 + r^2})^{-0.5}}{z^2 + r^2} = \\ &= \frac{Q}{4\pi r} \frac{r}{(z^2 + r^2)^{1.5}}. \end{aligned}$$

Послідовність диференціювання функції потенціалу швидкостей у радіальному напрямку має вигляд

$$\begin{aligned} V_r &= \frac{\partial \varphi}{\partial r} = -\frac{Q}{4\pi} \frac{\partial}{\partial r} \frac{1}{\sqrt{z^2 + r^2}} = \\ &= -\frac{Q}{4\pi} \frac{\partial}{\partial r} (z^2 + r^2)^{-0.5} \frac{\partial}{\partial r} (r^2) = \quad (13) \\ &= -\frac{Q}{4\pi} \left[-\frac{1}{2} (z^2 + r^2)^{-1.5} \cdot 2r \right] = \frac{Q}{4\pi} \frac{r}{(z^2 + r^2)^{1.5}}. \end{aligned}$$

Рівність компонентів швидкості V_z , V_r , визначених відповідно за формулами (10), (11) та (12), (13), свідчить про виконання умов Коші – Рімана, тобто існують неперервні частинні похідні функцій за обома змінними. Таким чином, отримана характеристична функція є аналітичною, що забезпечує її нескінченну безперервну диференційованість як функції комплексної змінної. Тоді модуль похідної характеристичної функції $W(z)$ визначає абсолютне значення вектора швидкості робочого потоку

$$V = \left| \frac{\partial W}{\partial z} \right| = \sqrt{V_z^2 + V_r^2} = \frac{Q}{4\pi} \frac{1}{z^2 + r^2}. \quad (14)$$

Швидкість робочого потоку в подальшому може бути використана для аналізу його гідродинамічних характеристик.

Оскільки рівняння характеристики струминного насоса враховує одновимірну течію, проаналізуємо горизонтальні складові осесиметричного поля швидкостей, яке генерується просторовим витоком. Горизонтальну складову швидкості потоку визначаємо за рівняннями (10), (11). Максимальне значення горизонтальної складової швидкості потоку має місце на осі камери змішування. У випадку $r=0$ отримаємо

$$V_{z \max} = V_{z0} = \frac{Q}{4\pi z^2}. \quad (15)$$

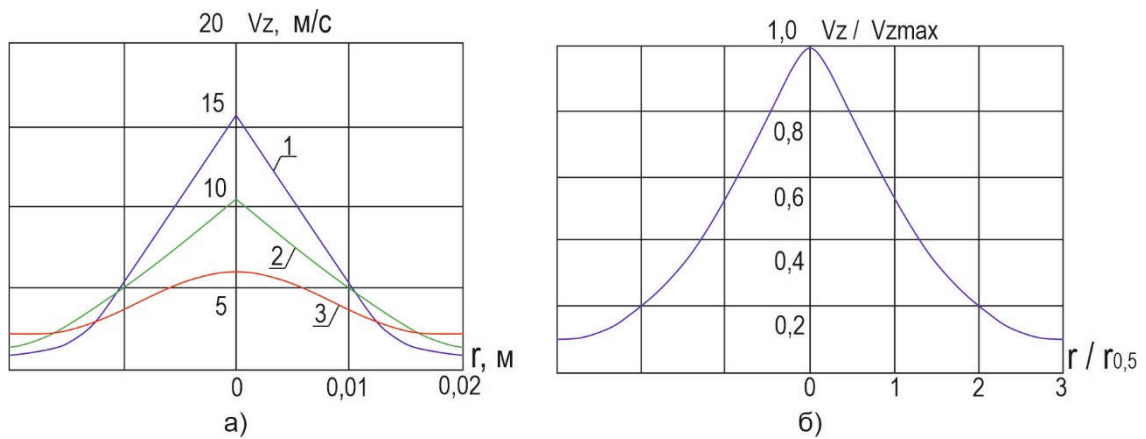
Параметр z у формулі (11) визначає відстань між робочою насадкою та камерою змішування струминного насоса $z = l_p$

$$V_z = \frac{Q l_p}{4\pi (l_p^2 + r^2)^{1.5}}. \quad (16)$$

Аналогічно для осьової швидкості отримаємо

$$V_z = V_{z0} = \frac{Q}{4\pi l_p^2}. \quad (17)$$

Рівняння (10), (11), (15–17) визначають горизонтальне поле швидкості в камері змішування струминного насоса у випадку нульової витрати інжектованого потоку. В цьому випадку



а) профілі швидкостей для різних відстаней до точки витоків l_p : 1 – 0,01 м; 2 – 0,012 м; 3 – 0,015 м;

б) безрозмірний профіль швидкостей

Рисунок 1 – Поле швидкостей робочого потоку

ку швидкісне поле робочого потоку поширюється на весь об'єм камери змішування. Такий режим роботи ежекційної системи реалізується для нульового значення коефіцієнта інжекції та максимального напору струминного насоса.

Розглянемо характер зміни швидкостей у камері змішування струминного насоса для випадку нульової витрати інжектваного потоку. Розподіл швидкостей у вхідному перерізі камери змішування визначаємо за формулою (11). При віддаленні від точки витоків (рис. 1а) горизонтальна швидкість робочого потоку зменшується і нерівномірність розподілу швидкостей знижується.

Віддалення точки витоків відповідає зростанню відстані між робочою насадкою та камерою змішування струминного насоса.

Визначимо безрозмірний розподіл швидкостей в камері змішування струминного насоса. Відносну швидкість потоку запишемо у вигляді співвідношення швидкостей, визначених за формулами (11), (15)

$$\bar{V}_z = \frac{V_z}{V_{z\max}} = \frac{1}{(1 + (r/z)^2)^{1,5}} \quad (18)$$

Відносна швидкість робочого потоку змінюється від $\bar{V}_z = 1$ у випадку $r = 0$ до $\bar{V}_z = 0$, коли $r = \infty$. По осі ординат (рис. 1б) відкладена горизонтальна компонента швидкості V_z , віднесена до осьової швидкості $V_{z\max}$, а по осі абсцис – відстань від початку координат r , віднесена до точки $r_{0,5}$, швидкість в якій дорівнює половині максимальної. Вибір такої характерної відстані викликаний неможливістю визначення координати r , швидкість для якої зменшується до нуля. Для таких безрозмірних координат має місце співпадання всіх кривих, отри-

маних для будь-яких значень z , тобто існує повна подібність безрозмірних профілів швидкостей робочого потоку.

Проаналізуємо нерівномірність розподілу швидкостей робочого потоку у вхідному перерізі камери змішування. Визначимо середню швидкість робочого потоку у вхідному перерізі камери змішування. Враховуючи особливості розподілу ліній течії для даної функції, рідина виходить з точкового витоків як в напрямку камери змішування, так і в протилежному. Зокрема, якщо точка витоків знаходиться у вхідному перерізі камери змішування до неї входить половина загальної витрати джерела робочого потоку. Визначимо частину загальної витрати витоків, яка обмежена стінками камери змішування.

Враховуючи фізичний зміст функції течії, запишемо рівняння для визначення витрати робочого потоку

$$Q_p = 2\pi \int_{r_1}^{r_2} V_z r dr = 2\pi \int_{r_1}^{r_2} \frac{\partial \psi}{\partial r} dr = 2\pi [\psi(r_2, z) - \psi(r_1, z)] \quad (19)$$

У випадку $r_1 = 0$ рівняння для визначення витрати робочого потоку матиме вигляд

$$Q_p = 2\pi [\psi(r, z) - \psi(0, z)] \quad (20)$$

Враховуючи рівняння для визначення функції течії [14]

$$\psi = -\frac{Q}{4\pi} \frac{z}{\sqrt{z^2 + r^2}} \quad (21)$$

та формулу (20), запишемо

$$Q_p = \frac{Q}{2} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + (r/z)^2}} \right) \quad (22)$$

Величина Q у формулі (22) визначає загальну витрату витоків, а Q_p – частину загальної витрати Q , обмежену поверхнями течії $\psi(r_2, z), \psi(r_1, z)$ або стінками камери змішування.

Після здійснення підстановки $r = \frac{d_k}{2}$, де d_k – діаметр камери змішування) отримаємо рівняння витрати робочого потоку

$$Q_p = \frac{Q}{2} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + 0,25 \left(\frac{d_k}{z} \right)^2}} \right). \quad (23)$$

Горизонтальну складову середньої швидкості визначаємо як співвідношення витрати робочого потоку та площі камери змішування S_k

$$V_{cep} = \frac{Q_p}{S_k} = \frac{2Q}{\pi d_k^2} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + 0,25 \left(\frac{d_k}{z} \right)^2}} \right). \quad (24)$$

Тоді коефіцієнт нерівномірності розподілу швидкостей робочого потоку на вході в камеру змішування, враховуючи рівняння (15), (24), може бути визначений за формулою

$$\varphi_p = \frac{V_{cep}}{V_{z0}} = \frac{8}{\left(\frac{d_k}{z} \right)^2} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + 0,25 \left(\frac{d_k}{z} \right)^2}} \right). \quad (25)$$

Враховуючи, що $z = l_p$ та використовуючи безрозмірні співвідношення

$$\bar{l}_p = \frac{l_p}{d_p}; \quad K_{сн} = \left(\frac{d_k}{d_p} \right)^2$$

рівняння (25), приведемо до остаточного вигляду

$$\varphi_p = \frac{8 \bar{l}_p^{-2}}{K_{сн}} \left(1 - \left(1 + \frac{0,25}{\bar{l}_p^{-2}} K_{сн} \right)^{-0,5} \right). \quad (26)$$

Аналіз останнього виразу для будь-яких значень \bar{l}_p , $K_{сн}$ показує, що завжди виконується умова $\varphi_p < 1$, тобто отримане рівняння відповідає фізичному змісту розподілу швидкості в камері змішування струминного насоса. Відповідно до отриманого рівняння нерівномірність розподілу швидкостей (рис. 2) зростає (коефіцієнт φ_p зменшується) при збільшенні співвідношення геометричного параметра $K_{сн}$ та зменшенні відстані від робочої насадки до камери змішування l_p струминного насоса.

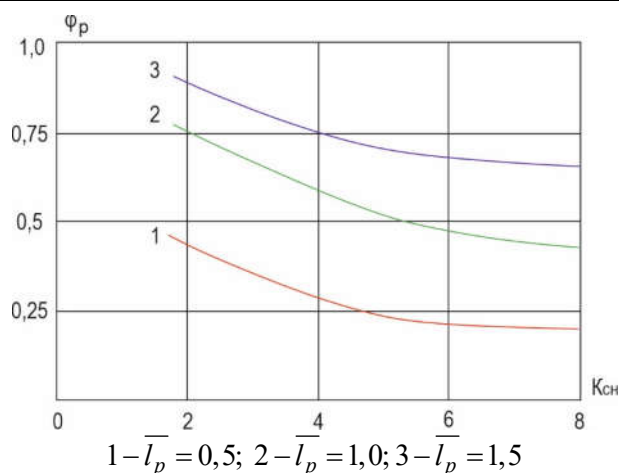


Рисунок 2 – Залежність коефіцієнта нерівномірності розподілу швидкостей від основного геометричного параметра та відстаней між робочою насадкою і камерою змішування

Рівняння (26) та графічні залежності наведені на рисунку 2 дійсні у випадку нульової витрати інжектваного потоку. Коефіцієнт нерівномірності розподілу швидкостей робочого потоку φ_p входить до складу рівняння напірної характеристики струминного насоса та визначає вплив умов його обертання в свердловині на гідродинамічні характеристики наддолотної ежекційної системи.

Висновки

1. Існування неперервних частинних похідних характеристичної функції робочого потоку, тобто виконання умов Коші-Рімана, свідчить про аналітичність отриманого виразу, що забезпечує його нескінченну безперервну диференційованість як функції комплексної змінної. Зважаючи на аналітичність отриманої функції, модуль її похідної визначає абсолютне значення вектора швидкості робочого потоку.

2. Зростання відстані між робочою насадкою та камерою змішування зменшує горизонтальну швидкість робочого потоку. Відношення горизонтальних проекцій швидкостей робочого потоку до їх осьового значення приймає максимальну величину на осі камери змішування та зменшується в напрямку до її стінок. Співпадіння кривих, отриманих для будь-яких відстаней між робочою насадкою та камерою змішування, свідчить про подібність безрозмірних профілів швидкостей робочого потоку.

3. Коефіцієнт нерівномірності розподілу швидкостей робочого потоку та величина основного геометричного параметра струминного насоса пов'язані обернено пропорційною нелінійною залежністю. Зростання відстані між робочою насадкою і камерою змішування стру-

минного насоса збільшує величину коефіцієнта нерівномірності розподілу швидкостей робочого потоку.

Завдання подальших досліджень полягає у розробленні програмного забезпечення для автоматизованого використання отриманих залежностей.

Література

1. Kryzhanivskiy Ye.I., Vytyaz O.Yu, Tyrlych V.V., Hrabovskiy R.S., Artym V.I. Evaluation of the conditions of drill pipes failure during tripping operations. *SOCAR Proceedings*. 2021. Vol. 1. P. 36–48. <https://doi.org/10.5510/OGP20210100478>.
2. Halim M.C., Hamidi H., Akisanya A.R. Minimizing Formation Damage in Drilling Operations: A Critical Point for Optimizing Productivity in Sandstone Reservoirs Intercalated with Clay. *Energies*. 2022. Vol. 15(1). No 162. 30 p. <https://doi.org/10.3390/en15010162>.
3. Zhang W., Dang W., Zhang W., Sun X., Zhu Z. Underbalanced Drilling Optimum Methodology. *Proceeding of the 10th Chinese Geosynthetics Conference & International Symposium on Civil Engineering and Geosynthetics (ISCEG 2020)*. October 26. Chengdu (China). 2020. Vol. 198. 4 p. Article Number 03004. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202019803004>.
4. Huque M.M., Imtiaz S., Rahman A., Hossain M. Kick detection and remedial action in managed pressure drilling: a review. *Applied Sciences*. 2020. Vol. 2. 29 p. Article number 1178. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2962-2>.
5. Khalid A., Ashraf Q., Luqman K., Hadj-Moussa A., Khurshid I. Air/foam drilling coupled with drilling with casing technique enables operator to drill and isolate troublesome section to target depth on multiple wells in Pakistan. *Proceeding of the International Petroleum Technology Conference (IPTC)*. 13–15 January, Dhahran (Kingdom of Saudi Arabia). 2020. 8 p. Paper ID: IPTC-20182-MS. <https://doi.org/10.2523/IPTC-20182-MS>.
6. Djuraev R.U., Toshov J.B., Khatamova D.N. Improving methods of energy-efficient operation of drilling equipment using vortex tubes when drilling wells with air purging. *Technical science and innovation*, 2020. Vol 3. P. 45–54. Article 22. <https://doi.org/10.51346/tstu-01.20.3-77-0086>.
7. Zhu H. Y., Liu Q.Y., Wang T. Reducing the bottom-hole differential pressure by vortex and hydraulic jet methods. *Journal of Vibro-engineering*. 2014. Vol. 8. P. 2224–2249.
8. Xu S., Wang J., Cai B., Cheng H., Ji B., Zhang Z., Long X. Investigation on cavitation initiation in jet pump cavitation reactors with special emphasis on two mechanisms of cavitation initiation. *Physics of Fluids*. 2022. Vol. 34. No. 1. 12 p. <https://doi.org/10.1063/5.0075099>.
9. Panevnyk D.A. Simulation of a downhole jet-vortex pump's working process. *Nafta-Gaz*. 2021. Vol. 9. P. 579–586. <https://doi.org/10.18668/NG.2021.09.02>.
10. Kryzhanivskiy E.I., Panevnyk D.A., Improving use efficiency above-bit jet pumps, *Socar proceeding*. 2020. Vol. 2. P.112–118. <http://doi.org/10.5510/OGP20200200437>.
11. Chen X., Cao T., Yu K., Gao D., Yang J., Wei H. Numerical and experimental investigation on the depressurization capacity of a new type of depressuredominated jet mill bit. *Petroleum Science*. 2020. Vol. 17. P.1602–1615. <https://doi.org/10.1007/s12182-020-00472-8>.
12. Sheha A.A., Nasr M., Hosien M.A., Wahba E.M. Computational and Experimental Study on the Water-Jet Pump Performance. *Journal of Applied Fluid Mechanics*. 2018. Vol. 11. No. 4. P. 1013-1020. <https://doi.org/10.29252/jafm.11.04.28407>.
13. Murillo W.O., Palacio-Fernandez J.A., Arcila I.D., Monsalve J.S., Isaza J.A. Analysis of a Jet Pump Performance under Different Primary Nozzle Positions and Inlet Pressures using two Approaches: One Dimensional Analytical Model and Three Dimensional CFD Simulations. *Journal of Applied and Computational Mechanics*. 2020. Vol. 6. No. SI. P. 1228-1244. <https://doi.org/10.22055/JACM.2020.33339.2205>.
14. Паневник Д.О. Використання комплексного потенціалу плоскорадіального потоку для моделювання робочого процесу свердловинного струминного насоса. *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу*. 2022. № 1(52). С. 42–49. [https://doi.org/10.31471/1993-9965-2022-1\(52\)-42-49](https://doi.org/10.31471/1993-9965-2022-1(52)-42-49).

References

1. Kryzhanivskiy Ye.I., Vytyaz O.Yu, Tyrlych V.V., Hrabovskiy R.S., Artym V.I. Evaluation of the conditions of drill pipes failure during tripping operations. *SOCAR Proceedings*. 2021. Vol. 1. P. 36–48. <https://doi.org/10.5510/OGP20210100478>.
2. Halim M.C., Hamidi H., Akisanya A.R. Minimizing Formation Damage in Drilling Operations: A Critical Point for Optimizing Productivity in Sandstone Reservoirs Intercalated

- with Clay. *Energies*. 2022. Vol. 15(1). No 162. 30 p. <https://doi.org/10.3390/en15010162>.
3. Zhang W., Dang W., Zhang W., Sun X., Zhu Z. Underbalanced Drilling Optimum Methodology. *Proceeding of the 10th Chinese Geosynthetics Conference & International Symposium on Civil Engineering and Geosynthetics (ISCEG 2020)*. October 26. Chengdu (China). 2020. Vol. 198. 4 p. Article Number 03004. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202019803004>.
4. Huque M.M., Imtiaz S., Rahman A., Hossain M. Kick detection and remedial action in managed pressure drilling: a review. *Applied Sciences*. 2020. Vol. 2. 29 p. Article number 1178. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2962-2>.
5. Khalid A., Ashraf Q., Luqman K., Hadj-Moussa A., Khurshid I. Air/foam drilling coupled with drilling with casing technique enables operator to drill and isolate troublesome section to target depth on multiple wells in Pakistan. *Proceeding of the International Petroleum Technology Conference (IPTC)*. 13–15 January, Dhahran (Kingdom of Saudi Arabia). 2020. 8 p. Paper ID: IPTC-20182-MS. <https://doi.org/10.2523/IPTC-20182-MS>.
6. Djuraev R.U., Toshov J.B., Khatamova D.N. Improving methods of energy-efficient operation of drilling equipment using vortex tubes when drilling wells with air purging. *Technical science and innovation*, 2020. Vol 3. P. 45–54. Article 22. <https://doi.org/10.51346/tstu-01.20.3-77-0086>.
7. Zhu H. Y., Liu Q.Y., Wang T. Reducing the bottom-hole differential pressure by vortex and hydraulic jet methods. *Journal of Vibro-engineering*. 2014. Vol. 8. P. 2224–2249.
8. Xu S., Wang J., Cai B., Cheng H., Ji B., Zhang Z., Long X. Investigation on cavitation initiation in jet pump cavitation reactors with special emphasis on two mechanisms of cavitation initiation. *Physics of Fluids*. 2022. Vol. 34. No. 1. 12 p. <https://doi.org/10.1063/5.0075099>.
9. Panevnyk D.A. Simulation of a downhole jet-vortex pump's working process. *Nafta-Gaz*. 2021. Vol. 9. P. 579–586. <https://doi.org/10.18668/NG.2021.09.02>.
10. Kryzhanivskyi E.I., Panevnyk D.A., Improving use efficiency above-bit jet pumps, *Socar proceeding*. 2020. Vol. 2. P.112–118. <http://doi.org/10.5510/OGP20200200437>.
11. Chen X., Cao T., Yu K., Gao D., Yang J., Wei H. Numerical and experimental investigation on the depressurization capacity of a new type of depressuredominated jet mill bit. *Petroleum Science*. 2020. Vol. 17. P.1602–1615. <https://doi.org/10.1007/s12182-020-00472-8>.
12. Sheha A.A., Nasr M., Hosien M.A., Wahba E.M. Computational and Experimental Study on the Water-Jet Pump Performance. *Journal of Applied Fluid Mechanics*. 2018. Vol. 11. No. 4. P. 1013-1020. <https://doi.org/10.29252/jafm.11.04.28407>.
13. Murillo W.O., Palacio-Fernandez J.A., Arcila I.D., Monsalve J.S., Isaza J.A. Analysis of a Jet Pump Performance under Different Primary Nozzle Positions and Inlet Pressures using two Approaches: One Dimensional Analytical Model and Three Dimensional CFD Simulations. *Journal of Applied and Computational Mechanics*. 2020. Vol. 6. No. SI. P. 1228-1244. <https://doi.org/10.22055/JACM.2020.33339.2205>.
14. Panevnyk D.O. Using the complex potential of a plane-radial flow to simulate the working process of a downhole jet pump. *Scientific bulletin ivano-frankivsk national technical university of oil and gas*. 2022. No 1(52). P. 42–49. [https://doi.org/10.31471/1993-9965-2022-1\(52\)-42-49](https://doi.org/10.31471/1993-9965-2022-1(52)-42-49). [in Ukrainian]