

Модельне дослідження асиметричної обертальної течії в проточній частині свердловинного струминного насоса

Д.О. Паневник¹

Received: 18 March 2023 / Revised: 1 April 2023 / Accepted: 10 April 2023

Анотація. З метою підвищення достовірності моделювання робочого процесу наддолотного струминного насоса за наявності відносного радіального зміщення елементів ежекційної системи розроблено метод моделювання циркуляційного інжектованого потоку за допомогою гідродинамічної вихрової функції, центр якої зміщений відносно осі камери змішування струминного насоса. В процесі моделювання обертального асиметричного руху інжектованого потоку використано поняття циркуляції вектора поступальної швидкості руху рідини по замкненому контуру. За допомогою складових комплексного потенціалу гідродинамічної циркуляційної функції отримана графічна інтерпретація еквіпотенціальних ліній та ліній течії просторового вихору із одностороннім та двостороннім зміщенням центру координат. Використовуючи аналітичні співвідношення для потенціалу швидкості і функції течії визначені компоненти циркуляційної швидкості та доведена аналітичність функції комплексного потенціалу із зміщеним центром вихору. Виконання умов Коши-Римана дозволило представити результуючу швидкість циркуляційної течії із зміщеним вздовж вертикальної осі центром координат у вигляді часткової похідної комплексного потенціалу. На відміну від комплексного потенціалу для симетричного вихору співвідношення для визначення циркуляційної швидкості у разі неспіввідності робочої насадки та камери змішування струминного насоса містить додаткову складову у вигляді величини зміщення центру вихору. В процесі аналізу результатів використання запропонованої математичної моделі встановлено, що результуюча швидкість циркуляційної течії та величина відносного зміщення центру координат просторового вихору зв'язані прямопропорційною залежністю. Проведеними дослідженнями доведено, що співвідношення швидкостей симетричної та асиметричної циркуляційної течії є функцією величини зміщення центру координат вихорового потоку та змінюється від 1 до нуля. Величина відносної швидкості циркуляційної течії обернено пропорційно залежить від зміщення центру координат та відстані до камери змішування струминного насоса. Розроблена математична модель може використовуватись для прогнозування впливу обертання ежекційної системи на її напірну характеристику у випадку радіального відносного зміщення робочої насадки та камери змішування струминного насоса.

Ключові слова: ежекційна система, обертання струминного насоса, потенціальні потоки, комплексний потенціал, еквіпотенціальні поверхні, лінія течії, асиметрична вихрова функція.

Вступ

Успішне проведення бурових робіт значною мірою визначається рівнем розвитку та технологією використання нетрадиційних видів обладнання, яке дає змогу підвищити ефективність будівництва експлуатаційних нафтогазових свердловин в складних геолого-технічних умовах. Впровадження в практику буріння

ежекційних технологій сприяє збереженню природної проникності продуктивного горизонту та зростанню нафтовіддачі свердловин. Високоєфективний вплив на продуктивний горизонт досягається застосуванням наддолотних струминних насосів, які створюють область низького тиску на вибої та забезпечують покращення фільтраційних властивостей пласта-колектора упродовж наступного терміну його експлуатації.

Свердловинні струминні апарати досить широко використовують у багатьох процесах, пов'язаних з бурінням та експлуатацією свердловин, зокрема для очищення вибою від бурового шламу, виклику припливу пластової рідини та під час реалізації деяких спеціальних технологій. Прогнозування режиму роботи стру-

✉ Д.О. Паневник
den.panevnik@gmail.com

¹ Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ, Україна

минного апарата дає можливість підвищити ефективність його використання за рахунок експлуатації в оптимальному робочому діапазоні зміни його характеристик. Характеристики ежекційної системи при цьому можна визначати аналітично на основі математичної моделі робочого процесу струминного апарата. Недоліком сучасних методів визначення режиму роботи свердловинної ежекційної системи є недостатня точність прогнозування параметрів її експлуатації при реалізації окремих технологічних процесів розробки нафтогазових родовищ, що значною мірою пов'язано із складністю процесів змішування потоків в проточній частині струминного насоса. Нова постановка задачі та залучення при побудові математичної моделі додаткового вихідного матеріалу дозволяють підвищити вірогідність та ступінь узгодження з практичними результатами аналітичного методу визначення режимних параметрів свердловинної ежекційної системи.

Науковцями університетів China University of Petroleum та University of Louisiana at Lafayette [1] на основі використання закону збереження енергії отримано аналітичні залежності для визначення напірної та енергетичної характеристики наддолотного струминного насоса напірно-всмоктувального типу. Дослідженням робочого процесу струминного насоса за допомогою даних аналітичних співвідношень встановлено, що оптимальне значення коефіцієнта інжекції ежекційної компоновки дорівнює одиниці. Компанія Blade Energy Partners [2] розробила математичну модель робочого процесу наддолотної ежекційної системи, що складається з декількох концентричних напірно-всмоктувальних струминних насосів, із залученням класичних рівнянь Бернуллі, Дарсі-Вейсбаха та суцільності змішуваних потоків. Промислове підтвердження розробленої на основі класичних законів гідромеханіки методики визначення характеристик наддолотного струминного насоса дає змогу рекомендувати її використання для обґрунтування вибору режимів експлуатації вибієних компоновок призначених для “збалансованого” буріння. В процесі обґрунтування механізму зниження тиску на вибої в університеті Southwest Petroleum University [3] запропонована математична модель робочого процесу свердловинних струминних насосів, яка для визначення гідродинамічних параметрів змішуваних потоків застосовує диференціальні рівняння руху рідини в окремих елементах ежекційної системи. Доповнення останньої математичної моделі елементами теорії гвинтових потоків [4], [5] дозволило поширити її використання на ежекційні системи з асиметрично розміщеними струминними насосами. Диференціальні рівняння в часткових похідних застосовуються також для опису робочого процесу наддолотних ежекторів, які застосовують при продувці свердловин. При застосуванні системи диференціальних рівнянь в часткових похідних в методиці університету China University of Petroleum [6] встановлено, що максимальний коефіцієнт корисної дії ежектора відпо-

відає діаметру робочої насадки 11 мм та куту її нахилу 30° . Для розв'язку системи диференціальних рівнянь в часткових похідних, зазвичай, застосовують числові методи та комп'ютерні програми для їх реалізації [7]. Використовуючи систему диференціальних рівнянь Нав'є-Стокса компанія China Limited встановила, що оптимальне співвідношення діаметрів робочої насадки та камери змішування становить 0,15. Застосування закону збереження кількості руху рідини дозволило обґрунтувати механізм закручування змішуваних потоків в проточній частині струминного насоса [8]. У випадку використання двоконтурних [9] та триконтурних [10] струминних насосів традиційні рівняння гідродинаміки доповнюються рівняннями балансу витрат та втрат напору в елементах кільцевих гідравлічних систем. Аналізом конструкцій свердловинних ежекційних систем встановлено, що за орієнтацією в свердловині струминні насоси можна поділити на дві групи: з симетричним та асиметричним розміщенням в свердловині. Необхідність введення даної класифікаційної ознаки пов'язана із значним впливом орієнтації струминного насоса в свердловині на радіальний розподіл швидкостей в його проточній частині і на характеристики ежекційної системи.

Сучасні математичні моделі робочого процесу наддолотних ежекційних систем не враховують наявність циркуляційних течій викликаних обертанням струминного насоса в свердловині. В роботі [11] на основі використання комплексного потенціалу вихрової функції запропонована математична модель робочого процесу струминного насоса для умов його симетричного обертання в свердловині. Ексцентричне розміщення струминного насоса в свердловині відповідає асиметричній епюрі швидкостей в характерних перерізах струминного насоса, що необхідно врахувати при моделюванні його робочого процесу. Незважаючи на стиснені умови використання вибієної компоновки конструкції сучасних ежекційних систем допускають значний ексцентриситет розміщення струминного насоса в свердловині. Згадана обставина вимагає удосконалення сучасних математичних моделей робочого процесу струминного насоса за умови його асиметричного розміщення в свердловині.

Мета роботи

Метою роботи є підвищення достовірності моделювання робочого процесу наддолотного струминного насоса за наявності відносного радіального зміщення елементів ежекційної системи за рахунок використання асиметричної гідродинамічної вихрової функції.

Поставлена мета передбачає виконання наступних завдань досліджень:

- розроблення математичної моделі циркуляційної течії в проточній частині наддолотного струминного насоса за наявності відносного радіального зміщення елементів ежекційної системи;

- встановлення характеру залежності результуючої швидкості циркуляційної течії від величини відносного зміщення центру координат просторового вихору;
- визначення діапазону зміни співвідношення швидкостей симетричної та асиметричної циркуляційної течії залежно від величини зміщення центру координат вихорового потоку;
- визначення впливу величини зміщення центру координат та відстані до камери змішування струминного насоса від відносної швидкості циркуляційної течії.

Алгоритм реалізації поставлених завдань досліджень передбачає встановлення вигляду аналітичної функції для визначення результуючої швидкості асиметричної циркуляційної течії та дослідження впливу величини зміщення центру вихору на кінематичні характеристики інжектованого потоку.

Розроблення математичної моделі робочого процесу свердловинного струминного насоса

В роботі [11] розроблено метод моделювання інжектованого потоку свердловинної ежекційної системи за допомогою гідродинамічної функції, центр якої розміщений на одній осі з камерою змішування струминного насоса. Рівняння комплексного потенціалу для даної функції має вигляд:

$$W(z) = -\frac{\Gamma}{2\pi} i \ln z \quad (1)$$

де Γ – циркуляція вектора поступальної швидкості руху рідини по замкненому контуру;

i – уявна одиниця ($i^2 = -1$);

z – комплексна змінна.

Визначимо вигляд функції циркуляційної течії для випадку зміщеної відносно осі свердловини камери змішування струминного насоса. Враховуючи, що функції $\varphi(x, y)$, $\psi(x, y)$ задовольняють умовам Коші-Рімана комплексна величина $w(z) = \varphi(x, y) + i\psi(x, y)$ є функцією однієї комплексної змінної Z . Якщо вихор знаходиться в точці з комплексною координатою $z_0 = x_0 + iy$, а кінець вектора даного комплексного числа знаходиться в точці з комплексною координатою $z = x + iy$, то цьому вектору буде відповідати комплексне число, яке дорівнює різниці комплексних координат початку та кінця даного вектора. Тоді для плоского вихору із зміщеним центром координат можна записати:

$$W(z) = -\frac{\Gamma}{2\pi} i \ln(z - z_0) \quad (2)$$

де z – комплексна координата, яка відповідає симетричному вихору;

z_0 – комплексна координата, яка відповідає зміщеному вихору.

Використовуючи показову форму комплексного числа запишемо очевидні перетворення

$$\begin{aligned} W &= ia \ln(z - z_0) = ia \ln(re^{i\theta} - r_0 e^{i\theta}) = ia \ln(r - r_0) e^{i\theta} = \\ &= ia \ln(r - r_0) + ia \ln e^{i\theta} = ia \ln(r - r_0) + iai\theta = \\ &= ai \ln(r - r_0) - a\theta \end{aligned} \quad (3)$$

де a – постійна величина, $a = -\Gamma / 2\pi$;

θ – полярний кут точки, яка знаходиться в полі вихору; r, r_0 – модуль функції комплексної змінної центрального та зміщеного вихору.

Після переходу від полярних координат до декартових:

$$\theta = \arctg \frac{y - y_0}{x - x_0}; \quad r - r_0 = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} \quad (4)$$

отримаємо рівняння для визначення функції плоского вихору із зміщеним центром координат:

$$\varphi = -a \times \arctg \frac{y - y_0}{x - x_0}; \quad \psi = a \ln \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} \quad (5)$$

Враховуючи вигляд рівнянь (4) визначимо структуру складових комплексного числа, яке визначає просторовий вихор із зміщеним центром координат. Використовуючи рівняння [11]:

$$\varphi = \frac{\Gamma}{4\pi} \int d\theta = \frac{\Gamma}{4\pi} \theta = \frac{\Gamma}{4\pi} \arctg \frac{r}{z} \quad (6)$$

$$\psi = -\frac{\Gamma}{4\pi} \sqrt{z^2 + r^2} \quad (7)$$

запишемо формули для визначення складових комплексного потенціалу просторової функції вихору із зміщеним центром координат:

$$\varphi = \frac{\Gamma}{4\pi} \arctg \frac{r - r_0}{z - z_0}; \quad (8)$$

$$\psi = -\frac{\Gamma}{4\pi} \sqrt{(z - z_0)^2 + (r - r_0)^2} \quad (9)$$

Враховуючи рівняння (8), (9) визначимо вигляд еквіпотенціальних ліній та ліній течії в циліндричних координатах, вважаючи потік осесиметричним. Функцію потенціалу швидкостей (рівняння (8)) перепишемо у вигляді:

$$\theta = \frac{4\pi\varphi}{\Gamma} \quad (10)$$

Пряма O_1A на графіку рис. 1а визначає еквіпотенціальну лінію циркуляційної течії в полярних координатах.

Переходячи до декартових координат запишемо:

$$\arctg \frac{r - r_0}{z - z_0} = \frac{4\pi\varphi}{\Gamma} \quad (11)$$

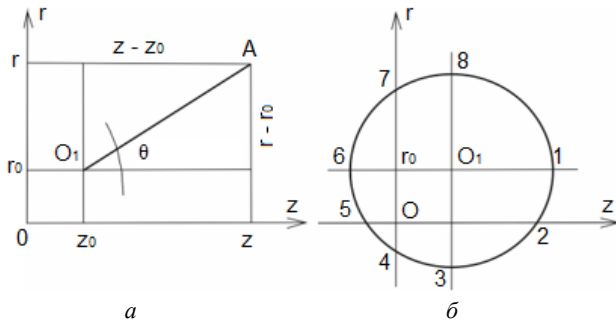


Рис. 1. Еквіпотенціальні лінії (а) та лінії течії (б) просторового вихору із двостороннім зміщенням центру координат

Точка O₁ з координатами відповідає зміщеному центру просторового вихору. Для побудови лінії течії просторового вихору перетворимо рівняння (9) до вигляду:

$$z - z_0 = \sqrt{\frac{16\pi^2\Psi^2}{\Gamma^2} - (r - r_0)^2}; \quad (12)$$

$$r - r_0 = \sqrt{\frac{16\pi^2\Psi^2}{\Gamma^2} - (z - z_0)^2} \quad (13)$$

Лінія течії просторового вихору (рис. 1б) має вигляд кола із зміщеним центром координат. Визначимо координати характерних точок лінії течії в координатах rOz. Для точки 1 після підстановки в рівняння (12) значень r = r₀ запишемо:

$$z = z_0 + \frac{4\pi\Psi}{\Gamma} \quad (14)$$

Аналогічний вираз отримаємо для координати z точки б:

$$z = z_0 - \frac{4\pi\Psi}{\Gamma} \quad (15)$$

Координату z для точок 2, 5 отримаємо після підстановки в рівняння значень r = 0 :

$$\text{точка 2: } z = z_0 + \sqrt{\frac{16\pi^2\Psi^2}{\Gamma^2} - r_0^2}; \quad (16)$$

$$\text{точка 5: } z = z_0 - \sqrt{\frac{16\pi^2\Psi^2}{\Gamma^2} - r_0^2} \quad (17)$$

Координати точок 3, 4, 7, 8 визначаємо з рівняння (13). Після підстановки в рівняння (13) значень z = z₀ отримаємо:

$$r = r_0 \pm \frac{4\pi\Psi}{\Gamma}, \quad (18)$$

де знак “+” відповідає точці 8, а знак “-” точці 3. Після підстановки в рівняння (13) значень z = 0 запишемо:

$$r = r_0 \pm \sqrt{\frac{16\pi^2\Psi^2}{\Gamma^2} - z_0^2} \quad (19)$$

Аналіз рис. 1 та рівнянь (10), (12), (13) дозволяє визначити характер зміщення центру координат просторового вихору, який може мати місце в струминних насосах. Зміщення центру вихору в горизонтальному напрямку (в площині рис. 1) відповідає зміні відстані до камери змішування струминного насоса l_p. Координата z₀, таким чином, для струминного насоса враховується величиною l_p = z і в рівняннях (8), (9) можна приймати z₀ = 0. Зміщення центру вихору в напрямку осі z відбувається в площині, паралельній вхідному перерізу камери змішування. Даний випадок відповідає зміщенню проточної частини струминного насоса відносно осі бурильної колони. Рівняння комплексного потенціалу, таким чином, повинне містити величину r₀, якщо струминний насос розміщений в свердловині ексцентрично.

Рівняння функцій потенціалу швидкостей та течії (формули (8), (9) у випадку зміщення центру вихору виключно в напрямку осі r мають вигляд^

$$\varphi = \frac{\Gamma}{4\pi} \theta = \frac{\Gamma}{4\pi} \arctg \frac{r - r_0}{z}; \quad (20)$$

$$\Psi = -\frac{\Gamma}{4\pi} \sqrt{z^2 + (r - r_0)^2} \quad (21)$$

Рівняння еквіпотенціальної лінії враховуючи рівняння (20) має вигляд:

$$\theta = \arctg \frac{r - r_0}{z} = \frac{4\pi\varphi}{\Gamma} \quad (22)$$

Еквіпотенціальна лінія для вихору з одностороннім зміщенням показана на рис. 2а.

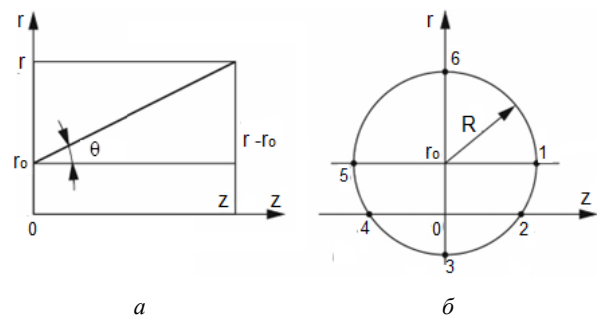


Рис. 2. Еквіпотенціальні лінії (а) та лінії течії (б) просторового вихору із одностороннім зміщенням його центру

Для поверхонь лінії течії використовуючи рівняння (21) запишемо:

$$z = \sqrt{\frac{16\pi^2\Psi^2}{\Gamma^2} - (r - r_0)^2} \quad (23)$$

Координати точок 1, 5 відповідають співвідношенню $r = r_0$ і становлять:

$$z = \pm \frac{4\pi\Psi}{\Gamma}, \quad (24)$$

де знак “+” відповідає точці 1, а знак “-” точці 5.

Координати точок 2, 4 визначаємо шляхом здійснення підстановки:

$$z = \pm \sqrt{\frac{16\pi^2\Psi^2}{\Gamma^2} - r_0^2}, \quad (25)$$

де знак “+” відповідає точці 2, а знак “-” точці 4.

Перепишемо рівняння (23) у вигляді:

$$r - r_0 = \sqrt{\frac{16\pi^2\Psi^2}{\Gamma^2} - z^2}. \quad (26)$$

Значення координати $z = 0$ визначає положення точок 3, 6. Після підстановки в рівняння (26) значення $z = 0$ отримуємо:

$$r = r_0 \pm \frac{4\pi\Psi}{\Gamma}, \quad (27)$$

де знак “+” визначає координату точки 6, а знак “-” координату точки 3.

Радіус кола, описаного лінією течії відповідно до рис. 2б визначається співвідношенням:

$$R = \sqrt{z^2 + (r - r_0)^2}. \quad (28)$$

Дослідження математичної моделі робочого процесу свердловинного струминного насоса

Перевіримо умови аналітичності комплексної функції змінного просторового вихору. Визначимо компоненти циркуляційної швидкості використовуючи рівняння потенціалу швидкості (формула (20) та функції течії (формула (21):

$$\begin{aligned} V_z &= \frac{\partial\phi}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \frac{\Gamma}{4\pi} \left(\operatorname{arctg} \frac{r-r_0}{z} \right) = \frac{\Gamma}{4\pi} \frac{\partial}{\partial z} \operatorname{arctg} \frac{r-r_0}{z} = \\ &= \frac{\Gamma}{4\pi} \left(\operatorname{arctg} \frac{r-r_0}{z} \right)' \left(\frac{r-r_0}{z} \right)' = \frac{\Gamma}{4\pi} \frac{1}{1 + \left(\frac{r-r_0}{z} \right)^2} \frac{-(r-r_0)}{z^2} = \\ &= -\frac{\Gamma}{4\pi} \frac{r-r_0}{z^2 + (r-r_0)^2}; \end{aligned} \quad (29)$$

$$\begin{aligned} V_r &= \frac{\partial\phi}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial r} \frac{\Gamma}{4\pi} \operatorname{arctg} \frac{r-r_0}{z} = \frac{\Gamma}{4\pi} \frac{\partial}{\partial r} \operatorname{arctg} \frac{r-r_0}{z} = \\ &= \frac{\Gamma}{4\pi} \left(\operatorname{arctg} \frac{r-r_0}{z} \right)' \left(\frac{r-r_0}{z} \right)' = \frac{\Gamma}{4\pi} \frac{1}{1 + \left(\frac{r-r_0}{z} \right)^2} \frac{1}{z} = \frac{\Gamma}{4\pi} \frac{z}{z^2 + (r-r_0)^2} \end{aligned} \quad (30)$$

$$\begin{aligned} V_z &= \frac{1}{R} \frac{\partial\Psi}{\partial r} = \frac{1}{\sqrt{z^2 + (r-r_0)^2}} \frac{\partial}{\partial r} \left(-\frac{\Gamma}{4\pi} \sqrt{z^2 + (r-r_0)^2} \right) = \\ &= -\frac{\Gamma}{4\pi} \frac{r-r_0}{\sqrt{z^2 + (r-r_0)^2}} \frac{\partial}{\partial r} \sqrt{z^2 + (r-r_0)^2} = \\ &= \frac{\Gamma}{4\pi \sqrt{z^2 + (r-r_0)^2}} \left(\frac{1}{2} (z^2 + (r-r_0)^2)^{-\frac{1}{2}} 2(r-r_0) \right) = \\ &= -\frac{\Gamma}{4\pi} \frac{r-r_0}{z^2 + (r-r_0)^2} \end{aligned} \quad (31)$$

$$\begin{aligned} V_r &= -\frac{1}{R} \frac{\partial\Psi}{\partial z} = -\frac{1}{\sqrt{z^2 + (r-r_0)^2}} \frac{\partial}{\partial z} \left(-\frac{\Gamma}{4\pi} \sqrt{z^2 + (r-r_0)^2} \right) = \\ &= \frac{\Gamma}{4\pi} \frac{1}{\sqrt{z^2 + (r-r_0)^2}} \frac{\partial}{\partial z} \sqrt{z^2 + (r-r_0)^2} = \frac{\Gamma}{4\pi} \frac{1}{\sqrt{z^2 + (r-r_0)^2}} \times \\ &\times \frac{1}{2} (z^2 + (r-r_0)^2)^{-0,5} \times 2z = \frac{\Gamma}{4\pi} \frac{z}{z^2 + (r-r_0)^2} \end{aligned} \quad (32)$$

Рівність компонентів швидкості визначених за формулами (29), (31) та (30), (32) свідчить про виконання умов Коші-Рімана, тобто про аналітичність функції комплексного потенціалу із зміщеним центром вихору. Тоді результуюча швидкість циркуляційної течії із зміщеним вздовж вертикальної осі центром координат може бути визначена за формулою:

$$V = \left| \frac{\partial w}{\partial z} \right| = \sqrt{V_z^2 + V_r^2} = \frac{\Gamma}{4\pi} \frac{1}{\sqrt{z^2 + (r-r_0)^2}} \quad (33)$$

У випадку симетричного вихору остання формула має вигляд [11]:

$$V = \left| \frac{\partial w}{\partial z} \right| = \sqrt{V_z^2 + V_r^2} = \frac{\Gamma}{4\pi} \frac{1}{\sqrt{z^2 + r^2}} \quad (34)$$

Проаналізуємо характер залежності швидкості циркуляційної течії від величини зміщення центру вихору. Значення максимальної швидкості циркуляційного потоку, яке відповідає величині координати $r = 0$ у випадку нульового зміщення центру координат визначимо за формулою (34). Після підстановки координати $r = 0$ отримуємо:

$$V = \frac{\Gamma}{4\pi z} \quad (35)$$

У випадку зміщення центру координат аналогічну формулу отримуємо шляхом підстановки в рівняння (33):

$$V' = \frac{\Gamma}{4\pi \sqrt{z^2 + r_0^2}} \quad (36)$$

З метою визначення впливу величини зміщення центру вихору на значення циркуляційної швидкості

використовуючи рівняння (35), (36) запишемо співвідношення:

$$\frac{V'}{V} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{r_0}{z}\right)^2}} \quad (37)$$

Аналіз рівняння (37) свідчить про те, що визначене співвідношення швидкостей змінюється від $V'/V = 1$, коли $r = 0$ до $V'/V = 0$, коли $r_0 = \infty$.

Для побудови графічної залежності рівняння (37) запишемо у вигляді:

$$\bar{V} = \frac{V'}{V} = \frac{1}{\sqrt{1 + (\varepsilon/l)^2}} \quad (38)$$

де ε – відносне зміщення центру вихору;

l – відносна відстань між центром вихору та камерою змішування.

Безрозмірні параметри визначаються співвідношеннями

$$\varepsilon = \frac{r_0}{r_p}; \quad l = \frac{z}{r_p} \quad (39)$$

де r_p – радіус робочої насадки.

Відповідно до побудованої за рівнянням (38) залежності відносна швидкість циркуляційної течії (рис. 3) обернено пропорційна зміщенню центру координат.

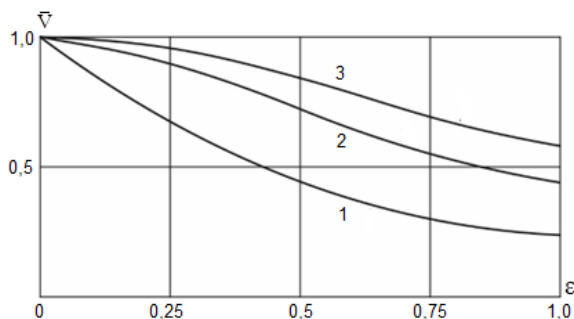


Рис. 3. Залежність максимальної циркуляційної швидкості від величини зміщення центру вихору для різних відстаней до камери змішування: 1 – 0,25; 2 – 0,5; 3 – 0,75

Залежність максимальної циркуляційної швидкості від величини зміщення центру вихору має нелінійний характер. У випадку нульового зміщення центру вихору $\varepsilon=0$ величина максимальної швидкості циркуляційної течії приймає граничні значення та визначається рухом симетричної циркуляційної течії. Зростання величини зміщення центру вихору викликає зменшення значень максимальної циркуляційної швидкості. Мінімальна величина циркуляційної швидкості відповідає граничному зміщенню центру вихору $\varepsilon=1$. Зростання відстані до камери змішування струминного насоса зменшує вплив величини зміщення центру вихору на значення циркуляційної швидкості потоку.

Висновки

На основі застосування тривимірної гідродинамічної функції комплексного потенціалу асиметричної вихрової функції розроблена та досліджена математична модель циркуляційної течії в проточній частині надлотного струминного насоса за наявності відносного радіального зміщення елементів ежекційної системи. В процесі проведених досліджень отримані такі нові результати:

– результуюча швидкість циркуляційної течії зростає при збільшенні відносного зміщення центру координат просторового вихору;

– співвідношення швидкостей симетричної та асиметричної циркуляційної течії залежно від величини зміщення центру координат вихрового потоку змінюється від 1 до нуля;

– величина відносної швидкості циркуляційної течії обернено пропорційно залежить від зміщення центру координат та відстані до камери змішування струминного насоса.

Завдання подальших досліджень полягає у вивченні взаємодії радіального та вихрового потоків для умов їх відносного зміщення в проточній частині струминного насоса та розробленні методики визначення характеристики ежекційної системи при її асиметричному обертанні в свердловині.

References

- [1] X. Chen, D. Gao and B. Guo, "A method for optimizing jet-mill-bit hydraulics in horizontal drilling", *SPE Journal*, no. 4, SPE 178436, pp. 416–422, 2016. DOI: 10.2118/178436-PA
- [2] P.V. Suryanarayana, K. Hasan and W.I. Hughes, "Technical Feasibility and Applicability of a concentric jet pump in underbalanced drilling", in: *Proc. of the SPE/IADS Underbalanced Technology Conference and Exhibition*, Houston, Texas, October 11–12 2004, SPE/IADS 91595, 20 p. DOI: 10.2118/91595-MS
- [3] H.Y. Zhu and Q.Y. Liu, "Pressure drawdown mechanism and design principle of jet pump bit", *Scientia Iranica B.*, no. 22(3), pp. 792–803, 2015.
- [4] H.Y. Zhu, Q.Y. Liu and T. Wang, "Reducing the bottom-hole differential pressure by vortex and hydraulic jet methods", *Journal of Vibroengineering*, no. 8. pp. 2224–2249, 2014.

- [5] Zhu H.Y., J.-G. Deng and Z. Jing-Ying, “Vortex methods reducing the bottom-hole differential pressure”, *Journal of Mines, Metals and Fuels*, no. 60(5). pp. 81–90, 2012.
- [6] H. Yong, Z. Lihong, Z. Deyong, L. Hualin, W. Jinying, Y. Jinshen, Z. Yugang Z and W. Zhibin, “Study on structure parameters of reverse circulation drill bit secondary injector device based on injectors coefficient”, in *Proc. of the SPE/IADS Asia Pacific Drilling Technology Conference, Singapore*, August 22–24 2016, IADS/SPE–180539–MS, 9 p. DOI: 10.2118/180539-MS
- [7] X. Chen, T. Cao, K. Yu, D. Gao, J. Yang and H. Wei, “Numerical and experimental investigation on the depressurization capacity of a new type of depressure-dominated jet mill bit”, *Petroleum Science*, no.17, pp. 1602–1615, 2020. DOI:10.1007/s12182-020-00472-8.
- [8] D.A. Panevnyk, “Simulation of a downhole jet-vortex pump’s working process”, *Nafta-Gaz*, no. 9, pp. 579–586, 2021. DOI: 10.18668/NG.2021.09.02.
- [9] M. Wyrostkiewicz and D.A. Panevnyk, “Simulation of the working process of a dual-circuit downhole ejection system” *Nafta-Gaz*, no. 9, pp. 654–661, 2022. DOI: 10.18668/NG.2022.09.02.
- [10] E.I. Kryzhanivskyi and D.A. Panevnyk, “Improving use efficiency above-bit jet pumps”, *Socar proceeding*, no. 2, pp. 26–34, 2020. DOI:10.5510/OGP20200200437.
- [11] D.O. Panevnyk, “Vykorystannia vykhrovoyi funktsii dlia modeliuvannia robochoho protsesu sverdlvynnoho strumynnoho nasosa”, *Rozvidka ta rozrobka naftovykh i hazovykh rodovyshch*, no. 3(84), pp. 24–32, 2022. DOI: 10.31471/1993-9973-2022-3(84)-24-32.

Simulation of asymmetrical rotational flow in the flow part of a well jet pump

D. Panevnik

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine

Abstract. A characteristic feature of the details considered in the article is the increased diameter of the flange. At the Department of Aircraft Production Technology of the Scientific and Educational Mechanical and Mechanical Engineering Institute of the Kyiv Polytechnic Institute named after Igor Sikorsky developed an original technological process for manufacturing products with a developed flange part using the positive effects of the progressive rolling stamping method. The method has energy-strength advantages over traditional methods of manufacturing parts with relatively thin structural elements. The center of application of such technologies is expanding more and more, but the basic technological calculations of process parameters have not yet been introduced widely enough into production practice. The proposed sequence of technological calculations and basic parameters of specialized installations for rolling stamping.

Keywords: orbital stamping, rolling stamping, energy-force parameters, technological process, work balance method, modeling, finite element method.
