

## **МОДЕЛЮВАННЯ КОМПОНЕНТІВ ЗМІШАНОГО ПОТОКУ СВЕРДЛОВИННОГО СТРУМИННОГО НАСОСА**

*Д. О. Паневник*

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

*На основі використання математичного апарату теорії функцій комплексної змінної запропоновано метод моделювання поширення робочого потоку в проточній частині струминного насоса для умов його обертання в свердловині у вигляді поєднання точкового витoku та вихору. Поєднанням часткових розв'язків диференціальних рівнянь руху елементарних радіального та циркуляційного потоків встановлено структуру гідродинамічної функції комплексної змінної комбінованого потоку. Дослідження отриманої характеристичної функції дозволило оцінити вплив зміщення центрів витoku та вихору на характеристики ежекційної системи та врахувати неспіввісність та асиметричне розміщення елементів проточної частини струминного насоса. Швидкість комбінованого потоку, зважаючи на аналітичність функції комплексного потенціалу, визначаємо шляхом її диференціювання. Для симетричного поля швидкостей максимальне значення її горизонтальної складової відповідає осі камери змішування струминного насоса. Збільшення величини одностороннього зміщення вихору викликає зростання швидкості поширення радіально-циркуляційного потоку. Максимальна величина швидкості поширення асиметричного радіально-циркуляційного потоку відповідає односторонньому одночасному зміщенню витoku та вихору в проточній частині струминного насоса. Взаємна конфігурація ліній течії радіального та циркуляційного потоків визначає характер результуючого гідродинамічного поля комбінованого потоку. Лінії течії двовимірного та просторового симетричного радіального потоку визначаються відповідно серією прямих, що проходять через центр координат та сукупністю меридіальних площин. Для вихрового двовимірного та тривимірного симетричного потоків лінії течії визначаються відповідно серією концентричних кіл та сфер з початком координат у центрі витoku. Витрата рідини є постійною вздовж ліній та площин течії і змінюється при переході до сусіднього гідродинамічного елемента. Зважаючи на отриману конфігурацію ліній та площин течії, частинки рідини радіально-циркуляційного потоку рухаються від центру витoku до периферії за плавноміними спіралеподібними траєкторіями.*

**Ключові слова:** свердловинний струминний насос, ежекційна система, потенціальні потоки, гідродинамічні функції, комплексний потенціал, потенціал швидкостей, функція вихоровитoku.

*Based on the use of the mathematical apparatus of the theory of functions of a complex variable, a method of modeling the distribution of the working flow in the flow part of the jet pump for the conditions of its rotation in the well in the form of a combination of point leakage and vortex is proposed. The structure of the hydrodynamic function of the complex variable of the combined flow is established by the combination of partial solutions of the differential equations of motion of the elementary radial and circulation flows. The study of the obtained characteristic function made it possible to evaluate the influence of the displacement of the leakage and vortex centers on the characteristics of the ejection system and to take into account the misalignment and asymmetric placement of the elements of the flow part of the jet pump. Considering the analyticity of the function of the complex potential, we determine the speed of the combined flow by differentiating it. For a symmetric velocity field, the maximum value of its horizontal component corresponds to the axis of the mixing chamber of the jet pump. An increase in the size of the one-sided displacement of the vortex causes an increase in the rate of propagation of the radial circulation flow. The maximum value of the propagation speed of the asymmetric radial circulation flow corresponds to the one-sided simultaneous displacement of the leakage and the vortex in the flow part of the jet pump. The mutual configuration of the flow lines of the radial and circulation flow determines the character of the resulting hydrodynamic field of the combined flow. The streamlines of the two-dimensional and spatially symmetric radial flow are determined, respectively, by a series of straight lines passing through the center of coordinates and a set of meridional planes. For a vortex two-dimensional and three-dimensional symmetric flow, the streamlines are defined, respectively, by a series of concentric circles and spheres with the origin at the center of the outflow. Fluid flow is constant along flow lines and planes but varies when traveling to the next hydrodynamic element. Taking into mind the received flow line and plane configuration, particles of the liquid in the radial circulation flow move from the leak's center to the perimeter along smoothly shifting spiral trajectories.*

**Key words:** well jet pump, ejection system, potential flows, hydrodynamic functions, complex potential, velocity potential, eddy flow function.

## **Вступ**

На сьогоднішній день однією з актуальних проблем у нафтогазовій галузі є створення і тиражування нової техніки та технології збільшення нафтовіддачі пластів. Нафтовидобувні компанії намагаються компенсувати скорочення видобутку вуглеводнів застосуванням обладнання, яке дає змогу суттєво підвищити коефіцієнт нафтовилучення продуктивного горизонту та сприяє подовженню терміну експлуатації малорентабельних або виснажених родовищ. Одним з перспективних напрямків підвищення ефективності розробки покладів вуглеводнів є застосування свердловинних струминних насосів. Перші патенти на струминні насоси для нафтових свердловин були видані в 1860-х роках, однак їх комерційне застосування розпочате наприкінці 1960-х років [1]. Переваги використання нафтогазових ежекційних технологій найбільш повно реалізуються у випадку значного зниження пластового тиску, активного обводнення експлуатаційних свердловин, зростання газового фактору та руйнування присвердловинних зон продуктивного пласта. Струминні насоси мають просту конструкцію, незначні габаритні розміри, здатні використовуватись у викривлених свердловинах, надійні, компактні та стійкі до корозії, високих температур і абразивного зношування. Завдяки цим унікальним якостям дане обладнання знайшло використання в різних галузях промисловості. Застосування струминних насосів при бурінні та експлуатації свердловин дозволяє зберегти природну проникність продуктивного горизонту та зменшити собівартість нафтовилучення на пізній стадії розробки родовища.

Поширення нафтогазових ежекційних технологій обмежується низькою енергетичною ефективністю використання струминного насоса, що пов'язано з особливостями його робочого процесу. Значні гідравлічні втрати, що супроводжують процес змішування потоків у проточній частині струминного насоса зумовлюють низький коефіцієнт корисної дії гідромашини, що має негативний вплив на енергетичну ефективність реалізації ежекційних технологій. Зважаючи на неперервне зростання складності розробки покладів вуглеводнів та необхідність залучення для здійснення виробничих процесів в нафтогазовому комплексі нових нетрадиційних технологій, дослідження спрямовані на підвищення енергетичної ефективності свердловинних струминних насосів є актуальним завданням.

## **Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень і публікацій**

Один із шляхів підвищення енергоефективності робочого процесу струминного насоса полягає у створенні оптимальних умов його експлуатації. Вибір оптимальних режимних параметрів експлуатації ежекційної системи досягається удосконаленням методів прогнозування її характеристик шляхом застосування поширених імітаційних симуляторів і зокрема програмних комплексів SolidWorks [2] та NSYS (США) [3]. Зважаючи на особливості застосування даних продуктів програму SolidWorks більш ефективно застосовувати при реалізації інженерних розрахунків, а програму ANSYS – для проведення наукових досліджень. За необхідності використання об'ємних масивів вихідних даних, що створюють значну кількість можливих комбінацій, кожна з яких потребує виконання окремих розрахункових операцій, застосовують спеціальні прикладні програми. Для створення таких програм, зазвичай, використовують високорівневі мови програмування, наприклад, інтерпретовану об'єктно-орієнтовану мову Python. Найбільш ефективним є використання таких програм в задачах оптимізації робочого процесу струминних насосів на основі вибору оптимальних співвідношень конструкторських та режимних параметрів [4].

Енергетична ефективність струминних насосів може бути підвищена наданням обертового руху змішуваним потокам. Ежекційна система при цьому набуває ознак, характерних відцентровим насосам; профіль швидкостей в камері змішування стає більш наповненим, а продуктивність, напір та коефіцієнт корисної дії зростають [5]. Обертальний рух змішуваних потоків може створюватись розміщенням у проточній частині струминного насоса похило орієнтованих направляючих елементів [6], тангенційним підведенням інжектваного середовища [7] та наданням обертового руху елементам ежекційної системи [8]. Наддолотні струминні насоси обертаються у складі компоновки низу бурильної колони, а для надання обертового руху нафтовим ежекційним системам можуть застосовуватись гідравлічні турбіни [9]. Математична модель струминного насоса з розміщеними в його проточній частині похило орієнтованими направляючими елементами передбачає наявність в структурі рівняння напірної характеристики складових, які визначають додатковий напір, створюваний локальним закручуванням робочого або інжектваного [10] потоку. Використовуючи гідродинамічні функ-

ції комплексної змінної, автором запропоновано математичні моделі потенціального руху радіальної [11] та циркуляційної [12] течій, які дозволяють окремо оцінити відповідно осьовий та круговий рух змішуваних потоків у проточній частині струминного насоса.

**Висвітлення невирішених раніше частин загальної проблеми**

Підвищення енергоефективності застосування струминного насоса шляхом створення оптимальних умов його експлуатації в свердловині вимагає удосконалення математичних моделей прогнозування робочого процесу ежекційної системи. Відомі методи розрахунку характеристик струминного насоса не враховують можливість його обертання в свердловині. Математичні моделі локального закручування робочого середовища не можуть застосовуватись у випадку обертання струминного насоса, оскільки траєкторія руху циркуляційних потоків розміщена в площинах, перпендикулярних до осі свердловини. Запропоновані автором математичні моделі відокремленого потенціального руху радіальної [11] та циркуляційної [12] течій є попереднім етапом моделювання робочого процесу струминного насоса в умовах його обертання в свердловині. Поєднання комплексних потенціалів радіальної та циркуляційної течій в єдиній математичній моделі дає змогу визначити характеристики комбінованого руху потоків в проточній частині струминного насоса, внаслідок чого підвищується ефективність прогнозування оптимального режиму експлуатації свердловинної ежекційної системи.

**Мета та завдання досліджень**

Метою досліджень є моделювання механізму поширення потоку в проточній частині свердловинного струминного насоса із використанням елементарної гідродинамічної радіально-циркуляційної функції комплексної змінної.

Поставлена мета передбачає виконання наступних завдань досліджень:

- визначення вигляду рівняння комплексного потенціалу комбінованого радіально-циркуляційного потоку;
- аналіз кінематичних параметрів поширення радіально-циркуляційного потоку відповідно до отриманої при моделюванні характеристичної функції;
- графічна інтерпретація сукупності ліній течії гідродинамічної сітки радіально-циркуляційного потоку.

**Висвітлення основного матеріалу дослідження**

Визначимо вигляд рівнянь, які характеризують гідродинаміку обертально-поступального руху потоку. Оскільки рівняння Лапласа, яке визначає рух потенціальних потоків, є лінійним, то сума двох його часткових розв'язків також буде розв'язком цього рівняння. Накладання або суперпозиція радіальної та циркуляційної течії шляхом алгебраїчної суми їх комплексних потенціалів дозволяє отримати більш складний радіально-циркуляційний потік – вихоровиток. Функцію вихоровитку  $W(z)_{r-c}$  отримуємо з врахуванням комплексних потенціалів радіальної  $W(z)_r$  та циркуляційної  $W(z)_c$  течій.

В загальному випадку проаналізуємо наступні співвідношення комплексних потенціалів радіального та циркуляційного потоків:

1. Течії з центрами витоку та вихору, розміщеними в початку координат.
2. Для радіальної течії центр витоку співпадає з центром координат, а центр вихору циркуляційної течії зміщений в напрямку вертикальної осі.
3. Центри вихору та витоку мають одностороннє зміщення в напрямку вертикальної осі.

Взаємне зміщення центрів вихору та витоку гідродинамічних функцій дозволяє врахувати неспіввісність робочої насадки та камери змішування внаслідок неякісного виготовлення та асиметричного розміщення деталей струминного насоса.

Визначимо вигляд рівняння комплексного потенціалу для вищезгаданих випадків.

1. Центр вихоровитку розміщений в початку координат.

Для плоскої течії, враховуючи рівняння комплексного потенціалу радіального [11] та циркуляційного [12] потоків, запишемо:

$$\begin{aligned}
 W(z)_{r-c} &= W(z)_r + W(z)_c = \left( \frac{Q}{2\pi} - \frac{\Gamma}{2\pi} \right) \ln z = \\
 &= \varphi_{r-c} + i\psi_{r-c} = (\varphi_r + \varphi_c) + i(\psi_r + \psi_c) = \quad (1) \\
 &= \left( \frac{Q}{2\pi} \ln r + \frac{\Gamma}{2\pi} \theta \right) + i \left( \frac{Q}{2\pi} \theta - \frac{\Gamma}{2\pi} \ln r \right),
 \end{aligned}$$

де  $Q$  – витрата рідини через бокову поверхню кругового циліндра радіусом  $r$  з центром в точці витоку і висотою, що дорівнює одиниці;

$\Gamma$  – циркуляція вектора поступальної швидкості руху рідини по замкненому контуру;  
 $z$  – комплексна змінна;

$\varphi_r, \varphi_c, \varphi_{r-c}$  – потенціал швидкостей радіального, циркуляційного та комбінованого потоків;

$\psi_r, \psi_c, \psi_{r-c}$  – функція течії радіального, циркуляційного та комбінованого потоків;

$i$  – уявна одиниця;

$\theta$  – полярний кут, який визначає положення полярної координати.

Циркуляція вектора поступальної швидкості руху рідини по замкненому контуру  $\Gamma$  дає змогу врахувати частоту обертання елементів свердловинного насоса в свердловині.

Потенціал швидкостей комбінованого потоку  $\varphi_{r-c}$  в рівнянні (1) визначається алгебраїчним сумуванням потенціалу швидкостей радіального [11] та циркуляційного [12] потоків

$$\varphi_{r-c} = \frac{Q}{2\pi} \ln r + \frac{\Gamma}{2\pi} \theta. \quad (2)$$

Функція течії комбінованого потоку  $\psi_{r-c}$  визначається алгебраїчним сумуванням функцій течії радіального та циркуляційного потоків

$$\psi_{r-c} = \frac{Q}{2\pi} \theta - \frac{\Gamma}{2\pi} \ln r. \quad (3)$$

Визначимо вигляд комплексного потенціалу просторового осесиметричного потоку. Потенціал швидкостей просторового радіального та циркуляційного потоку визначається за рівняннями [11], [12]

$$\varphi_r = -\frac{Q}{4\pi} \frac{1}{\sqrt{z^2 + r^2}}; \quad (4)$$

$$\varphi_c = \frac{\Gamma}{4\pi} \operatorname{arctg} \frac{r}{z}. \quad (5)$$

Шляхом сумування вищезгаданих рівнянь отримаємо формулу для визначення потенціалу швидкостей просторового вихоровиток:

$$\varphi_{r-c} = -\frac{Q}{4\pi} \frac{1}{\sqrt{z^2 + r^2}} + \frac{\Gamma}{4\pi} \operatorname{arctg} \frac{r}{z}. \quad (6)$$

Функція течії просторового радіального та циркуляційного потоку визначається рівняннями [11], [12]

$$\psi_r = -\frac{Q}{4\pi} \frac{z}{\sqrt{z^2 + r^2}}; \quad (7)$$

$$\psi_c = -\frac{\Gamma}{4\pi} \sqrt{z^2 + r^2}. \quad (8)$$

Функцію течії просторового комбінованого радіально-циркуляційного потоку визначаємо сумуванням рівнянь (7), (8)

$$\psi_{r-c} = -\frac{Q}{4\pi} \frac{z}{\sqrt{z^2 + r^2}} - \frac{\Gamma}{4\pi} \sqrt{z^2 + r^2}. \quad (9)$$

Враховуючи рівняння (6), (9) отримаємо рівняння комплексного потенціалу комбінова-

ного просторового радіально-циркуляційного потоку

$$W(z)_{r-c} = \left( -\frac{Q}{4\pi} \frac{1}{\sqrt{z^2 + r^2}} + \frac{\Gamma}{4\pi} \operatorname{arctg} \frac{r}{z} \right) - i \left( \frac{Q}{4\pi} \frac{z}{\sqrt{z^2 + r^2}} + \frac{\Gamma}{4\pi} \sqrt{z^2 + r^2} \right). \quad (10)$$

Отримане рівняння характеристичної функції дозволяє оцінити вплив величини витрати потоку в проточній частині струминного насоса та частоту його обертання в свердловині.

2. Радіально-циркуляційний потік з одностороннім зміщенням вихору.

Для комбінованого потенціалу швидкостей просторового потоку, враховуючи рівняння потенціалу швидкостей радіальної та циркуляційної течії запишемо:

$$\varphi_{r-c} = -\frac{Q}{4\pi} \frac{1}{\sqrt{z^2 + r^2}} + \frac{\Gamma}{4\pi} \operatorname{arctg} \frac{r-r_0}{z}, \quad (11)$$

де  $r_0$  – зміщення вихорового елемента.

Функцію течії визначаємо, використовуючи рівняння:

$$\psi_{r-c} = -\frac{Q}{4\pi} \frac{z}{\sqrt{z^2 + r^2}} - \frac{\Gamma}{4\pi} \sqrt{z^2 + (r-r_0)^2}. \quad (12)$$

Рівняння комплексного потенціалу отримаємо, використовуючи формули (11), (12)

$$W(z)_{r-c} = \left( -\frac{Q}{4\pi} \frac{1}{\sqrt{z^2 + r^2}} + \frac{\Gamma}{4\pi} \operatorname{arctg} \frac{r-r_0}{z} \right) - i \left( \frac{Q}{4\pi} \frac{z}{\sqrt{z^2 + r^2}} + \frac{\Gamma}{4\pi} \sqrt{z^2 + (r-r_0)^2} \right). \quad (13)$$

3. Радіально-циркуляційний потік із одночасним зміщенням витоків та вихору.

Потенціал швидкостей просторової течії із зміщенням витоків та вихором отримаємо з використанням рівнянь:

$$\varphi_r = -\frac{Q}{4\pi} \frac{1}{\sqrt{z^2 + (r-r_0)^2}}; \quad (14)$$

$$\varphi_c = \frac{\Gamma}{4\pi} \operatorname{arctg} \frac{r-r_0}{z}. \quad (15)$$

Для визначення комбінованого потенціалу просторової течії необхідно просумувати значення потенціалів радіального та циркуляційного потоків

$$\varphi_{r-c} = -\frac{Q}{4\pi} \frac{1}{\sqrt{z^2 + (r \pm r_0')^2}} + \frac{\Gamma}{4\pi} \operatorname{arctg} \frac{r-r_0''}{z}, \quad (16)$$

де  $r_0', r_0''$  – зміщення витоків та вихору відповідно.

Знак «-» перед величиною зміщення витоку  $r'_0$  (в рівнянні (16)) відповідає зміщенню витоку та вихору в одному напрямку відносно осі  $z$ , а знак «+» – в протилежних напрямках, тобто вісь  $z$  знаходиться між центрами витоку та вихору. В загальному випадку виконується співвідношення  $r'_0 \neq r''_0$ .

Функцію просторової течії визначаємо алгебраїчним сумуванням рівнянь для радіально-циркуляційного потоку

$$\psi_{r-c} = -\frac{Q}{4\pi} \frac{z}{\sqrt{z^2 + (r \pm r'_0)^2}} - \frac{\Gamma}{4\pi} \sqrt{z^2 + (r - r''_0)^2} \quad (17)$$

Тоді рівняння комплексного потенціалу матиме вигляд

$$W(z)_{r-c} = \left[ -\frac{Q}{4\pi} \frac{1}{\sqrt{z^2 + (r \pm r'_0)^2}} + \frac{\Gamma}{4\pi} \operatorname{arctg} \frac{r - r''_0}{z} \right] - i \left[ \frac{Q}{4\pi} \frac{z}{\sqrt{z^2 + (r \pm r'_0)^2}} + \frac{\Gamma}{4\pi} \sqrt{z^2 + (r - r''_0)^2} \right] \quad (18)$$

Визначимо вигляд рівнянь для розрахунку кінематичних параметрів радіально-циркуляційного потоку. Швидкість комбінованого потоку визначаємо шляхом диференціювання функції комплексного потенціалу. Аналогічний результат може бути досягнутий шляхом сумування рівнянь швидкостей радіального [11] та циркуляційного [12] потоків. Якщо центр вихорівитоку розміщений в початку координат отримаємо

$$\frac{\partial W(z)_{r-c}}{\partial z} = \frac{Q}{4\pi} \frac{1}{z^2 + r^2} + \frac{\Gamma}{4\pi} \frac{1}{\sqrt{z^2 + r^2}} \quad (19)$$

Необхідно відзначити, що циркуляція  $\Gamma$  вектора поступальної швидкості руху рідини по замкненому контуру прямопропорційно залежить від кутової швидкості обертання потоку. Таким чином, відповідно до рівняння (19) швидкість поширення радіально-циркуляційного потоку зростає зі збільшенням витрати потоку та частоти обертання струминного насоса. Максимальне значення горизонтальної складової швидкості потоку має місце на осі камери змішування.

Швидкість результуючого потоку у випадку одностороннього зміщення вихору визначаємо за формулою

$$\frac{\partial W(z)_{r-c}}{\partial z} = \frac{Q}{4\pi} \frac{1}{z^2 + r^2} + \frac{\Gamma}{4\pi} \frac{1}{\sqrt{z^2 + (r - r_0)^2}} \quad (20)$$

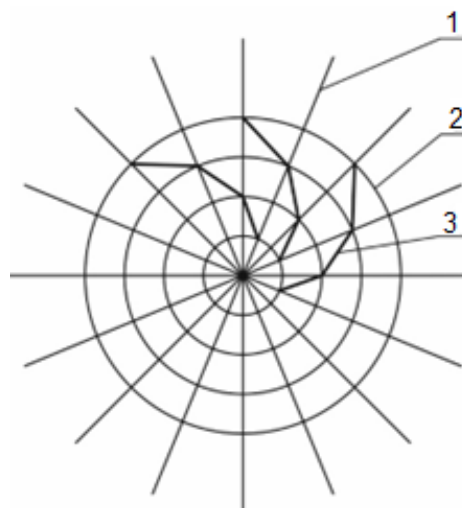
У випадку нульового зміщення вихору  $r_0 = 0$  останній вираз перетворюється на рівняння (19). Зважаючи на отримане рівняння збільшення величини зміщення вихору  $r_0$  викликає зростання швидкості поширення радіально-циркуляційного потоку.

Швидкість асиметричного радіально-циркуляційного потоку у випадку одночасного зміщення витоку та вихору враховуючи рівняння (18) визначаємо за формулою

$$\frac{\partial W(z)_{r-c}}{\partial z} = \frac{Q}{4\pi} \frac{1}{z^2 + (r \pm r'_0)^2} + \frac{\Gamma}{4\pi} \frac{1}{\sqrt{z^2 + (r - r''_0)^2}} \quad (21)$$

Проаналізувавши останнє рівняння, можна зробити висновок, що максимальна величина швидкості поширення радіально-циркуляційного потоку відповідає знаку «-» перед величиною зміщення витоку  $r'_0$ , тобто коли витік та вихор зміщені в одному напрямку.

Результуюче гідродинамічне поле комбінованого потоку визначається взаємною конфігурацією ліній течії радіального та циркуляційного потоку. Сукупність ліній течії робочого середовища розглянемо на прикладі симетричного радіально-циркуляційного потоку (рис. 1).



**Рисунок 1 – Лінії течії радіального (1), циркуляційного (2) та радіально-циркуляційного (3) потоків**

Витрата рідини є постійною вздовж ліній течії і змінюється при переході до сусідньої лінії. Лінії течії двовимірного та просторового радіального потоку визначаються серією прямих, що проходять через центр координат та сукупністю меридіальних площин. Для циркуляційного двовимірного та просторового потоку

ку лінії течії визначаються серією концентричних кіл та сфер з початком координат у центрі витоку. Лінії течії 1, 2 та 3 для просторового потоку отримані з використанням рівнянь (7), (8) та (9). Лінії течії результуючого потоку отримуємо як діагоналі гідродинамічної клітини, утвореної лініями течії радіального та циркуляційного потоків (рисунок 1).

Враховуючи, що розміри гідродинамічної клітини можуть бути необмежено малими, ламана лінія течії результуючого потоку трансформується в плавну криву. Зважаючи на конфігурацію ліній течії частинки рідини радіально-циркуляційного потоку рухаються від центру витоку до периферії за плавнотзмінними криволінійними траєкторіями.

### Висновки

1. Розроблена математична модель робочого процесу струминного насоса для умов його обертання в свердловині подана у вигляді комбінованої радіально-циркуляційної гідродинамічної функції комплексної змінної. Комплексний потенціал радіально-циркуляційного потоку дає змогу оцінити вплив зміщення центрів витоку та вихору на характеристики ежекційної системи та врахувати неспіввісність елементів проточної частини струминного насоса та їх асиметричне розміщення в свердловині. Отримана в процесі моделювання характеристична функція враховує величину витрати в проточній частині струминного насоса та швидкість його обертання в свердловині.

2. В процесі аналізу отриманої характеристичної функції встановлено прямопропорційну залежність швидкості поширення радіально-циркуляційного потоку від його витрати та частоти обертання струминного насоса. У випадку симетричного кінематичного поля швидкість потоку приймає максимальні значення на осі камери змішування. Швидкість поширення радіально-циркуляційного потоку зростає у випадку зміщення центру вихору. Максимальна величина швидкості поширення радіально-циркуляційного потоку відповідає односторонньому одночасному зміщенню центрів витоку та вихору.

3. Результуюча поверхня просторової течії визначається діагональною площиною гідродинамічного тривимірного елемента, утвореного серією меридіальних площин та концентричних сфер з початком координат у центрі вихору. Поверхні течії комбінованого потоку утворені спіралеподібними траєкторіями з початком у центрі витоку та вихору. Геометричні розміри гідродинамічного елемента визначаються ви-

тратою і частотою обертання робочого середовища та характеризують параметри комбінованого потоку.

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

### Література

1. Moon T. The Defining Series: Jet Pumps. *Oilfield Review*. Published: 11.02.2016. 2 p. <https://www.slb.com/-/media/files/oilfield-review/defining-jet-pumps.ashx>.
2. Ayna T., Dilibal S. Experimental and numerical analysis for improving the suction capacity of the manufactured water jet ejectors. *Journal of Vibroengineering*. 2022, Vol. 24. Iss. 7. P. 1364–1376. <https://doi.org/10.21595/jve.2022.22518>.
3. Sheha A.A, Nasr M., Hosien M.A., Wahba E. Computational and Experimental Study on the Water-Jet Pump Performance. *Journal of Applied Fluid Mechanics*. 2018. Vol. 11. Iss. 4. P. 1013–1020. <https://doi.org/10.29252/jafm.11.04.28407>.
4. Merrill R., Shankar V., Chapma T. Three-Phase Numerical Solution for Jet Pumps Applied to a Large Oilfield. *Proceeding of Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference*, Abu Dhabi, UAE, November 9–12 2020. Paper Number: SPE-202928-MS. 9 p. <https://doi.org/10.2118/202928-MS>.
5. Zhu H.-Y., Deng J.-G., Zhao J.-Y. Vortex methods reducing the bottom-hole differential pressure. *Journal of Mines, Metals and Fuels*. 2012. Vol. 60. Iss. 5. P. 81–90.
6. Yang Y., Wu S., Wang C., Jiao W., Ji L., An C., Ge J. Effect of effuser throat diameter on the internal flow structure and energy characteristics of the jet pump. *Energy Reports*. 2023. Vol. 9. P. 2075–2086. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.01.025>.
7. Zhu H. Y., Liu Q.Y. Pressure drawdown mechanism and design principle of jet pump bit. *Scientia Iranica B*. 2015. Vol. 22. Iss. 3. P. 792–803.
8. 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 depressure-dominated jet mill bit. *Petroleum Science*. 2020. Vol. 17. P. 1602–1615. <https://doi.org/10.1007/s12182-020-00472-8>.
9. Zhu H.-Y., Liu Q.-Y., Wang T. Reducing the bottom-hole differential pressure by vortex and hydraulic jet methods. *Journal of Vibroengineering*. 2012. Vol. 16. Iss. 5. P. 2224–2249.

10. Panevnyk D.A. Simulation of a downhole jet-vortex pump's working process. *Nafta-Gaz*. 2021. No. 9. P. 579–586. <https://doi.org/10.18668/NG.2021.09.02>.

11. Паневник Д.О. Використання комплексного потенціалу плоскорадіального потоку для моделювання робочого процесу свердловинного струминного насоса. *Науковий вісник ІФНТУНГ*. 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).

12. Паневник Д.О. Використання вихрової функції для моделювання робочого процесу свердловинного струминного насоса. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2022. № 3(84). С. 24–32. [https://doi.org/10.31471/1993-9973-2022-3\(84\)-24-32](https://doi.org/10.31471/1993-9973-2022-3(84)-24-32).

### References

1. Moon T. The Defining Series: Jet Pumps. *Oilfield Review*. Published: 11.02.2016. 2 p. <https://www.slb.com/-/media/files/oilfield-review/defining-jet-pumps.ashx>.

2. Ayna T., Dilibal S. Experimental and numerical analysis for improving the suction capacity of the manufactured water jet ejectors. *Journal of Vibroengineering*. 2022, Vol. 24. Iss. 7. P. 1364–1376. <https://doi.org/10.21595/jve.2022.22518>.

3. Sheha A.A., Nasr M., Hosien M.A., Wahba E. Computational and Experimental Study on the Water-Jet Pump Performance. *Journal of Applied Fluid Mechanics*. 2018. Vol. 11. Iss. 4. P. 1013–1020. <https://doi.org/10.29252/jafm.11.04.28407>.

4. Merrill R., Shankar V., Chapma T. Three-Phase Numerical Solution for Jet Pumps Applied to a Large Oilfield. *Proceeding of Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference*, Abu Dhabi, UAE, November 9–12 2020. Paper Number: SPE-202928-MS. 9 p. <https://doi.org/10.2118/202928-MS>.

5. Zhu H.-Y., Deng J.-G., Zhao J.-Y. Vortex methods reducing the bottom-hole differential pressure. *Journal of Mines, Metals and Fuels*. 2012. Vol. 60. Iss. 5. P. 81–90.

6. Yang Y., Wu S., Wang C., Jiao W., Ji L., An C., Ge J. Effect of effuser throat diameter on the internal flow structure and energy characteristics of the jet pump. *Energy Reports*. 2023. Vol. 9. P. 2075–2086. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.01.025>.

7. Zhu H. Y., Liu Q.Y. Pressure drawdown mechanism and design principle of jet pump bit. *Scientia Iranica B*. 2015. Vol. 22. Iss. 3. P. 792–803.

8. 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 depressure-dominated jet mill bit. *Petroleum Science*. 2020. Vol. 17. P. 1602–1615. <https://doi.org/10.1007/s12182-020-00472-8>.

9. Zhu H.-Y., Liu Q.-Y., Wang T. Reducing the bottom-hole differential pressure by vortex and hydraulic jet methods. *Journal of Vibroengineering*. 2012. Vol. 16. Iss. 5. P. 2224–2249.

10. Panevnyk D.A. Simulation of a downhole jet-vortex pump's working process. *Nafta-Gaz*. 2021. No. 9. P. 579–586. <https://doi.org/10.18668/NG.2021.09.02>.

11. Panevnyk D.O. Vykorystannia kompleksnoho potentsialu ploskoradialnoho potoku dlia modeliuвання robochoho protsesu sverdlvynnoho strumynnoho nasosa. *Naukovyi visnyk IFNTUNH*. 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]

12. Panevnyk D.O. Vykorystannia vykhrovoi funktsii dlia modeliuвання robochoho protsesu sverdlvynnoho strumynnoho nasosa. *Rozvidka ta rozrobka naftovykh i hazovykh rodovyshch*. 2022. No 3(84). P. 24–32. [https://doi.org/10.31471/1993-9973-2022-3\(84\)-24-32](https://doi.org/10.31471/1993-9973-2022-3(84)-24-32). [in Ukrainian]