
Матеріали, конструкції та обладнання об'єктів нафтогазового комплексу

УДК 622.24 + 621.694.2

DOI: 10.31471/1993-9868-2022-1(37)-80-87

ПОБУДОВА НОМОГРАМ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК СТРУМИННОГО НАСОСА ПРИ ЙОГО ОБЕРТАННІ В СВЕРДЛОВИНІ

Д. О. Паневник

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

Побудовано номографічні залежності для визначення додаткового напору низьконапірного та високонапірного струминного насоса при його асиметричному обертанні в свердловині. Для номографування рівнянь характеристик струминного насоса введено узагальнений безрозмірний параметр у вигляді співвідношення квадратів колової швидкості та швидкості потоку на виході з робочої насадки. Введений параметр є функцією кутової швидкості обертання струминного насоса, відстані між осями свердловини та струминного насоса, витрати та радіусу робочого потоку. Дане співвідношення представлено за допомогою сіткової номограми шляхом введення в задане рівняння допоміжних змінних і розкладання його на чотири окремих вирази, кожен з яких має три змінні величини. Отримана номограма має вигляд суміщення чотирьох квадрантів. Номограма для безпосереднього визначення додаткового напору низьконапірного струминного насоса містить два бінарних поля та одинарну шкалу. В процесі номографування характеристики високонапірного струминного насоса попередньо отримано роздільну двофакторну залежність між трьома змінними величинами, одна з яких є шуканою. При побудові статистичної залежності отримано параболічні криві з точкою сходження в початку координат і показником степеня більшим одиниці та гіперболічні криві з асимптотами у вигляді осей координат. Вирівнювання нелінійних графічних залежностей здійснювалось використанням нерівномірної (зокрема логарифмічної) шкали. Показники степеня отриманого статистичного рівняння визначені за кутлом нахилу вирівняних графічних залежностей. Номограма для визначення додаткового відносного напору високонапірного струминного насоса передбачає використання двох бінарних полів та рівномірної вертикальної шкали. Визначення додаткового напору за допомогою отриманої номограми графічно полягає у пошуку координати четвертої вершини побудованого паралелограма.

Ключові слова: струминний насос, ежекційна система, додатковий відносний напір, коефіцієнт ежекції, номографування рівнянь, сіткові номограми.

Nomographic dependences are constructed to determine the additional pressure of low-pressure and high-pressure jet pump during its asymmetric rotation in the well. To nomograph the equations of characteristics of the jet pump, a generalized dimensionless parameter in the form of the ratio of the squares of the circular velocity and the flow rate at the outlet of the working nozzle is introduced. The entered parameter is a function of the angular speed of rotation of the jet pump, the distance between the axes of the well and the jet pump, the flow rate and the radius of the working flow. This relationship is represented by a grid nomogram by introducing auxiliary variables into a given equation and decomposing it into four separate expressions, each of which has three variables. The resulting nomogram has the form of a combination of four quadrants. The nomogram for direct determination of the additional pressure of the low-pressure jet pump contains two binary fields and a single scale. In the process of

nomographing the characteristics of the high-pressure jet pump, a separate two-factor dependence between three variables, one of which is sought, was previously obtained. When constructing the statistical dependence, parabolic curves with a point of convergence at the origin and an exponent of more than one and hyperbolic curves with asymptotes in the form of coordinate axes were obtained. The alignment of nonlinear graphical dependences was carried out using a non-uniform (including logarithmic) scale. Indicators of the degree of the obtained statistical equation are determined by the angle of inclination of the aligned graphical dependences. Nomogram to determine the additional relative pressure of the high-pressure jet pump involves the use of two binary fields and a uniform vertical scale. Determination of additional pressure with the help of the obtained nomogram graphically consists in finding the coordinates of the fourth vertex of the constructed parallelogram.

Key words: pump, ejection system, additional relative pressure, ejection coefficient, nomography of equations, grid nomograms.

Вступ

Переваги струминних насосів, які застосовують при реалізації значної кількості технологічних операцій при розробці родовищ вуглеводнів, пов'язують з відсутністю рухомих частин, продуктивністю від 1,5 м³/діб. до 3 тис. м³/діб., мінімальним технічним обслуговуванням, ефективністю за наявності значної кількості піску або високого вмісту газу, високої відповідності нафтовим стандартам, гнучкістю системи в умовах періодично змінюваних умов експлуатації. Крім того, струминні насоси відзначаються можливістю використання в похило-орієнтованих свердловинах з пошкодженим стовбуром та обсадною колоною, забезпеченням встановлення та вилучення давачів температури та тиску, можливістю здійснювати періодичне оброблення нафтогазопромислового обладнання хімічними реагентами різного призначення [1]. Новий етап розвитку гідроструминного способу експлуатації нафтових свердловин визначається розробленням технології встановлення та вилучення струминного насоса в свердловині гідравлічним способом без необхідності здійснювати підйом колони насосно-компресорних труб. Суттєве зменшення собівартості нафтовидобутку отримано при застосуванні газового двигуна наземного насосного агрегата, привод якого здійснюється спалюванням відсепарованого нафтового газу. Встановлення в проточній частині струминного насоса направляючих елементів для закручування змішуваних потоків [2, 3] дозволило підвищити коефіцієнт корисної дії ежекційної системи.

Застосування струминних насосів при первинному розкритті продуктивного горизонту забезпечує збереження природної проникності нафтогазозносного пласта та збільшує коефіцієнт нафтовилучення і тривалість рентабельної експлуатації нафтогазових родовищ. Збереження природної проникності продуктивного горизонту під час його первинного розкриття [4] зменшує необхідну кількість проведення операцій з інтенсифікації нафтогазовидобутку. Дана обставина, крім збереження матеріальних

ресурсів, сприяє підвищенню екологічної безпеки процесу розробки родовищ вуглеводнів.

Ефективність реалізації нафтогазових ежекційних технологій ускладнюється наявністю значної кількості факторів, які впливають на механізм взаємодії змішуваних потоків і визначають режим експлуатації свердловинного струминного насоса. Зважаючи на особливості механізму змішування коаксіальних потенціальних потоків з розміщеним між ними шаром зсувної течії, пошук оптимальних співвідношень їх геометричних, кінематичних та гідродинамічних параметрів є актуальною задачею.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень і публікацій

Методика вибору раціональних конструкторських та режимних параметрів свердловинної ежекційної компоновки [5, 6] ґрунтується на реалізації двох розрахункових етапів. Перший розрахунковий етап передбачає встановлення раціональних геометричних розмірів елементів проточної частини струминного насоса та їх оптимальну взаємну орієнтацію. На даному етапі, зазвичай, використовують положення теорії зануреного струменя та напівемпіричні теорії турбулентності [7]. Другий розрахунковий етап визначається спільним розв'язанням рівнянь напірно-витратної характеристики струминного насоса і характеристики його гідравлічної системи [8]. Графічно даний розрахунковий етап ілюструється пошуком точки перетину згаданих характеристик і визначає координати робочої точки свердловинної насосної установки: відносний напір та відносну витрату. Поєднання даних режимних параметрів в подальшому застосовується для розрахунку енергетичної характеристики струминного насоса [9]. У випадку застосування одно- або двоконтурних ежекційних систем додатково розраховуються значення витрат в замкнутих контурах циркуляції промивального розчину [10]. Границі використання ежекційної системи в свердловині визначаються можливістю експлуатації струминного насоса в кавіта-

ційному режимі [11, 12]. Кавітаційна характеристика струминного насоса зазвичай визначає граничні співвідношення глибини розміщення в свердловині та величини робочої витрати.

Висвітлення невирішених раніше частин загальної проблеми

Складність вибору раціональних конструкторських та режимних параметрів свердловинних ежекційних систем зумовлює необхідність в уточненні в промислових умовах прийнятих геометричних співвідношень елементів проточної частини струминного насоса, глибини та схеми його розміщення в свердловині і величини робочої витрати, створюваної наземним насосним агрегатом. При цьому виникає потреба у використанні довідкової інформації у вигляді аналітичних та емпіричних графічних залежностей. Використання додаткового довідкового матеріалу ускладнюється необхідністю послідовного використання декількох графічних залежностей, які можуть мати різні масштаби та системи вимірювання одиниць конструкторських і технологічних параметрів. Обсяг інформації, залученої до прогнозування режиму роботи свердловинної ежекційної системи, зростає у разі використання в математичних моделях робочого процесу струминного насоса додаткових експлуатаційних факторів. Зокрема, при моделюванні характеристик низьконапірного та високонапірного струминних насосів [13] при його асиметричному обертанні додатково враховується величина зміщення ежекційної системи та швидкість обертання в свердловині. Отримані в процесі моделювання робочого процесу струминного насоса аналітичні залежності мають складну структуру і потребують виконання низки працеємких операцій. Спрощення отриманих рівнянь при збереженні необхідної точності проведення розрахунків може бути досягнуто шляхом заміни окремих елементів аналітичних залежностей еквівалентними формулами або їх номографуванням.

Формулювання цілей статті

Метою досліджень є розроблення алгоритму розрахунку напірної характеристики низьконапірного та високонапірного струминного насоса у вигляді номографування окремих елементів аналітичних залежностей та побудови системи номограм для визначення додаткового напору, створюваного асиметричним обертанням ежекційної системи в свердловині.

Висвітлення основного матеріалу дослідження

Величина додаткового напору струминного насоса для умов його асиметричного обертання визначається рівнянням [13]

$$h_{\Delta} = 0,731 \frac{(1+i)^2}{K_{ch}^2} - 1,0548 \frac{i^3}{(1+i)(K_{ch}-1)^2} + \frac{8,898 \omega^2 r_0^2 r_p^4 i}{(1+i) Q_p^2}, \tag{1}$$

де i – коефіцієнт ежекції струминного насоса;
 K_{ch} – основний геометричний параметр струминного насоса;
 ω – кутова швидкість обертання струминного насоса;
 r_0 – відстань між осями свердловини та струминного насоса;
 r_p – радіус робочого потоку;
 Q_p – витрата робочого потоку.

Рівняння (1) подано у вигляді

$$h_{\Delta} = 0,731 \frac{(1+i)^2}{K_{ch}^2} - 1,0548 \frac{i^3}{(1+i)(K_{ch}-1)^2} + \frac{0,9025 S i}{1+i}, \tag{2}$$

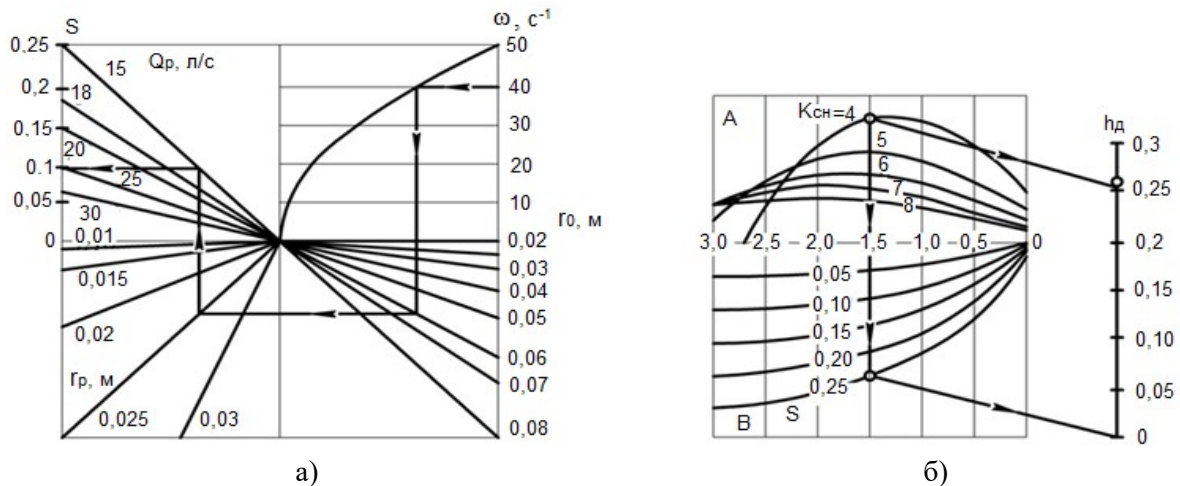
де параметр S визначає квадрат співвідношення колової швидкості V_{θ} та швидкості потоку V_p на виході з робочої насадки

$$S = \left(\frac{V_{\theta}}{V_p} \right)^2 = \frac{\omega^2 r_0^2}{Q_p^2 / \pi^2 r_p^4}. \tag{3}$$

Зважаючи на значну кількість змінних величин та структуру рівняння (1), його номографування здійснюємо у два етапи. На першому етапі побудуємо номограму рівняння (3), на другому – номограму рівняння (2) із врахуванням попередньо визначених величин параметра S .

Параметр S може бути визначений за допомогою сіткової номограми шляхом введення в задане рівняння допоміжних змінних і розкладання його на чотири окремих вирази, кожен з яких має три змінні величини. Для кожного з отриманих рівнянь будуємо окремі сіткові номограми (рис. 1а) послідовно суміщені по загальних шкалах за допомогою введених допоміжних змінних величин.

Така номограма матиме вигляд суміщення чотирьох квадрантів [14]. Параметр S шляхом введення трьох допоміжних величин t, q, p подамо у вигляді рівняння



а) – співвідношення обертової і робочої швидкостей; б) – напір струминного насоса
Рисунок 1 – Визначення режиму роботи низьконапірної ежекційної системи для умов асиметричного обертання в свердловині

$$S = af(x)\phi(z)\psi(u)\varphi(v) . \quad (4)$$

Рівняння (4) розкладаємо на чотири вирази

$$t = af(x) = \pi^2 \omega^2; \quad (5)$$

$$q = t\phi(z) = tr_0^2; \quad (6)$$

$$p = q\psi(u) = qr_p^4; \quad (7)$$

$$S = p\varphi(v) = pQ_p^{-2} . \quad (8)$$

Перший квадрант (верхній правий) відображає рівняння (5), для чого на його зовнішній вертикалі (рис. 1а) відкладаємо значення кутової швидкості ω , а на горизонтальній шкалі – допоміжну змінну величину t . У другому квадранті (правий нижній) будуємо рівняння (6), приймаючи величину r_0 за параметр p , а на вертикальній осі будуємо шкалу для другої допоміжної змінної q . Кожне значення радіуса r_0 відповідає окремій похилій прямій. У третьому квадранті (нижній лівий) будуємо рівняння (7), приймаючи змінну r_p за параметр, а на горизонтальній осі будуємо шкалу для третьої допоміжної змінної p . Рівняння (7) також матиме вигляд серії кривих, які відповідають окремим значенням радіуса r_p . В четвертому квадранті (верхній лівий) будуємо рівняння (8), приймаючи витрату Q_p за параметр, а на зовнішній вертикалі квадрата будуємо шкалу для шуканої змінної S . Приклад використання номограми показаний стрілками на рисунку 1а: задані величини $\omega = 40 \text{ с}^{-1}$; $r_0 = 0,06 \text{ м}$; $r_p = 0,025 \text{ м}$; $Q_p = 0,0015 \text{ м}^3/\text{с}$. Відповідь: $S = 0,099$.

Щоб привести рівняння (2) до номографованого вигляду, запишемо його у вигляді системи рівнянь

$$h_\delta = A + B; \quad (9)$$

$$A = 0,731 \frac{(1+i)^2}{K_{ch}^2} - 1,0548 \frac{i^3}{(1+i)(K_{ch}-1)^2}; \quad (10)$$

$$B = \frac{0,9025Si}{1+i} . \quad (11)$$

Відповідно до отриманої системи номограма рівняння (2) містить два бінарних поля для визначення параметрів A, B та одну шкалу для визначення напору h_δ .

При побудові бінарних полів A, B використовуємо спільну горизонтальну шкалу (рис. 1б). Величини A, B визначено відповідно для різних значень геометричного параметра K_{ch} та співвідношення S . Шкала h_δ проградуєвана шляхом сумування величин A, B . Бінарні поля A, B та шкалу h_δ побудовано в одному масштабі.

Визначення додаткового напору передбачає побудову паралелограма за трьома заданими вершинами. Дві вершини паралелограма знаходяться на бінарних полях A, B , одна вершина – в нульовій точці шкали h , а четверта вершина визначає величину напору. На рисунку 1б показано приклад використання номограми для таких значень змінних рівняння (2): $K_{ch}=4$; $i=1,5$; $S=0,25$. Відповідь: $h_\delta=0,26$.

Додатковий напір, викликаний асиметричним обертанням високонапірного струминного насоса, враховуючи отриманий раніше вираз для визначення параметра S , має вигляд

$$h_\delta = 0,731 \frac{(1+i)^2}{K_{ch}^2} + \frac{0,9025i}{1+i} S - \frac{\Delta P_\kappa}{\Delta P_p} . \quad (12)$$

Номографування отриманого рівняння вимагає представлення складової $\Delta P_k / \Delta P_p$ у вигляді залежності від величини коефіцієнта інжекції i та основного геометричного параметра $K_{сн}$.

Рівняння для визначення відносних втрат на вхідній ділянці камери змішування має вигляд

$$\frac{\Delta P_k}{\Delta P_p} = \frac{\frac{\varphi_1^2 \rho_p i^2}{\varphi_4^2 \rho_i}}{\left(K_{сн} - \frac{1}{\sqrt{1 + \Delta P_k / \Delta P_p}} \right)^2}, \quad (13)$$

де φ_1, φ_4 – коефіцієнти швидкості відповідно робочої насадки та всмоктувальної лінії струминного насоса;

ρ_p, ρ_i – густина робочого та ежектованого потоку.

Аналіз рівняння (13) показує, що його розв'язок відносно величини $\Delta P_k / \Delta P_p$ можливий виключно при застосуванні методу послідовних наближень. Номографування додаткової напірної характеристики високонапірного струминного насоса, однак, вимагає подання формули для визначення величини $\Delta P_k / \Delta P_p$ у вигляді співвідношення $\Delta P_k / \Delta P_p = f(i, K_{сн})$.

Необхідно знайти роздільну двофакторну залежність, тобто залежність між трьома змінними величинами, одна з яких є шуканою. Величини незалежної змінної i у всіх серіях розрахункового масиву приймаємо однаковими. Це дає можливість побудувати залежність $\Delta P_k / \Delta P_p = f(i)$ для відповідних значень основного геометричного параметра $K_{сн}$ та залежність $\Delta P_k / \Delta P_p = f(K_{сн})$ – для відповідних значень коефіцієнта ежекції. Отже, шукану величину можна подати у вигляді двох графіків (рис. 2а). Побудова залежностей в процесі роздільної зміни постійних рівняння (без змін інших) дозволяє отримати на графіках серії однакових кривих.

Задача пошуку статистичної формули для двофакторної залежності складається з трьох етапів:

- 1) розрахунок значень за формулою (13) методом послідовних наближень;
- 2) встановлення загального вигляду статистичної формули;
- 3) визначення постійних величин статистичної формули.

Зважаючи на вигляд графічних залежностей (рис. 2а), статистичну формулу шукаємо у вигляді

$$\frac{\Delta P_k}{\Delta P_p} = a i^m K_{сн}^n, \quad (14)$$

де a – постійний коефіцієнт;
 m, n – шукані показники степені.

На графіках серії $\Delta P_k / \Delta P_p = f(i)$ (рис. 2а I)

отримані параболічні криві з точкою сходження в початку координат і показником степені $m > 1$. На графіках серії $\Delta P_k / \Delta P_p = f(K_{сн})$

(рис. 2а II) отримано гіперболічні криві з асимптотами у вигляді осей координат. Визначення показників степені m, n передбачає попереднє вирівнювання отриманих методом послідовних наближень залежностей. Вирівнювання кривих здійснюємо використанням нерівномірної (зокрема логарифмічної) шкали $\lg(\Delta P_k / \Delta P_p) = f(\lg i)$, $\lg(\Delta P_k / \Delta P_p) = f(\lg K_{сн})$.

На графіках, побудованих в логарифмічних координатах (рис. 2 б), отримано ряд паралельних прямих, причому отримана на перпендикулярній до паралельних прямих лінії шкала MN теж є логарифмічною. Значення показників степеня m, n визначаємо за тангенсом кута нахилу паралельних прямих. Для наведених на рисунку 2б графіків отримаємо $m = 1,8$ (рис. 2б I); $n = -2,6$ (рис. 2б II). На графіку рисунка 2б II кут нахилу прямих перевищує 90° , тому показник степені n є від'ємним. Коефіцієнт « a » емпіричної формули визначаємо середньоарифметичним методом, підставляючи відповідні значення величини $\Delta P_k / \Delta P_p$ та параметрів $i, K_{сн}$.

Після проведення розрахунків отримаємо $a = 4,0435$. Отримані за емпіричною формулою (14) значення величини $\Delta P_k / \Delta P_p$ відображені на рисунку 2 а I пунктирними лініями. Адекватність отриманої емпіричної формули підтверджується близькими значеннями величини $\Delta P_k / \Delta P_p$, отриманими з використанням рівняння (13) і рівняння (14). Наприклад, для основного геометричного параметра $K_{сн} = 2,5$ розбіжність між результатами, отриманими за формулами (13), (14) знаходиться в діапазоні від 1,1 % до 6,98 %.

Використовуючи отриману формулу для визначення відносних гідравлічних втрат (рівняння (14)), запишемо вираз (12) у вигляді

$$h_0 = 0,731 \frac{(1+i)^2}{K_{сн}^2} + \frac{0,9025i}{1+i} S - 4,0435 \frac{i^{1,8}}{K_{сн}^2}. \quad (15)$$

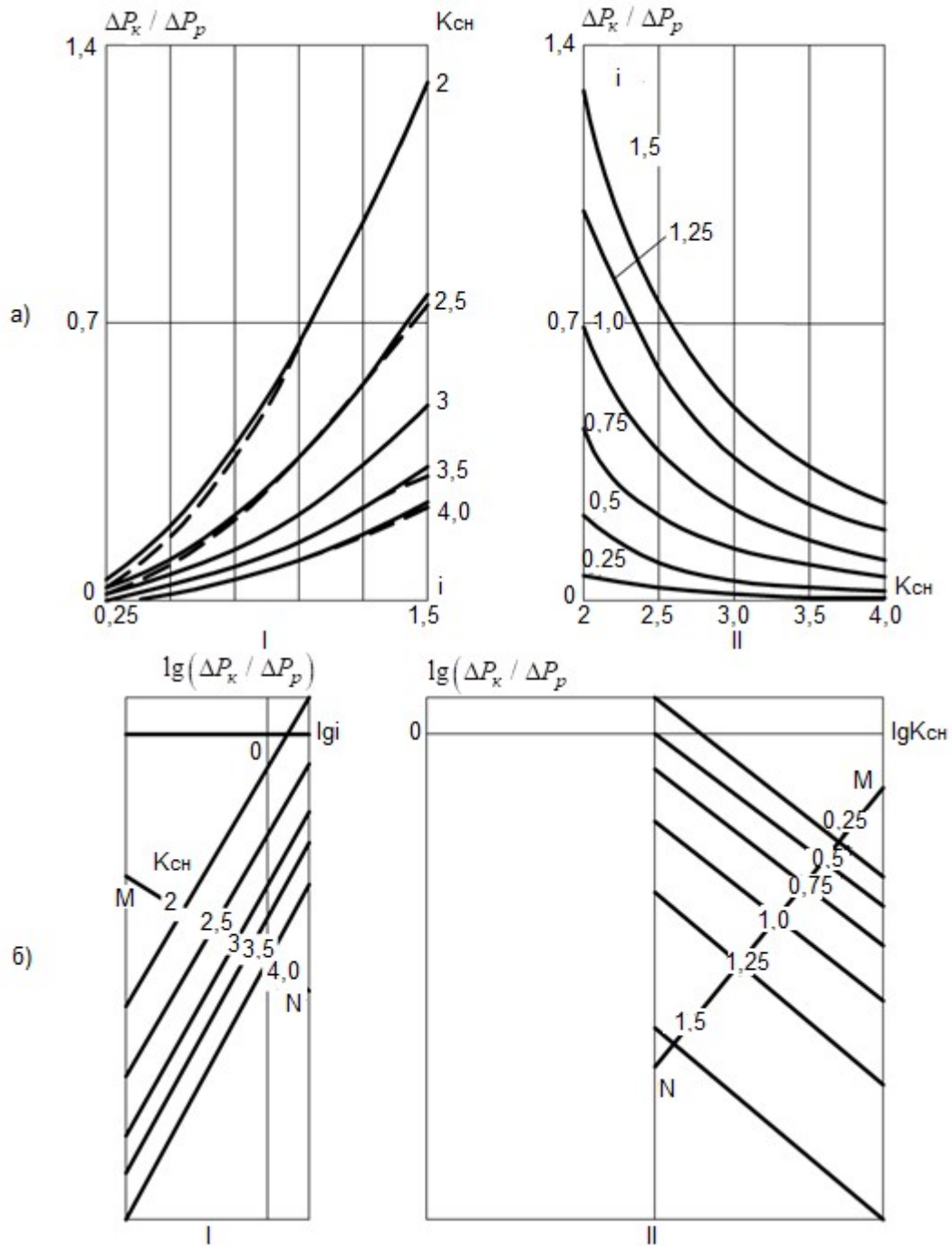


Рисунок 2 – Залежність гідравлічних втрат, викликаних звуженням робочого потоку, від коефіцієнта ежекції (I) та основного геометричного параметра (II) для рівномірних (а) та логарифмічних (б) координат

Для приведення рівняння (15) до нормального номографованого вигляду запишемо

$$h_d = A + B,$$

$$\text{де } A = 0,731 \frac{(1+i)^2}{K_{сн}^2} - 4,0435 \frac{i^{1,8}}{K_{сн}^{2,6}}; \quad (16)$$

$$B = \frac{0,9025i}{1+i} S.$$

Таким чином, номограма для визначення додаткового напору складається з бінарних полів *A, B* та рівномірної шкали h_d . Рівняння, що

описує бінарне поле *B*, аналогічне раніше отриманій формулі (11).

Визначення додаткового напору за допомогою отриманої номограми (рис. 3) передбачає пошук координати четвертої вершини паралелограма. На цьому рисунку показано приклад використання номограми для таких значень величин системи (16): $K_{сн} = 2,5$; $i = 0,75$; $S = 0,2$. Відповідь: $h_d = 0,2132$.

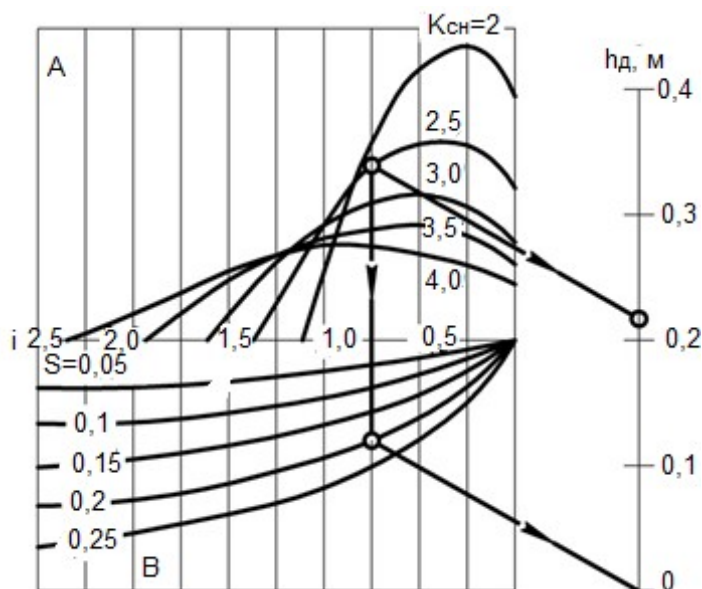


Рисунок 3 – Визначення додаткового напору, викликаного асиметричним обертанням високонапірного струминного насоса

Висновки

Режим роботи струминного насоса, який асиметрично обертається в свердловині, може бути визначений за допомогою системи номограм.

Встановлено, що для низьконапірної ежекційної системи додатковий відносний напір струминного насоса може бути визначений за допомогою основної номограми у складі двох бінарних полів і одинарної шкали та додаткової сіткової номограми у вигляді чотирьох суміщених квадрантів.

Показано, що номограма для визначення додаткового відносного напору високонапірного струминного насоса повинна складатись із двох бінарних полів, суміщених з рівномірною шкалою та побудованих із використанням двофакторної емпіричної залежності, отриманої на основі встановлення просторової орієнтації, логарифмічно вирівняних параболічних кривих.

Отримані результати дозволяють підвищити ефективність прогнозування характеристик струминного насоса для умов його асиметричного обертання в свердловині.

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

Література / References

1. Velez R.P., Vásquez-Santacruz J., Marín-Urías L., Vargas A., García-Ramírez P., Morales-de-la-Mora J., Vite-Morales A., Gutierrez-Domínguez E. Efficiency Maximization of a JetPump for an Hydraulic Artificial Lift System. *Scipedia*. 2019. Vol. 35. No 1. 12 p. <https://doi.org/10.23967/j.rimni.2018.11.002>.
2. 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>.
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 8. P. 2224–2249.
4. 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>.
5. Yong H., Lihong Z., Deyong Z., Hualin L., Jinying W., Jinshen Y., Yugang Z., Zhibin W. Study on structure parameters of reverse circulation drill bit secondary injector device based on injectors coefficient. *SPE/IADS Asia Pacific Drilling Technology Conference*. 22–24 August. Singapore. 2016. IADS/SPE–180539–MS. 9 p.

6. 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>.
7. Sánchez-Rosas M., Casillas-Navarrete J., Jimenez-Bernal J.A., Kurdyumov V.N., Medina A. Experimental and numerical study of submerged jets from pipes of different wall thicknesses for $Re < 1$. *Revista mexicana de fisica*. 2020. Vol. 66. No. 1. P. 69–76. <https://doi.org/10.31349/RevMexFis.66.69>.
8. 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>.
9. Xu K., Wang G., Zhang L., Wang L., Yun F., Sun W., Wang X., Chen X. Multi-Objective Optimization of Jet Pump Based on RBF Neural Network Model. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2021. Vol. 9. No. 236. 18 p. <https://doi.org/10.3390/jmse9020236>.
10. Melnikov A.P., Buglov N.A. Parameter substantiation of supra bit jet pump for productive formation opening. *Socar Proceeding*. 2021. Vol. 2. P. 112-118. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-4-433-440>.
11. 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>.
12. Zi H., Zhou L., Meng L. Prediction and analysis of jet pump cavitation using Large Eddy Simulation. *Journal of Physics Conference Series*. 2015. Vol. 656(1):012142. 5 p. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/656/1/012142>.
13. Panevnyk D.O. Determination of a jet pump characteristics during its asymmetric rotation in a well. *Scientific bulletin Ivano-Frankivsk national technical university of oil and gas*. 2021. Vol. 2(51). P. 55–65. [https://doi.org/10.31471/1993-9965-2021-2\(51\)-55-65](https://doi.org/10.31471/1993-9965-2021-2(51)-55-65). [in Ukrainian]
14. Evesham H.A. The History and Development of Nomography. London: Docent Press, 1982. 267 p.