

DOI: <https://doi.org/10.32839/2304-5809/2019-1-65-43>

УДК 622.24+621.694.2

Паневник О.В., Паневник Д.О.

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

ВИЗНАЧЕННЯ РЕЖИМУ РОБОТИ СВЕРДЛОВИННОГО СТРУМИННОГО НАСОСА

Анотація. Запропонована методика розв'язку системи рівнянь, які описують напірну характеристику свердловинного струминного насоса. Відповідно до приведеного в роботі алгоритму визначення гідравлічних втрат в робочому потоці на ділянці між робочою насадкою та камерою змішування здійснюється з використанням методу послідовних наближень. Розроблена послідовність проведення розрахункових операцій та програма для їх реалізації. Приведений в роботі розрахунковий алгоритм дозволяє змінювати точність прогнозування напору, створюваного струминним насосом та тривалість процедури його визначення. Реалізація запропонованого розрахункового комплексу може здійснюватись з використанням середовища Delphi та програмних ресурсів PTC Matchad.

Ключові слова: нафтогазові ежекційні технології, свердловинний струминний насос, ежекційна система, напірна характеристика, метод послідовних наближень.

Panevnyk Oleksandr, Panevnyk Denys

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

DETERMINATION OF THE WELL JET PUMP OPERATION MODE

Summary. Methodology of decision of the system of equalizations describing pressure description of downhole jet pump is offered. In accordance with the algorithm driven to work determination of hydraulic losses in a working stream on an area between working attachment and chamber of mixing comes true with the use of method of progressive approximations. The sequence of realization of calculation operations and program are worked out for their realization. The calculation algorithm driven to work allows to change exactness of prognostication of the pressure created by jet pump and duration of procedure of his determination. Realization of the offered calculation complex can come true with the use of language of Delphi and program resources of PTC Matchad.

Keywords: oil and gas ejection technologies, well jet pump, ejection system, pressure characteristics, method of successive approximations.

Постановка проблеми. Поширеність використання нафтогазових ежекційних технологій зумовлена простою конструкцією струминного насоса, відсутністю рухомих частин, можливістю його застосування в агресивному середовищі та складних умовах експлуатації свердловин [1]. Свердловинні ежекційні системи дають змогу подовжити тривалість використання фонтанного способу експлуатації, підвищити ефективність застосування електровідцентрових [2] та штангових глибинних [3] насосів під час їх спільного компонування з струминним насосом. Гідроструминний спосіб експлуатації нафтових свердловин дозволяє зберегти економічно обґрунтований обсяг нафтовидобутку на пізніх стадіях розробки родовищ вуглеводнів. Подальше зростання об'ємів застосування гідроструминної експлуатації нафтових свердловин вимагає розвитку теоретичних питань [4], спрямованих на удосконалення методів прогнозування режиму роботи ежекційних систем в свердловині. Збільшення достовірності моделювання робочого процесу свердловинного струминного насоса дає змогу підвищити ефективність використання при розробці покладів вуглеводнів нафтогазових ежекційних технологій та є актуальним завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Залежно від того, які закони закладено в основу математичної моделі робочого процесу струминного насоса визначення режиму його роботи може базуватись на використанні таких положень та методів гідродинаміки, як закон збереження кількості руху рідини [5], рівнянь Нав'є-Стокса [6], спеціальних комп'ютерних програм [7]. Характер розподілу швидкостей змішуваних потоків

в проточній частині струминного насоса зумовлює вибір необхідних конструкторських параметрів [8] при проектуванні та експлуатації свердловинних ежекційних систем. При моделюванні змішування різнофазних потоків широко використовують газодинамічні функції. Крім класичних теорій відоме, також, використання турбулентних моделей змішування потоків, які внаслідок недостатньої точності не знайшли широкого застосування.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми. Найбільш поширена методика визначення характеристики струминного насоса розроблена у ВТІ ім. Ф.Е. Дзержинського Е.Я. Соколовим та Н.М. Зінгером [9], які удосконалили та привели до сучасного вигляду рівняння П.Н. Каменева [10]. Відповідно до даної методики визначення відносного напору ежекційної системи передбачає попередній розрахунок величини гідравлічних втрат в робочому потоці на ділянці між робочою насадкою та камерою змішування струминного насоса. Величину гідравлічних втрат сьогодні визначають шляхом розв'язку системи ірраціональних рівнянь, для чого, зазвичай, використовують графічні методи розрахунку. Визначення гідравлічних втрат в робочому потоці графічним методом дозволяє розрахувати наближені значення даного параметра, внаслідок чого підвищується безпека роботи ежекційної системи в кавітаційному режимі [11], що може стати причиною зношування елементів проточної частини струминного насоса та зменшення ресурсу його роботи.

Мета статті. Головною метою цієї роботи є розробка аналітичної методики визначення гідравлічних втрат в робочому потоці струминного

насоса на основі програмування алгоритму розрахунку із застосуванням середовища Delphi.

Виклад основного матеріалу. Методика розрахунку напірної характеристики ежекційної системи, заснована на використанні закону збереження кількості руху рідини в камері змішування струминного насоса, передбачає необхідність застосування для розв'язку задачі методу послідовних наближень.

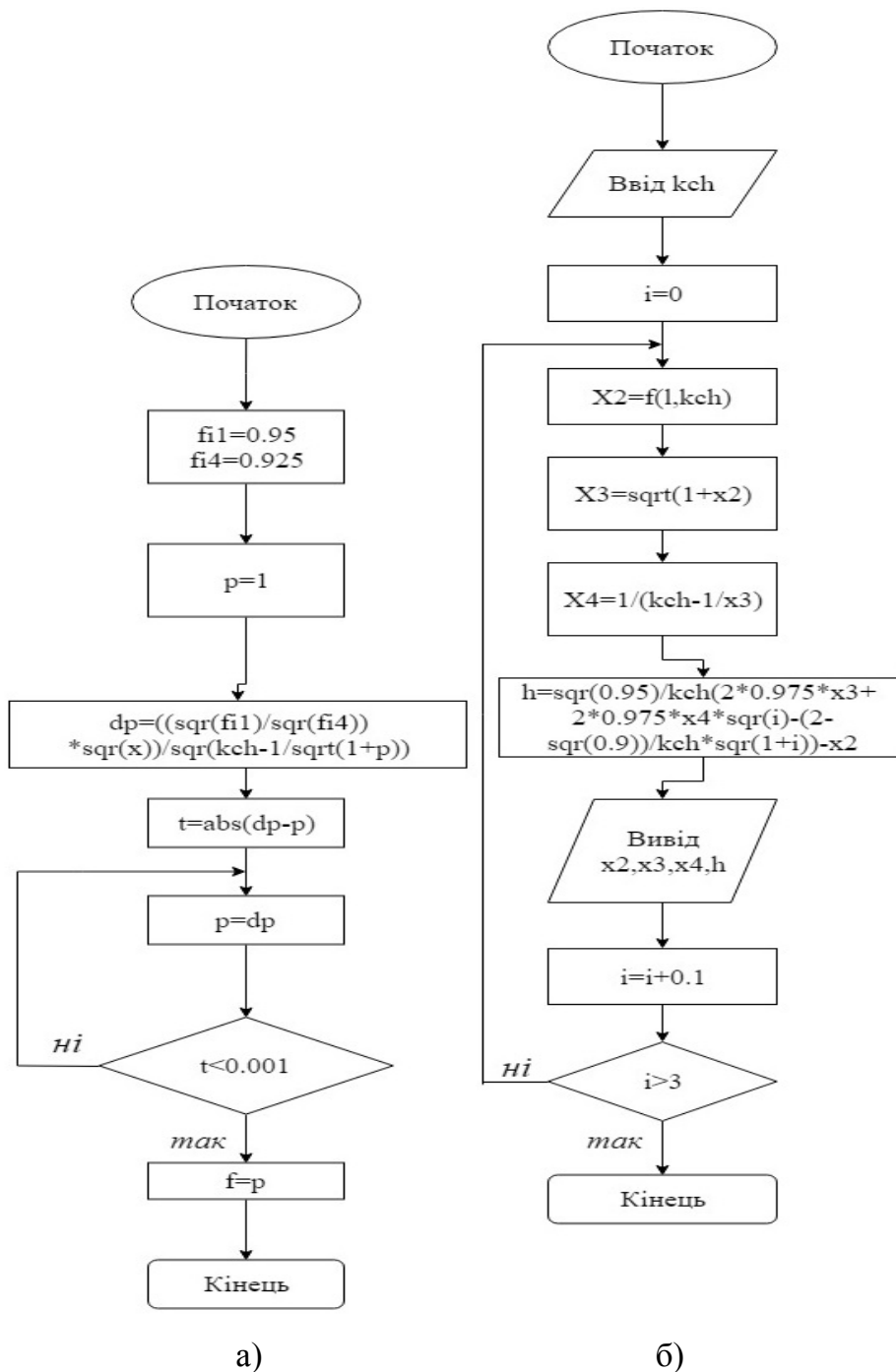
Напірна характеристика високонапірного струминного насоса визначається системою рівнянь

$$h = \frac{P_3 - P_3}{P_p - P_i} = \frac{\varphi_1^2}{K_{ch}} \left[2\varphi_2 \frac{f_{p1}}{f_{p2}} + 2\varphi_2 \frac{f_{p1}}{f_{i2}} - (2 - \varphi_3^2) \frac{(1+i)^2}{K_{ch}} \right] - \frac{\Delta P_k}{\Delta P_p}; \quad (1)$$

$$\frac{\Delta P_k}{\Delta P_p} = \frac{\frac{\varphi_1^2}{\varphi_3^2} i^2}{\left[K_{ch} - \frac{1}{\sqrt{1 + (\Delta P_k / \Delta P_p)}} \right]^2}; \quad (2)$$

$$\frac{f_{p1}}{f_{p2}} = \sqrt{1 + \frac{\Delta P_k}{\Delta P_p}} \quad (3)$$

$$\frac{f_{p1}}{f_{i2}} = \frac{1}{K_{ch} - \frac{f_{p2}}{f_{p1}}}, \quad (4)$$



а) визначення відносних втрат тиску в робочому потоці; б) визначення відносного напору струминного насоса

Рис. 1. Розрахунок напірної характеристики струминного насоса

де h – відносний напір струминного насоса;
 P_3, P_i, P_p – значення тисків змішаного, інжекто- ваного та робочого потоків;

$\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$ – емпіричні коефіцієнти швидко- стей характерних перерізів струминного насоса ($\varphi_1 = 0,95; \varphi_2 = 0,975; \varphi_3 = 0,9; \varphi_4 = 0,925$);

K_{ch} – геометричний параметр струминного на- соса;

f_{p1}, f_{p2} – площа перерізу робочого потоку на ви- ході з робочої насадки та на вході в камеру змі- шування;

f_{i2} – площа перерізу інжектованого потоку на вході в камеру змішування;

i – коефіцієнт інжекції струминного насоса;

$\frac{\Delta P_k}{\Delta P_p}$ – відносні гідравлічні втрати в робочому потоці;

Розрахунок напірної характеристики стру- минного насоса здійснюється в наступній послі- довності:

- визначення відносних гідравлічних втрат в робочому потоці $\frac{\Delta P_k}{\Delta P_p}$ (рівняння (2));
- визначення співвідношення площ робо- чого потоку $\frac{f_{p1}}{f_{p2}}$ (рівняння (3));
- визначення співвідношення площ робо- чого та інжектованого потоку $\frac{f_{p1}}{f_{i2}}$ (рівняння (4));
- визначення відносного напору струмин- ного насоса (рівняння (1)).

Визначення відносних гідравлічних втрат в ро- бочому потоці $\frac{\Delta P_k}{\Delta P_p}$ (рівняння (2)) вимагає викорис- тання методу послідовних наближень. Відповідно до розробленого алгоритму (рис. 1 а) та програми розрахунку післявведення значень коефіцієнтів ш- видкостей φ_1, φ_4 та геометричного параметра K_{ch} задаємо значення відносних втрат $\Delta P_k / \Delta P_p$ (ліва частина рівняння (2)). Після розрахунку уточне- ного значення даного параметра з використанням правої частини рівняння (2) здійснюємо порівнян- ня заданої (P) та уточненої (dP) величини відно- сних втрат. Шляхом підбору заданого значення ви- значаємо таку його величину, яка забезпечувала б задовільну з точки зору досягнення необхідної точності різницю параметрів

$$t = abs(dP - P) < 0,001 \quad (5)$$

Після виконання умови (5) розрахунку при- пиняємо. Значення параметра в правій частині рівняння (5) визначає точність проведення роз- рахунків.

Вказану послідовність розрахунку повторюємо для різних значень коефіцієнта інжекції i , який змінюється в діапазоні від 0 до 3 з кроком 0,1. Отримані з використанням розробленого алгори- тму та програми розрахунку залежності для визна- чення відносних гідравлічних втрат в робочому потоці приведені на рис. 2. Аналіз залежностей $\Delta P_k / \Delta P_p = f(K_{ch}, i)$ свідчить про прямопропорцій- ний зв'язок відносних втрат $\Delta P_k / \Delta P_p$ з величи- ною коефіцієнта інжекції та обернено пропорцій- ний зв'язок з геометричним параметром K_{ch} .

Визначення відносного напору струминного насоса (рис. 1. б) передбачає послідовне вико- ристання рівнянь (3), (4) та (1), причому величи- ну відносних втрат $\Delta P_k / \Delta P_p$ вважаємо відомою (визначеною раніше відповідно до алгоритму

(рис. 1 а)). При розрахунку відносного напору з використанням приведеного на (рис. 1 б) алго- ритму прийняті наступні позначення:

X2 – відносні втрати в робочому потоці;

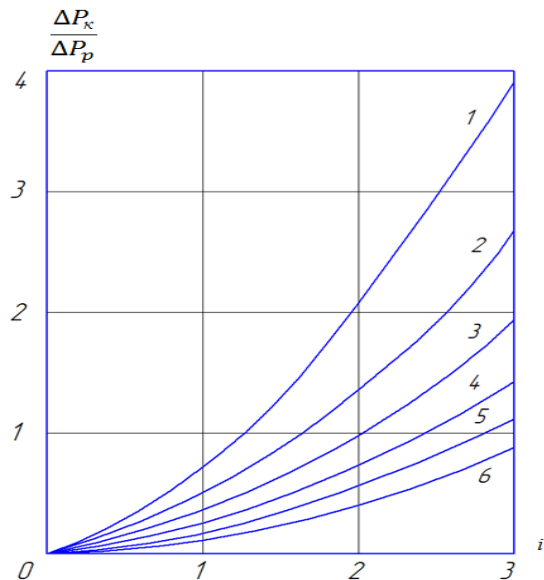
X3 – співвідношення площ перерізів робочого потоку;

X4 – співвідношення площ перерізів робочого та інжектованого потоків.

Після розрахунку параметрів X2, X3, X4 ви- значаємо відносний напір струминного насоса шляхом підстановки в рівняння (1) параметрів X2, X3, X4 та постійних коефіцієнтів швидкостей $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$. Розрахунок відносного напору здій- снюємо для заданого значення геометричного параметра K_{ch} та величини коефіцієнта інжекції $i = 0$. Після виведення розрахованих величин X2, X3, X4, h нарощуємо значення коефіцієнта ін- жекції в діапазоні від 0 до 3 з кроком $\Delta i = 0,1$ і по- вторюємо розрахунок.

Частина значень відносного напору може ви- явитись від'ємною, що свідчить про існування не- робочого режиму струминного насоса для певних значень коефіцієнта інжекції i та геометричного параметра K_{ch} .

Розроблена програма використана для розра- хунку напірної характеристики струминного на- соса, який відповідає геометричному параметру $K_{ch} = 2,507$. Відповідно до проведених розрахунків (рис. 2) відносні гідравлічні втрати в робочому потоці прямопропорційно залежать від величи- ни коефіцієнта інжекції та оберненопропорцій- но – від співвідношення основного геометрично- го параметра струминного насоса



1 – $K_{ch} = 2,0$; 2 – $K_{ch} = 2,4$; 3 – $K_{ch} = 2,8$;
 4 – $K_{ch} = 3,2$; 5 – $K_{ch} = 3,6$; 6 – $K_{ch} = 4,0$

Рис. 2. Залежність відносних втрат в робочому потоці від коефіцієнта інжекції для різних значень геометричного параметра K_{ch}

Напірна характеристика струминного насоса та залежність для ККД приведені на рис. 3.

ККД струминного насоса визначений за фор- мулою

$$\eta = \frac{hi}{1-h} \quad (6)$$

Розроблена методика визначення напірної характеристики глибокого струминного насоса може використовуватись на стадії проектування та експлуатації ежекційних систем при бурінні, нафтогазовидобуванні та ремонті свердловин.

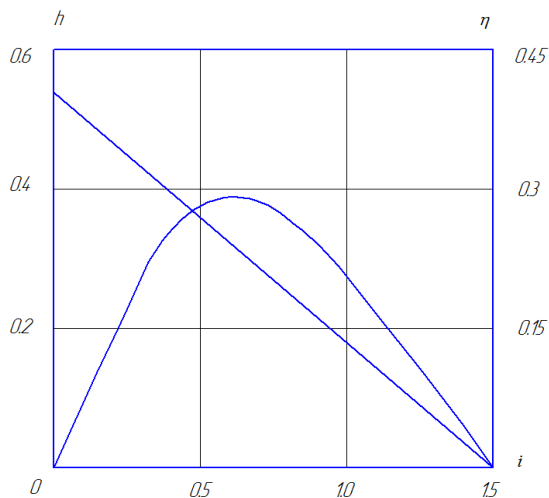


Рис. 3. Залежність напору та ККД від коефіцієнта інжекції струминного насоса

Висновки і пропозиції.

1. На основі використання методу послідовних наближень та програмних ресурсів PTC Matchad

розроблений алгоритм розрахунку характеристики свердловинної ежекційної системи, який полягає у встановленні величини гідравлічних втрат в робочому потоці на ділянці між робочою насадкою та камерою змішування та наступному визначенні відносного напору, створюваного високонапірним струминним насосом. З метою автоматизації процесу побудови напірної характеристики свердловинного струминного насоса програма виконання розрахункових операцій розроблена мовою Delphi.

2. Величина відносних гідравлічних втрат в робочому потоці прямопропорційно залежить від коефіцієнта інжекції та оберненопропорційно від співвідношення площ камери змішування та робочої насадки струминного насоса.

3. Розроблений алгоритм визначення характеристики свердловинної ежекційної системи дозволяє визначити границі співвідношення значень коефіцієнта інжекції та геометричного параметра струминного насоса, які відповідають його неробочому режиму.

Завданням подальших досліджень є розробка програми розрахунку максимальної та мінімальної глибини розміщення ежекційної системи в свердловині та побудова поля характеристик допустимих умов та режимів експлуатації нафтового струминного насоса в широкому діапазоні зміни продуктивних інтервалів, дебіту та конструкторських параметрів.

Список літератури:

1. Паневник А.В. Определение эксплуатационных параметров наддольной эжекторной компоновки / А.В. Паневник, И.Ф. Конгур, Д.А. Паневник // Нефтяное хозяйство. – 2018. – № 3. – С. 70-73.
2. Nunez O.A. Gas lift jet pump hybrid completion reduces non-productive time during unconventional well production / O.A. Nunez, T.S. Pough, I. Hubbard / SPE Argentina Exploration and Production of Unconventional Resources Symposium, Buenos Aires, Argentina, 1-3 June 2016. – SPE – 180958 – MS. – 9 p.
3. Дубей О.Я. Підвищення ефективності установок свердловинних штангових насосів шляхом застосування нафтогазових ежекторів: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.12 / Дубей Ольга Ярославівна. – Івано-Франківськ, 2017. – 217 с.
4. Velychkovych A.S. Study of the stress state of the downholejet pump housing / A.S. Velychkovych, D.O. Panevnyk // Науковий вісник НГУ. – 2017. – № 5. – P. 50-55.
5. Zhu H.Y. Reducing the bottom-hole differential pressure by vortex and hydraulic jet methods / H.Y. Zhu, Q.Y. Liu, T. Wang // Journal of Vibroengineering. – 2014. – № 8. – P. 2224-2249.
6. Yapici R. Optimization of water jet pumps using numerical simulation / R. Yapici, K. Aldas // Journal of Power and Energy. – 2013. – № 6. – P. 438-449.
7. Samad A. Flow analyses inside jet pumps used for oil wells / A. Samad // International Journal of Fluid Machinery and Systems. – 2013. – Vol. 6. – № 1. – P. 1-10.
8. Паневник Д.А. Оценка напряженного состояния корпуса наддольного гидроэлеватора / Д.А. Паневник, А.С. Величкович // Нефтяное хозяйство. – 2017. – № 1. – С. 70-73.
9. Соколов Е.Я. Струйные аппараты / Е.Я. Соколов, Н.М. Зингер. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 352 с.
10. Каменев П.Н. Гидроэлеваторы в строительстве / П.Н. Каменев. – М.: Стройиздат, 1970. – 415 с.
11. Xiao L. Cavitating flow in annular jet pumps / L. Xiao, X. Long. – International Journal of Multiphase flow. – 2015. – Vol. 71. – № 5. – P. 116-132.