

УДК 622.276

М.Ю.Васильченко (Ін-т відновлюваної енергетики НАН України, Київ)

Аналіз енергетичної ефективності застосування газліфта при відкачуванні води зі свердловини

У статті проаналізовано зв'язки між основними параметрами, які характеризують роботу газліфта. Отримані результати порівнюються з даними, що наведені у технічній літературі. При певній глибині занурення змішувача газліфта побудовані залежності висоти підйому повітряно-водяної суміші, потужності компресора і коефіцієнта корисної дії газліфта від масової частки повітря в емульсії. Характер залежностей відповідає фізичним уявленням про процес газліфної експлуатації геотермальних свердловин.

В статье проанализированы связи между основными параметрами, которые характеризуют работу газлифта. Полученные результаты сравниваются с данными, которые приведены в технической литературе. При определенной глубине погружения смесителя газлифта построены зависимости высоты подъема воздушно-водяной смеси, мощности компрессора и коэффициента полезного действия газлифта от массовой доли воздуха в эмульсии. Характер зависимостей соответствует физическим представлениям о процессе газлифтной эксплуатации геотермальных скважин.

Вступ. Процеси, які відбуваються під час газліфної експлуатації геотермальних свердловин, є складними і багатофакторними. Дослідження цих процесів неможливе без встановлення зв'язків між величинами, які його характеризують.

Основним елементом, який збільшує дебіт геотермальної свердловини, є газліфт. Принцип роботи газліфта базується на явищі зниження густини рідини за рахунок введення газу, який при змішуванні з рідиною утворює емульсію, що піднімається вгору на певну висоту зливу (рис. 1). Висота піднімання емульсії в трубі визначається її густиною та глибиною занурення газліфта. Позначимо густиною емульсії $\rho_{см}$, а густиною геотермальної води ρ . За законом сполучених посудин можна визначити рівень підйому емульсії під час подачі стисненого повітря:

$$\rho \cdot H = \rho_{см} \cdot (H + h), \quad (1)$$

де H – глибина занурення газліфта; h – висота підйому рідини; $(H+h)$ – висота підйому емульсії.

Розкриємо дужки і знайдемо висоту підйому рідини h :

$$h = \left(\frac{\rho}{\rho_{см}} - 1 \right) \cdot H. \quad (2)$$

З рівняння (2) випливає, що підняття рідини на висоту h залежить від відношення $\rho/\rho_{см}$ та глибини занурення газліфта.

Як зазначається в [1, 2, 4], відношення глибини занурення башмака газліфта до загальної висоти підйому емульсії та співвідношення між $\rho/\rho_{см}$ визначає коефіцієнт корисної дії газліфта η_z , який характеризує енергоефективність даного пристрою. Ця величина залежить від багатьох факторів, а саме: витрати стисненого газу; абсолютного кінцевого тиску газу, який подається у газліфт; висоти підйому геотермальної води; глибини занурення башмака газліфта; газовмісту повітря чи іншого газу в суміші; конструкції газліфта. Цікаво прослідкувати, як ці фактори впливають на коефіцієнт корисної дії газліфта.

Попередня оцінка факторів, що впливають на роботу газліфта. На основі даних, наведених у технічній літературі [1, 3], проведено попередній аналіз та зроблено попередню оцінку енергетичної ефективності використання газліфта.

Спрощену схему газліфта наведено на рис. 1. Принцип роботи газліфної свердловини очевидний із рисунка. В якості газоподібної речовини, яка подавалась у газліфт, використовувалося повітря, що нагніталось у газліфт за допомогою компресора. Тиск повітря після компресора, згідно умови, складає понад 16 бар (таблиця 1). Геотермальна вода, яка піднімається на поверхню зі свердловини, має температуру 90°C. Глибина свердловини дорівнює 2 км, а діаметр – 0,2 м. Дебіт

геотермальної води складає 500 м³/добу. Необхідно знайти параметри, які характеризують роботу газліфта.

Таблиця 1. Вихідні дані

Тиск повітря (газоподібної речовини), що заходить у компресор, p_1	$p_1 = 1$ бар
Температура повітря, що заходить у компресор, t_1	$t_1 = 20^\circ\text{C}$
Глибина свердловини, H	$H = 2$ км
Діаметр свердловини, D	$D = 0,2$ м
Дебіт геотермальної води, V	$V = 500 \text{ м}^3/\text{добу} = 0,0058 \text{ м}^3/\text{с}$
Тиск повітря після компресора, p_2	$p_2 \geq 16$ бар
Температура геотермальної води, $t_{\text{вод}}$	$t_{\text{вод}} = 90^\circ\text{C}$

Таблиця 2. Результати розрахунків

Величина	Отримані результати
Потужність заглибного насоса	$N_{з.н} = 34,45$ кВт
Потужність компресора під час роботи газліфта	$N_c = 46,12$ кВт
Коефіцієнт корисної дії заглибного насоса	$\eta_{з.н} = 0,28$
Коефіцієнт корисної дії газліфта	$\eta_c = 0,21$

Методику отримання результатів, наведених у таблиці 2, покажемо на прикладі.

Методика оцінювання ефективності роботи газліфта. Наведені у таблиці 2 параметри, які характеризують енергетичну доцільність використання газліфта для підйому геотермальної води, можна знаходити в такій послідовності.

Спочатку задамося глибиною занурення газліфтного підйомника $H = 160$ м. Для цієї глибини занурення визначимо висоту підйому водоповітряної суміші h за формулою (2), в яку входить густина геотермальної води і водоповітряної емульсії, які треба визначити. Знаючи температуру води $t_{\text{вод}} = 90^\circ\text{C}$, вибираємо її густину за таблицями теплофізичних властивостей: $\rho = 965,3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ [7].

Знайдемо густину стисненого повітря, яке надходить у змішувач газліфта, за рівнянням реального газу:

$$\rho_2 = \frac{P_2}{R \cdot T_2 \cdot z}, \quad (3)$$

де P_2 – тиск стисненого повітря, Па; T_2 – температура стисненого повітря, К; z – коефіцієнт стисливості.

Якщо повітря стискується в охолоджувальному компресорі ($T = \text{const}$), то $T_2 = T_1 = 293$ К. Значення тиску P_2 на виході з компресора не може бути меншим за гідростатичний тиск геотермальної води, який залежить від густини води та глибини занурення газліфтного підйомника:

$$P_2 = 1,1\rho \cdot g \cdot H. \quad (4)$$

Коефіцієнт 1,1 враховує те, що стиснене повітря має подолати не тільки гідростатичний тиск стовпчика води, але й витратити енергію на подо-

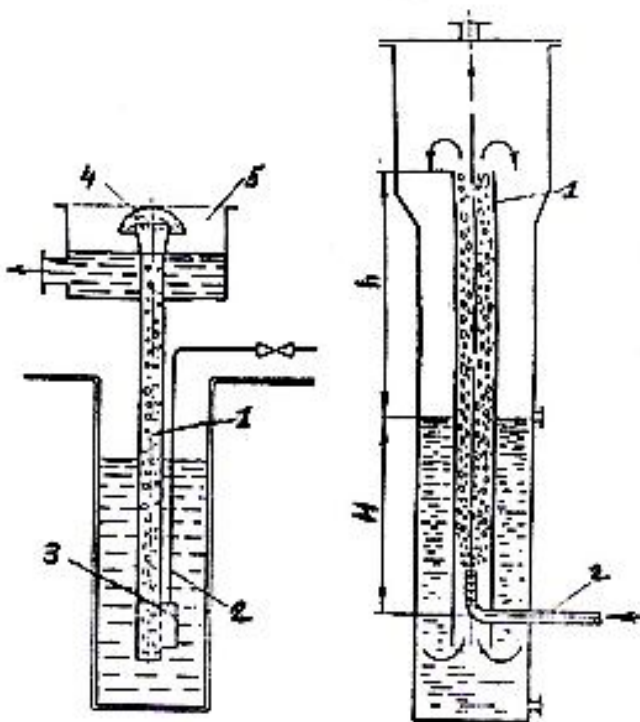


Рис. 1. Газліфтна система: 1 – піднімальна труба; 2 – труба для подавання стисненого повітря; 3 – змішувач; 4 – відбійник; 5 – збірник.

За вихідними даними були визначені такі величини: висота занурення газліфта H , питома витрата повітря $V_{\text{пит}}$, потужність на привід компресора N та коефіцієнт корисної дії газліфта η_c . Отримані результати (таблиця 2) збігаються з даними, наведеними в технічній літературі щодо роботи газліфта.

лання тертя, місцевих опорів і прискорення потоку в підйомному каналі.

Значення коефіцієнта стисливості z для повітря знаходимо з таблиць за P_2 і T_2 [9]. Густина повітряно-водяної емульсії визначається як густина суміші при певному газовмісті φ . Згідно літературних джерел $\varphi = 0,4-0,6$ [5]. Задамося $\varphi = 0,5$:

$$\rho_{см} = \rho \cdot (1 - \varphi) + \rho_2 \cdot \varphi. \quad (5)$$

Крім основних габаритних вертикальних розмірів газліфта (h, H), повинні бути задані діаметри внутрішньої та осадної труб: $\frac{d_{зн}}{d_{вн}} = \frac{50}{40}$ мм; $D_{вн} = 126$ мм і зазначені канали, в яких рухається стиснене повітря та відбувається перебіг повітряно-водяної емульсії. Будемо розглядати газліфтний підйомник із центральною подачею стисненого повітря і підйомом емульсії у кільцевому каналі між трубами.

Визначимо питому витрату зовнішнього повітря в m^3 , яка необхідна для піднімання $1 m^3$ води на висоту h , за емпіричною формулою [1]:

$$V_{num} = \frac{1,75 \cdot h}{C \cdot \lg \frac{H+10}{10}}, \quad (6)$$

де C – коефіцієнт, числове значення якого залежить від відношення $\frac{H}{H+h}$ і вибирається з таблиць за числовим значенням цього відношення [1].

Необхідність визначення V_{num} полягає в тому, що ця величина при заданому дебіті газліфтною свердловини дає змогу знайти об'ємну секундну і масову секундну витрати зовнішнього повітря.

$$V_{нов_1} = V_{num} \cdot V, \quad (7)$$

де V – дебіт газліфтною свердловини, m^3/c .

В свою чергу, масова витрата зовнішнього повітря знаходиться за формулою:

$$m_{нов} = V_{нов_1} \cdot \rho_1, \quad (8)$$

де ρ_1 – густина повітря, kg/m^3 при $t_1 = 20^\circ C$ і $p_1 = 0,1$ МПа [7].

Задаючись коефіцієнтом корисної дії охолоджувального компресора $\eta_k = 0,7$ [6], знайдемо потужність, яка необхідна на привід компресора:

$$N_k = \frac{m_{нов} \cdot l_{к_{із}}}{\eta_k}, \quad (9)$$

де $l_{к_{із}}$ – питома робота на привід охолоджувального компресора, Дж/кг.

Питому роботу на привід охолоджувального компресора визначимо за відомою формулою:

$$l_{к_{із}} = R \cdot T_1 \cdot \ln \frac{P_2}{P_1}. \quad (10)$$

Коефіцієнт корисної дії газліфта визначається відношенням енергії, необхідної на підняття $1 m^3$ рідини, до енергії, яка витрачається на стиснення питомої кількості газу до необхідного тиску P_2 .

Оцінимо величину корисної дії газліфтного пристрою в порівнянні з підйомом геотермальної води заглибним насосом [1, 3, 6]:

$$\eta_e = \frac{\rho \cdot g \cdot h \cdot (1+0,15) \cdot \eta_k}{P_1 \cdot V_{num} \cdot \ln \frac{P_2}{P_1}}. \quad (11)$$

Як відомо, коефіцієнт корисної дії – це відношення корисного ефекту до величини затрат енергії під час перебігу процесу в певному механізмі (або в газліфті, або в заглибному насосі). Корисний ефект дорівнює потужності, яку необхідно витратити під час підйому води над рівнем геотермальної води у свердловині на величину $h = 153,91$ м:

$$N_{кор} = V \cdot \rho \cdot g \cdot h \cdot (1+0,15). \quad (12)$$

Цей корисний ефект лишається однаковим як для заглибного насоса, так і для газліфта, змішувач якого занурено у воду на глибину $H = 160$ м.

Спочатку знайдемо коефіцієнт корисної дії газліфта за формулою:

$$\eta_e = \frac{N_{кор}}{N_k}. \quad (13)$$

Тепер порівняємо коефіцієнт корисної дії газліфта з коефіцієнтом корисної дії заглибного насоса, який піднімає геотермальну воду на висоту підйому повітряно-водяної емульсії у газліфті ($H+h$). Задаючись коефіцієнтом корисної дії заглибного насоса $\eta_k = 0,5$ [5], знайдемо потужність:

$$N_{з.н} = \frac{V \cdot \rho \cdot g \cdot (H+h) \cdot 1,15}{\eta_{з.н}}. \quad (14)$$

Знайдемо коефіцієнт корисної дії заглибного насоса, коли висота підйому геотермальної води дорівнює висоті підйому емульсії у газліфті:

$$\eta_{з.н} = \frac{N_{кор}}{N_{з.н}} \quad (15)$$

Аналогічні дослідження були проведені для інших значень газовмісту: $\varphi = 0,3; 0,4; 0,5; 0,6$ при $H = 160$ м та $V = 500 \frac{м^3}{добу}$ (таблиця 3).

Таблиця 3. Результати досліджень ефективності роботи газліфта

$\varphi, \%$	$h, м$	$N, кВт$	$\eta_z, \%$
30	78,12	14,172	29,2
40	103,36	26,385	25,1
50	153,91	46,115	21,4
60	228,96	78,414	18,7

На основі отриманих результатів побудовано графічні залежності $h = f(\varphi)$, $N = f(\varphi)$ та $\eta_z = f(\varphi)$ (рис. 2, 3, 4).

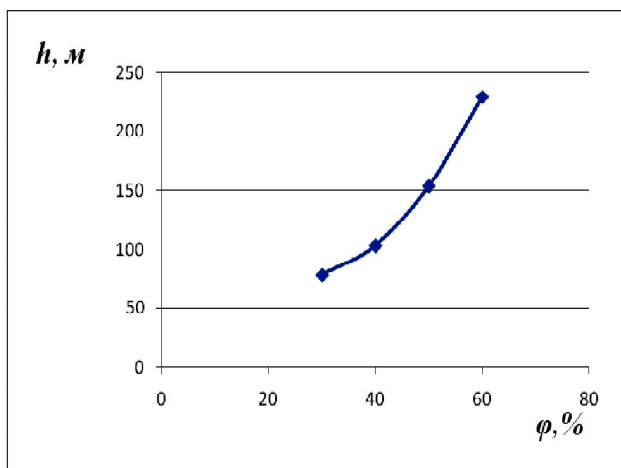


Рис. 2. Залежність висоти підйому повітряно-водяної суміші від масової частки повітря.

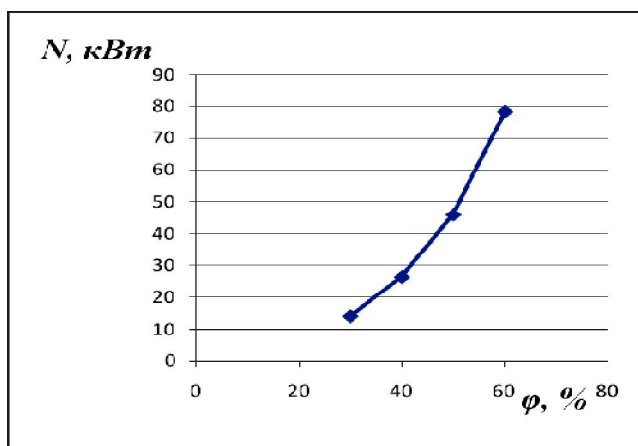


Рис. 3. Залежність потужності компресора під час роботи газліфта від масової частки повітря в суміші.

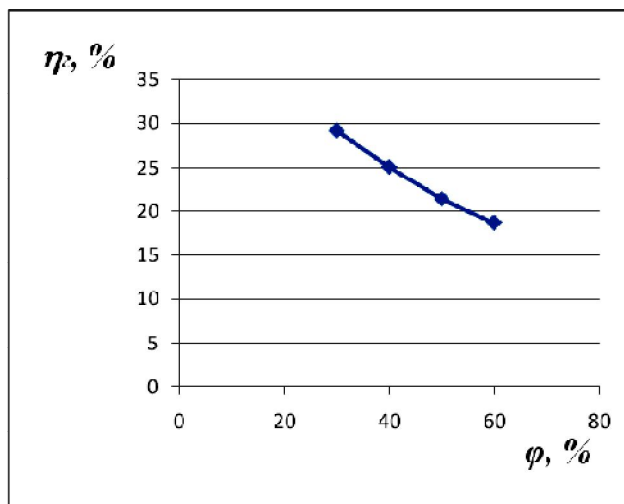


Рис. 4. Залежність коефіцієнта корисної дії газліфта від масової частки повітря в суміші.

Характер отриманих графічних залежностей збігається з фізичними уявленнями про процес, а саме: при постійному дебіті газліфтною свердловини та сталій глибині занурення змішувача газліфта зі збільшенням кількості повітря в суміші висота підйому геотермальної води збільшується, що приводить до збільшення енергії, яка витрачається на привід компресора, та зменшує коефіцієнт корисної дії газліфта.

Розрахунок гідравлічних опорів каналів газліфта. Всі попередні висновки були прийняті з урахуванням того, що $P_2 \geq 1,1\rho \cdot g \cdot H$. Тобто енергія стисненого повітря витрачається на подолання не тільки гідростатичного стовпчика геотермальної води, але й на подолання сил тертя, місцевих опорів та прискорення рідини.

Треба перевірити, чи виконується вимога для збільшення тиску на подолання тертя, опорів і прискорення: $\Delta P_{роз} \leq 0,1\rho \cdot g \cdot H$. І якщо ця вимога виконується, то потрібно з'ясувати відносну похибку між заданими і розрахованими величинами:

$$\delta(\Delta p)\% = \frac{\Delta p_{роз}}{\Delta p} \cdot 100\% \quad (16)$$

Визначимо площу перерізу каналів газліфтного підйомника:

$$f_{тр} = \varphi \cdot \frac{\pi d_{ен}^2}{4} \quad (17)$$

де φ – коефіцієнт, який враховує зменшення перерізу руху води внаслідок наявності газових бульбашок.

Оскільки, згідно з даними літературних джерел, об'ємний газоміст становить: $\varphi = 0,4-0,6$ [5], то для даного коефіцієнта приймаємо значення $\varphi = 0,5$.

Задані втрати тиску на подолання тертя, місцевих опорів і прискорення у піднімальному кільцевому каналі:

$$\Delta p = (1,1-1)\rho \cdot g \cdot H. \quad (18)$$

Розрахункове значення втрат тиску в піднімальному каналі знаходиться за формулою:

$$\Delta p_{роз} = \Delta p_{тр} + \Delta p_{м.о} + \Delta p_{пр}, \quad (19)$$

де $\Delta p_{тр}$ – втрати тиску на подолання тертя у каналі; $\Delta p_{м.о}$ – втрати тиску на подолання місцевих опорів; $\Delta p_{пр}$ – втрати тиску на прискорення потоку геотермальної води.

Щоб обчислити складові рівняння (19), необхідно знайти швидкість руху геотермальної води (емульсії) у підйомному каналі. За рівнянням суцільності та нерозривності маємо:

$$W_{см} = \frac{V}{f_{мп}}. \quad (20)$$

Згідно літературних даних:

$$\Delta p_{тр} = \lambda \cdot \frac{l}{d_{ек}} \cdot \frac{\rho \cdot W^2}{2}, \quad (21)$$

де $d_{ек}$ – еквівалентний діаметр каналу, м; l – висота піднімання водоповітряної емульсії ($l=H+h$), м; λ – коефіцієнт тертя.

Значення еквівалентного діаметра каналу залежить від площі поперечного перерізу кільцевого каналу та периметра змочування:

$$d_{ек} = \frac{4f_{мп}}{\Pi}. \quad (22)$$

Коефіцієнт тертя є функцією режиму течії суміші у каналі, який характеризується числом Рейнольдса (Re) та відносною шорсткістю (e).

Число Рейнольдса знайдемо за відомою залежністю:

$$Re = \frac{W_{см} \cdot d_{ек}}{V_{см}}, \quad (23)$$

де $V_{см}$ – коефіцієнт кінематичної в'язкості суміші повітря та геотермальної води, м²/с.

Коефіцієнти кінематичної в'язкості повітря та води при температурі $t_{вод} = 90^\circ\text{C}$ знаходяться за таблицями теплофізичних властивостей речовин [7, 8] і дорівнюють: $V_{нов} = 31,9 \cdot 10^{-6} \frac{\text{M}^2}{\text{с}}$;

$V_{вод} = 0,326 \cdot 10^{-6} \frac{\text{M}^2}{\text{с}}$. Для повітряно-водної емульсії $V_{см}$ буде складати:

$$V_{см} = V_{вод}(1-\varphi) + V_{нов} \cdot \varphi. \quad (24)$$

Обчислимо число Re у піднімальному кільцевому каналі. Оскільки $Re_{см} > 2300$, то у кільцевому каналі маємо турбулентний режим течії. Тепер знайдемо відносну шорсткість:

$$e = \frac{\Delta}{d_{ек}}, \quad (25)$$

де $\Delta = 0,1 \cdot 10^{-3}$ м – абсолютна шорсткість каналу, м. Визначається висотою виступів шорсткості у мм і залежить від часу експлуатації каналу.

Знайдемо зону тертя і виберемо залежність для розрахунку $\lambda_{мп}$ [5, 6, 8]. Оскільки $Re_{см} = 2,594 \cdot 10^6 > 560 \cdot \frac{1}{e} = 560 \cdot 759,9 = 425544$, то зона тертя автотельна і $\lambda_{мп}$ розраховується за формулою:

$$\lambda_{мп} = 0,11 \cdot e^{0,25}. \quad (26)$$

Втрати тиску на подолання місцевих опорів у кільцевому каналі знаходяться за рівнянням:

$$\Delta p_{м.о} = \sum_{i=1}^n \xi_i \frac{\rho_{см} \cdot W_{см}^2}{2}, \quad (27)$$

де $\sum_{i=1}^n \xi_i = 6,6$ – сума коефіцієнтів місцевих опорів (вхід у канал – 0,5; вихід із каналу – 1,0; відкритий запорний вентиль – 5,1) [5].

Втрати тиску на прискорення потоку геотермальної води:

$$\Delta p_{пр} = \frac{\rho \cdot W_{см}^2}{2}. \quad (28)$$

Сумарні втрати тиску на подолання тертя, місцеві опори і прискорення складають:

$$\Delta p_{роз} = 6454,79 + 491,15 + 146 = 7091,94 \text{ Па}.$$

Ці втрати тиску не повинні перевищувати 10% P_2 . Перевіримо цю умову:

$$\frac{\Delta p_{роз}}{\Delta p} = \frac{7091,94}{166494,9} = 0,0425 \approx 4,2\%$$

Тобто $\Delta p_{роз}$ складає приблизно 4% від Δp заданого, і газліфтний підйомник може працювати.

Аналогічні дослідження були виконані для інших значень об'ємного газовмісту: $\varphi = 0,3; 0,4; 0,5; 0,6$ (таблиця 4). Тобто було знайдено переріз газліфтного підйомника, швидкість руху геотермальної води та гідравлічні втрати руху рідини.

Таблиця 4. Результати досліджень гідравлічних опорів каналів газліфта

$\varphi, \%$	$f_{mp}, м$	$W_{см}, м/с$	$\Delta p_{роз}, Па$
30	0,0056	0,94	11744,23
40	0,00713	0,78	9865,12
50	0,00928	0,55	7091,94
60	0,013	0,39	5248,31

На основі отриманих результатів було побудовано наступні графічні залежності: $f_{mp} = f(\varphi)$;

$W_{см} = f(\varphi)$; $\Delta p_{роз} = f(\varphi)$ (рис. 5, 6, 7).

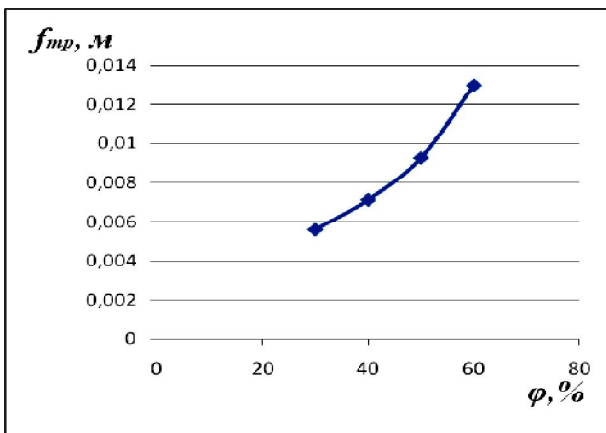


Рис. 5. Залежність перерізу газліфтного підйомника від газовмісту повітряно-водяної суміші.

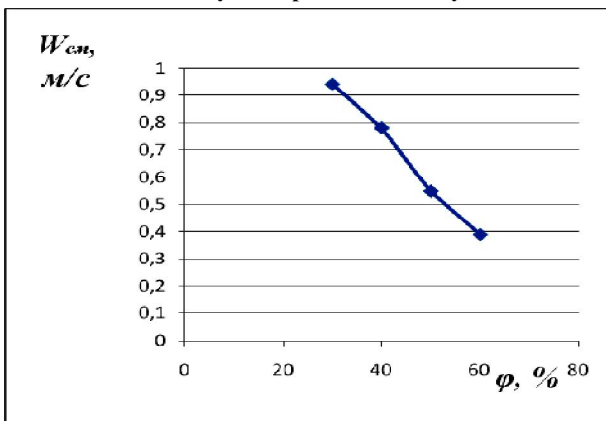


Рис. 6. Залежність швидкості руху геотермальної води від газовмісту повітряно-водяної суміші.

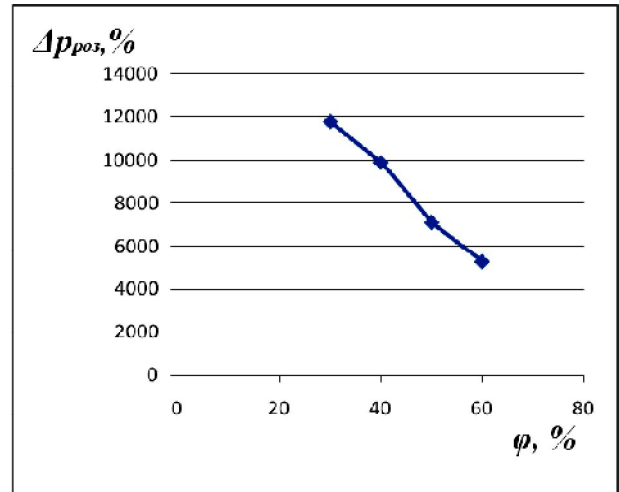


Рис. 7. Залежність гідравлічних втрат руху рідини від газовмісту повітряно-водяної суміші.

Можна зробити висновок, що збільшення коефіцієнта φ приводить до зменшення швидкості руху геотермальної води та гідравлічних втрат руху рідини, хоча живий переріз газліфтного підйомника при цьому збільшується.

Гідравлічні опори при підніманні води за допомогою заглибного насоса. Під час проведення аналізу ми задавались умовою, що при роботі заглибного насоса гідравлічні втрати, згідно формули (11), дорівнювали:

$$\Delta p_n = \rho \cdot g \cdot h \cdot 0,15. \quad (29)$$

Будемо вважати, що геотермальна вода піднімається у нагнітальному трубопроводі насоса діаметром $d = 100$ мм. Тоді знайдемо швидкість піднімання:

$$W_n = \frac{V}{\frac{\pi d^2}{4}}. \quad (30)$$

Знайдемо гідравлічні втрати при підніманні води заглибним насосом за рівнянням:

$$\Delta p_{н.роз} = \Delta p_{н.тр} + \Delta p_{н.м.о} + \Delta p_{н.пр}. \quad (31)$$

Проведемо аналогічні обчислення за формулами:

$$\begin{aligned} \Delta p_{н.тр} &= \lambda_{mp} \frac{h}{d_{ек}} \cdot \frac{\rho \cdot W_n^2}{2}; \\ \Delta p_{н.м.о} &= \sum_{i=1}^n \xi_i \frac{\rho \cdot W_n^2}{2}; \\ \Delta p_{н.пр} &= \frac{\rho \cdot W_n^2}{2}. \end{aligned} \quad (32)$$

Відмітимо, що для трубопроводів $d_{ек} = d = 100$ мм. Знайдемо число Рейнольдса:

$$Re_n = \frac{W_n \cdot d_{ек}}{V_{вод}} \quad (33)$$

Якщо $Re_{см} > 2300$, то це турбулентний режим течії. Визначимо зону тертя:

$$10 \cdot \frac{1}{e} < Re_n < 560 \cdot \frac{1}{e};$$

$$10000 < 226678,1 < 560000.$$

Це зона змішаного тертя, для якої:

$$\lambda_{тр} = 0,11 \left(e + \frac{68}{Re_n} \right)^{0,25} \quad (34)$$

Сумарні гідравлічні втрати тиску дорівнюють:

$$\Delta p_{н.роз} = 9278,37 + 1739,69 + 263,55 = 11281,6 \text{ Па}.$$

Очевидно, що $\Delta p_{н.роз} \ll \Delta p_n$, яке задається, і гідравлічні опори не завадять роботі насоса.

Висновки. 1. Проведені дослідження показали, що результати реалізації запропонованої методики розрахунку газліфтів задовільно збігаються з результатами, які наведені у технічній літературі.

2. При певній глибині занурення змішувача газліфта побудовані залежності висоти підйому повітряно-водяної суміші, потужності компресора під час роботи газліфта і коефіцієнта корисної дії газліфта від масової частки повітря в емульсії. Характер залежностей $h = f(\varphi)$; $N = f(\varphi)$; $\eta_z = f(\varphi)$ відповідає фізичним уявленням про процес газліфтноі експлуатації геотермальних свердловин.

3. Введено коефіцієнт φ , який враховує зменшення перерізу руху води внаслідок наявності газових бульбашок. Цей коефіцієнт впливає на площу поперечного перерізу газліфтного підйомника, на швидкість руху геотермальної води у підйомному каналі та на величину гідравлічних втрат на подолання тертя, місцевих опорів і прискорення потоку геотермальної води. Побудовано графічні залежності $f_{тр} = f(\varphi)$; $W_{см} = f(\varphi)$;

$\Delta p_{роз} = f(\varphi)$. Проаналізувавши залежності, можна зробити висновок, що збільшення коефіцієнта φ приводить до зменшення швидкості руху геотермальної води та гідравлічних втрат руху рідини. Причому, живий переріз газліфтного підйомника збільшується.

4. Коефіцієнт корисної дії газліфта показує відношення потужності заглибного насоса, яка необхідна для підняття геотермальної води на певну висоту, до потужності охолоджувального компресора, що витрачається для роботи газліфта при підйомі повітряно-водяної емульсії на ту ж саму висоту. Під час підйому дебіт геотермальної свердловини і заглибного насоса повинні бути однаковими. Урахування гідравлічних втрат у підйомній трубі заглибного насоса здійснюється додаванням $0,15h$.

5. При роботі промислових газліфтів процеси є набагато складнішими, а параметри, які їх характеризують, змінюються в широких межах. Тобто процеси, які відбуваються під час газліфтноі експлуатації геотермальних свердловин, є складними та багатофакторними, і при їх розрахунках потрібна велика кількість одноманітних повторюваних обчислень.

1. *Товажнянський Л.Л.* Процеси та апарати хімічної технології. – Харків: НТУ "ХПІ", 2007. – 616 с.
2. *Редько А.А.* Методи підвищення ефективності систем геотермального теплоснабження. – Макеевка: ДонНАСА, 2010. – 302 с.
3. *Мищенко И.Т.* Расчеты в добыче нефти. – М.: 1989. – 185 с.
4. *Удыма П.Г.* Аппараты с погружными горелками, изд. 2-е, доп. И перераб. – М.: Машиностроение, 1973. – 272 с.
5. *Дытнерский Ю.И.* Основные процессы и аппараты химической технологии. – М.: Химия, 1981. – 812 с.
6. *Касаткин А.Г.* Основные процессы и аппараты химической технологии. – М.: Химия, 1973. – 596 с.
7. *Краснощеков Е.А.* Задачник по теплопередаче. – М.: Энергия, 1969. – 264 с.
8. *Чеботарьев В.О.* Технічна термодинаміка. Підручник. – К.: Вища школа, 1969. – 204 с.
9. *Кислород.* Справочник. Часть 1. Под редакцией Глиманенко Д.Л. – М.: Металлургия, 1967. – 420 с.