

УДК 66.023

ВПЛИВ ГАЗОВІСТУ РІДИНИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛАБІРИНТНО- ГВИНТОВОГО НАСОСА

І.І. Білокінь

Помічник директора з науково-технічної інформації*

Контактний тел.: (0572) 95-43-64

Ю.М. Стеценко

Заступник генерального директора*

Контактний тел.: (0572) 93-00-82

В.А. Макагон

Начальник відділу науки і техніки*

Контактний тел.: (057) 77-88-303, факс: (0572) 93-00-82

В.Ф. Кошевий

Начальник дослідної лабораторії*

Контактний тел.: (057) 77-88-303, факс: (0572) 93-00-82

*Закрите акціонерне товариство СП "ХЕМЗ-ІРЕС"

вул. Індустріальна, 15а, м. Харків, ГСП-61066

П.М. Андренко

Доктор технічних наук, професор**

Контактний тел.: (057) 707-61-28

А.Ю. Лебедев

Молодший спеціаліст**

Контактний тел.: (057) 707-61-28

**Кафедра гідропневмоавтоматики і гідроприводу

Національний технічний університет "Харківський

політехнічний інститут"

вул. Фрунзе, 21, м. Харків, 61002

Описано експериментальний стенд та наведено результати експериментальних досліджень впливу газовмісту рідини на характеристики лабіринтно-гвинтового насоса. Отримана аналітична залежність для розрахунку його робочої характеристики

Ключові слова: лабіринтно-гвинтовий насос, експериментальний стенд, робоча характеристика, газовміст

Описан экспериментальный стенд и приведены результаты экспериментальных исследований влияния газосодержания жидкости на характеристики лабиринтно-винтового насоса. Получена аналитическая зависимость для расчета его рабочей характеристики

Ключевые слова: лабиринтно-винтовой насос, экспериментальный стенд, рабочая характеристика, газосодержание

The experimental stand is described and results of experimental researches of influence of the contents of gas of liquids on characteristics of the labyrinth-screw pump are resulted. Analytical dependence for calculation of its working characteristics is received

Key words: the labyrinth-screw pump, the experimental stand, a working characteristics, contents of gas

Вступ

Високі напори при роботі на малов'язких рідинах, конструктивна простота та відсутність безпосереднього контакту і тертя між деталями визначили можливість використання лабіринтно-гвинтових насосів в якості змішувачів (деспергаторів) на вході свердловинних відцентрових насосів, які використовуються при видобутку нафти. Вони отримують все більше розповсюдження у промисловості, особливо у тих її галузях, де ведуться роботи з ускладнюючими факторами і потрібний порівняно високий напір при малих подачах. Досить складною і мало вивченою областю є робота насосів на суміші води з повітрям та маслоповітряній-водяній суміші. Саме усуненню цієї вади присвячена дана стаття.

Аналіз літературних джерел

Методам проектування та дослідження лабіринтно-гвинтових насосів присвячені роботи Голубева

А.І., Зозулі І.І., Нестеренко В.Б., Grabowa G. та ін. Значний внесок в дослідження роботи насосів на газорідинних сумішах з великим вмістом газової складової виконано на кафедрі прикладної гідроаеромеханіки Сумського державного університету під керівництвом завідувача кафедрою проф. Євтушенка А.О., наприклад роботи [2, 3]. Але в даних роботах не розглядаються лабіринтно-гвинтові насоси. Конструкціям відцентрових насосів для подачі рідин з великим газовмістом присвячена стаття [4]. Але в ній відсутній аналіз впливу газовмісту робочої рідини (РР) на робочі характеристики насосів. Найбільш повно ці питання знайшли висвітлення в монографії А.І. Голубева [1]. В ній наведена методика розрахунку характеристик лабіринтно-гвинтових насосів, що працюють на газорідинній емульсії. Говориться про добрий збіг теоретичних розрахунків з експериментальними даними, однак результати експериментів не наведено. При проведенні експериментальних досліджень газ та рідина подавалися до насоса через окремі входи, що не відповідає реальним умовам роботи насоса. Відмічено, що розроблена методика потребує

уточнення на основі розробки та експериментального дослідження подібних насосів.

Проведений нами аналіз літературних джерел дозволив встановити, що експериментальні дослідження, щодо впливу газовмісту РР на характеристики лабіринтно-гвинтового насоса не знайшло в них належного висвітлення. Таким чином, проведення таких досліджень є актуальним науковим завданням, вирішення якого відкриває шлях до удосконалення конструкцій лабіринтно-гвинтових насосів та поліпшення їх робочих характеристик.

Задачі дослідження

Метою даної статті є встановлення впливу газовмісту РР на характеристики лабіринтно-гвинтового насоса.

Експериментальний стенд

Його спроектовано за замкнутою схемою циркуляції робочої рідини (рис. 1). Відмінною особливістю спроектованого стенда є те, що його оснащено баком змішування води з маслом БЗМ, диспергатором Д, для розпилювання повітря в РР та системою подачі повітря (ресивером Р, дроселем ДР7) з датчиком витрати В1. На всмоктувальному і напірному трубопроводах розміщені прилади виміру витрати робочої рідини В2 та стисненого повітря В1, манометри МН1 і МН2 для виміру тиску на вході та виході лабіринтно-гвинтового насоса (НЛГ).

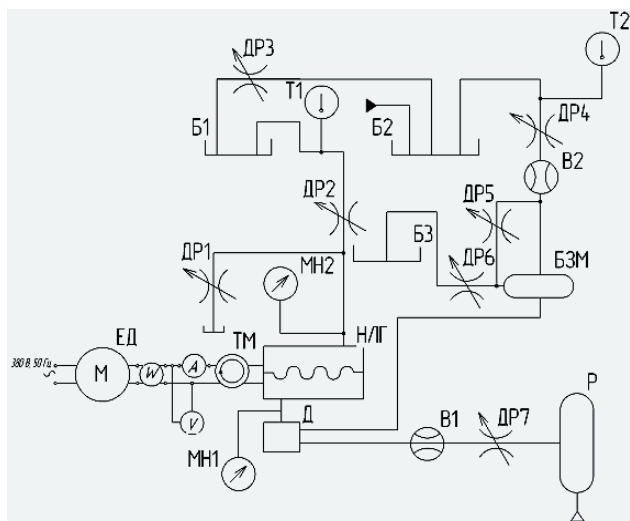


Рис. 1. Гідравлічна схема експериментального стенда

РР, вода чи вода з поверхньоактивними речовинами (ПАР), з баку Б2 надходить до баку змішувача БЗМ, де змішується з маслом, яке надходить з баку Б3. Витрату РР та масла регулюють дроселями ДР4 та ДР6 відповідно. З БЗМ РР надходить до диспергатора Д, де змішується з повітрям, і далі на вхід НЛГ. Навантаження НЛГ, тиск на його виході, регулюється дроселем ДР2. Дросель ДР1 використовують для зливу РР з мережі. Вимірювання витрати РР здійснювали мірним баком Б1 та секундоміром. Дросель

ДР3 служить для зливу РР з мірного баку Б1 в бак Б2. Температуру РР контролюють термометрами Т1 та Т2. Таке виконання стенда передбачає дослідження роботи насоса на воді, на суміші води з повітрям та масло-повітряно-водяній суміші, та дозволяє з достатньою точністю визначати процент повітря в масло-повітряно-водяній суміші.

Обертання НЛГ здійснюється електродвигуном ЕД, частота обертання якого контролюється тахометром ТМ, а електричні параметри: ватметром W, амперметром А та вольтметром V.

Спроекований стенд забезпечує: максимальний тиск нагнітання – 1,2 МПа; напір – 0 – 100 м; максимальну витрату: води – $2,084 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$; повітря – $1,435 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ при споживаній потужності, не більше ніж 5,0 кВт. Стенд оснащено вимірювальними приладами. Діапазон вимірювання: температури – 0 – 150°C, клас точності 1,0; потужності – 0,3 – 5,0 кВт, клас точності 1,0. Гранична похибка вимірюваних параметрів не перевищує величин, відповідно до ГОСТ 11828–86.

Експериментальні дослідження

Вони проводилися на лабораторному стенді СП ЗАТ “ХЕМЗ–ІРЕС”. Досліджували макет лабіринтно-гвинтового насоса з робочими органами: втулка Ø62×112×10 лів. (номінальний діаметр внутрішньої розточки 62 мм, крок нарізки одного витка 112 мм, число заходів нарізки 10, нарізка ліва); гвинт Ø61×112×10 прав.; довжина проточної частини – 112 мм. Нарізка робочих органів насоса мала форму півкола з діаметром 4,5 мм, ширина верхівок нарізок – $0,8 \pm 0,4$ мм. В якості РР використовували воду та воду з додаванням 1% ПАР, яка за своїми фізико-хімічними властивостями найбільш наближена до пластової рідини нафтових свердловин. При проведенні всіх серій експериментів температура РР була постійною та рівною 5 – 7°C.

При розробці методики досліджень для зменшення кількості дослідів здійснювали планування експерименту. Проводили двофакторний активний експеримент. Використовували рототабельний план другого порядку, який, на відміну від ортогональних, дозволяє передбачити функцію відгуку з однаковою дисперсією на рівних відстанях від центру плану. Це забезпечує інваріантність плану при обертанні системи координат відносно центра. Планування експерименту здійснювали шляхом додавання точок до ядра. При цьому, виконували додаткову кількість дослідів в центрі плану (на нульовому рівні) та на відстані d від центра (рис. 2). Зіркове плече вибирали з таблиці роботи [5] за умови інваріантності плану до обертання. Експерименти проводили таким чином, щоб кожний фактор варіювався на трьох рівнях. На першому етапі проводили кодування факторів згідно з табл. 1. Вимірювали витрату на виході з насоса, тиск на його вході і виході та потужність на вході електродвигуна.

Зв'язок між кодовим та натуральним виразом факторів здійснювали за формулою

$$x_i = (X_i - x_{i0}) / \delta_i, \quad (1)$$

де X_i – натуральне значення фактора; x_{i0} – значення i -го фактора на нульовому рівні; δ_i – інтервал варіювання i -го фактора.

На другому етапі з роботи [5] визначили дані для побудови центрального композиційного рототабельного плану другого порядку для двофакторного експерименту. Ядро плану – 2^2 , число точок: зіркових – 4; на нульовому рівні – 5; загальна кількість – 13; величина плеча d для зіркових точок – 1,414. Провели центральне композиційне рототабельне планування другого порядку для двофакторного експерименту (табл. 2). Зауважимо, що паралельні досліді передбачалися для оцінки відтворення дослідів та визначення статистичних оцінок. Виключали грубі вимірювання, використовуючи критерій Стюдента.

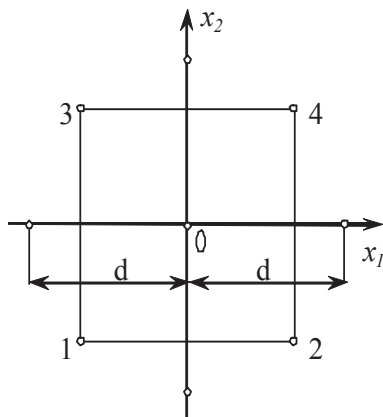


Рис. 2. Побудова плану експерименту

Таблиця 1

Кодування факторів

Інтервал варіювання та рівень факторів	Витрата на виході з насоса – q , м ³ /доб	Газовміст РР – z , %
Нульовий рівень, $x_i = 0$	50	2,5
Інтервал варіювання, δ_i	15	2,5
Нижній рівень, $x_i = -1$	35	0
Верхній рівень, $x_i = +1$	65	5,0
Кодове позначення	x_1	x_2

Таблиця 2

Центральне композиційне рототабельне планування другого порядку для двофакторного експерименту

Дослід	x_0	x_1	x_2	x_1^2	x_2^2	$x_1 x_2$	y
Планування типу 2^2	+1	-1	-1	+1	+1	-1	20
	+1	+1	-1	+1	+1	+1	24,5
	+1	-1	+1	+1	+1	-1	19,3
	+1	+1	+1	+1	+1	+1	19,5
Зіркові точки	+1	-1,414	0	2	0	0	19
	+1	+1,414	0	2	0	0	20,9
	+1	0	-1,414	0	2	0	20,3
	+1	0	+1,414	0	2	0	21,7
Нульові точки	+1	0	0	0	0	0	20,9
	+1	0	0	0	0	0	21,5
	+1	0	0	0	0	0	20,4
	+1	0	0	0	0	0	20,7
	+1	0	0	0	0	0	21,3

На третьому етапі, згідно з розробленим планом, реалізували серію експериментів. При цьому, напір на виході з насоса H розраховували за формулою, яка враховує конструктивні параметри насоса та стенда, а також схему експериментальної установки [6]

$$H = 0,102 \frac{P_{m2} - P_{m1}}{\rho} + 0,827 q^2 \left(\frac{1}{d_2^4} - \frac{1}{d_1^4} \right) + \Delta Z_m ;$$

де q – подача, м³/с; H – напір, м; P_{m2}, P_{m1} – показники приборів вимірювання тиску рідини відповідно на вході та виході з насоса, Па; ρ – густина рідини, що перекачується, кг/м³; d_1, d_2 – внутрішній діаметр відповідно підвідного і відвідного трубопроводів у місцях вимірювання тиску, м; ΔZ_m – відстань по вертикалі між відмітками положення приборів вимірювання тиску на вході та виході насоса, м.

Як видно з отриманих результатів (рис. 3), при наявності газової складової в РР робоча характеристика насоса має явно виражений оптимум. Крім цього, ККД насоса зміщується в бік менших витрат (рис. 4), при практично однаковому його значенні при витраті, меншій за оптимальну. Порівняння отриманих експериментальних даних з теоретичними, розрахованими за методикою з роботи [1], показало, що похибка не перевищує 2%.

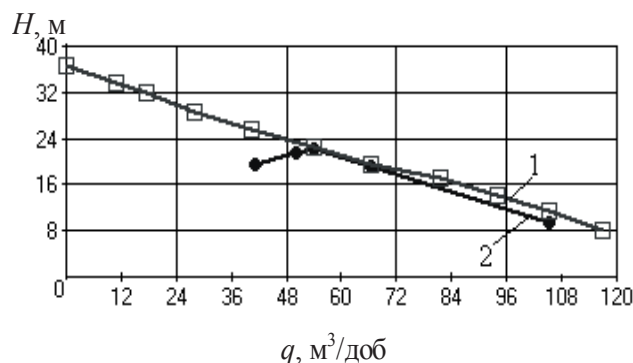


Рис. 3. Робоча характеристика насоса, РР вода+0,1% ПАР: 1 – газовміст 0%; 2 – газовміст 2,5%

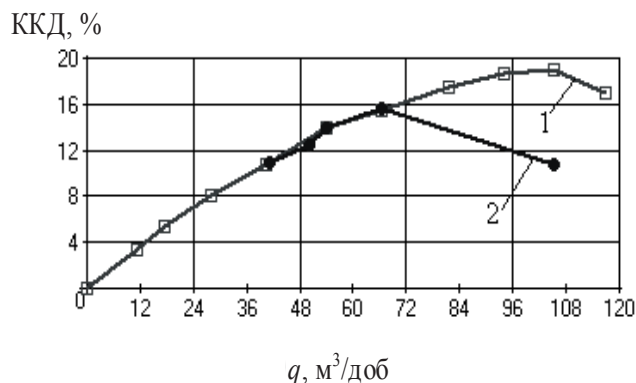


Рис. 4. ККД насоса, РР вода+0,1% ПАР: 1 – газовміст 0%; 2 – газовміст 2,5%

За результатами експерименту заповнювали останній стовпець табл. 2, де замість y підставляли його значення – напір на виході з насоса H . Функцію відгуку визначали за поліномом [5]

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i<j} b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2 + \dots, \quad (2)$$

де b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii} – коефіцієнти регресії, які визначали за результатами експериментів по формулах:

$$b_0 = \delta'_0 \sum_{u=1}^n y_u - \delta''_0 \sum_{u=1}^n \sum_{i=1}^k x_{iu}^2 y_u; \quad (3)$$

$$b_i = \delta_i \sum_{u=1}^n x_{iu} y_u; \quad (4)$$

$$b_{ij} = \delta_{ij} \sum_{u=1}^n x_{iu} x_{ju} y_u; \quad (5)$$

$$b_{ii} = \delta'_{ii} \sum_{u=1}^n x_{iu}^2 y_u + \delta''_{ii} \sum_{i=1}^k \sum_{u=1}^n x_{iu}^2 y_u - \delta'''_{ii} \sum_{u=1}^n y_u. \quad (6)$$

В формулах (3) – (6) u – номер дослідів, рядка в протоколі досліджень (табл. 2); i – номер стовпця в матриці планування експерименту; k – число факторів; n – загальне число дослідів; значення δ брали з табл. 3.

Таблиця 3

Значення δ для розрахунку коефіцієнтів регресії при рототабельному плануванні другого порядку для двофакторного експерименту [5]

b_0		b_i	b_{ij}	b_{ii}		
δ'_0	δ''_0	δ_i	δ_{ij}	δ'_{ii}	δ''_{ii}	δ'''_{ii}
0,200000	0,100000	0,125000	0,250000	0,125000	0,018750	0,100000

В результаті обробки експериментальних даних отримали функцію відгуку

$$y = 15,806 + 0,275x_1 + 1,567x_2 - 0,0313x_1x_2 - 0,00158x_1^2 + 0,0272x_2^2 \quad (7)$$

Використовували формулу (1) із залежності (7) отримали значення функції відгуку – робочу характеристику насоса через натуральні значення факторів

$$H = 12,018 + 0,2755q + 1,1455z - 0,0313qz - 0,00158q^2 + 0,0272z^2, \quad (8)$$

де H – напір, м; q – витрата РР на виході з насоса, м³/добу; z – газовміст РР, %.

Розрахунок похибок вимірювання здійснювався за використанням статистичних методів. Похибку дослідів визначали з експерименту в центрі плану, використовували методику, наведену в роботі [5]. Розраховували дисперсію, яка характеризує розсіювання результатів дослідів,

$$s_0^2 = S_0 / (n_0 - 1), \quad (9)$$

де $S_0 = \sum_{u=1}^{n_0} (y_{0u} - \bar{y}_0)^2$; n_0 – кількість дослідів в центрі плану; y_{0u} і \bar{y}_0 – відповідно результат u -того дослідів і середній результат дослідів у центрі плану.

Визначали загальну залишкову суму квадратів плану

$$S_{\text{зар}} = \sum_{u=1}^n (y_u - y_{\text{у раз}})^2.$$

Згідно розрахунків $S_{\text{зар}} = 9,8128$.

Розраховували дисперсію адекватності, яка характеризується сумою $S_{\text{ад}} = S_{\text{зар}} - S_0$, яка за розрахунками становила 5,6088, та числом ступенів свободи $f_{\text{ад}} = n - \frac{(k+2)(k+1)}{2} - (n_0 - 1)$, $f_{\text{ад}} = 3$. Таким чином, дисперсія адекватності – $s_{\text{ад}}^2 = S_{\text{ад}} / f_{\text{ад}} = 2,3671$.

За критерієм Кохрена перевіряли відтворення процесу. Встановлено, що умова відтворення процесу виконується. Перевірка адекватності даних, отриманих за допомогою математичної моделі, з експериментальними, проводилась за критерієм Фішера. Розраховували критерій Фішера $F = s_{\text{ад}}^2 / s_0^2 = 3,4888$. Так як, розрахований за результатами експерименту критерій Фішера менший за табличний $F_{(0,05,3,7)} = 4,3468$, визначений за таблицями [5], то модель адекватна.

Висновки

Вперше, за результатами експериментальних досліджень, отримано функцію відгуку – робочу характеристику лабиринтно-гвинтового насоса, яка може бути використана при визначенні оптимальних параметрів робочого процесу. Доведена її адекватність. При наявності газової складової у РР робоча характеристика насоса має явно виражений оптимум, причому ККД насоса зміщується в бік менших витрат при практично однаковому його значенні при витраті меншій за оптимальну.

Література

1. Голубев А.И. Лабиринтно-винтовые насосы и уплотнения для агрессивных сред / А.И. Голубев. – М.: Машиностроение, 1981. – 112 с.
2. Евтушенко А.А. Коэффициент полезного действия свободновихревого насоса типа “Туго” при работе на чистой жидкости и на газожидкостной смеси / А.А. Евтушенко, С.В. Сапожников, В.А. Соляник // Вестник НТУУ “КПИ”: Машиностроение, 1999. – Вып. 36. – Т. 1. – С. – 249 – 255.
3. Сапожников С.В. Перекачивание газожидкостных смесей динамическими насосами / С.В. Сапожников // Праці ІІ Респуб. наук.-техн. конф. “Гідроаеромеханіка в інженерній практиці”. – Черкаси: ЧІТІ, 1998. – С. –81 – 86.
4. Конструкции центробежных насосов для подачи жидкостей с высоким газосодержанием / ВЦП. – № М – 16078. – Пер. ст. Kosmowski J. из журн.: British Pump Manufacturers Association. Technical Conference. – Cambridges. – 1983. – № 8. – Р. 159-169.
5. Винарский М.С. Планирование эксперимента в технических исследованиях / М.С. Винарский, М.В. Лурье. – М.: Техника, 1975. – 168 с.
6. ГОСТ 6134 – 87. Насосы динамические. Методы испытаний. – М.: Изд. стандартов, 1987. – 29 с.