

А. С. РОГОВИЙ, А. О. НЕСКОРОЖЕНИЙ, Є. І. ТІМЧЕНКО, В. С. АНДРІЄВСЬКА, М. А. ЯРОШЕНКО

ЗАЛЕЖНІСТЬ КОЕФІЦІЄНТА КОРИСНОЇ ДІЇ ВИХОРОКАМЕРНОГО ЕЖЕКТОРА ВІД ЙОГО ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ

Знос і зниження ефективності роботи нагнітачів з рухомими робочими органами призводить до того, що стає доцільними використовувати струминні апарати в багатьох технологічних процесах. Використання властивостей закручених потоків, таких як зниження тиску на осі, призвело до створення вихрових ежекторів, проте їхні енергетичні показники та ККД знижені у порівнянні з класичними прямооточними струминними насосами та ежекторами. Розв'язанням цієї проблеми може бути використання більш досконалих принципів передавання енергії та технічних рішень у конструюванні струминних нагнітачів на основі вихрової камери. Такими нагнітачами є вихорокамерні нагнітачі, які завдяки використанню відцентрової сили, мають кращу, порівняно з вихровими ежекторами, енергетичну ефективність. Метою роботи є знаходження залежності коефіцієнта корисної дії вихорокамерного ежектора від його геометричних параметрів на основі методів планування експерименту. Дослідження складалося з трьох етапів: експериментальне дослідження роботи вихорокамерного ежектора однорідного середовища з початковими для оптимізації геометричними параметрами вихрової камери та каналів підводу, й відводу. На другому етапі проведено математичне моделювання на основі розв'язання рівнянь Рейнольдса, із використанням SST-моделі турбулентності. Далі проведено порівняння експериментальних даних з результатами розрахунку. Оптимізація параметрів за допомогою моделі другого порядку дозволила знайти максимальне значення ККД вихорокамерного ежектора, яке дорівнює 16 %. Геометричні параметри, що обрано як фактори: відносна висота та діаметр вихрової камери, відносний діаметр каналу живлення. Найбільший вплив на ККД має відносна висота вихрової камери. Значущість отриманих коефіцієнтів рівнянь регресії перевірено за допомогою *t*-критерію Стьюдента.

Ключові слова: вихорокамерний ежектор, планування експерименту, рівняння регресії, геометричні параметри, числовий розрахунок, ефективність.

A. ROGOVYI, A. NESKORozHENYI, Ye. TIMCHENKO, V. ANDRIIEVSKA, M. YAROSHENKO

DEPENDENCE OF THE EFFICIENCY OF A VORTEX CHAMBER EJECTOR ON ITS GEOMETRIC PARAMETERS

The wear and decreased efficiency of superchargers with moving impellers make using jet devices in many technological processes advisable. Using the properties of swirling flows, such as reduced axial pressure, has created vortex ejectors. Still, their energy performance and efficiency are reduced compared to classical direct-flow jet pumps and ejectors. The solution to this problem may be the use of more advanced energy transfer principles and technical solutions in the design of vortex chamber-based jet superchargers. Such superchargers are vortex chamber superchargers, which, due to the use of centrifugal force, have better energy efficiency than vortex ejectors. The aim of this work is to determine the dependence of the efficiency of a vortex chamber ejector on its geometric parameters based on the design of the experiment. The study consisted of three stages: an experimental study of the vortex chamber ejector operation in a homogeneous medium with the initial geometric parameters of the vortex chamber and the supply and discharge channels for optimization. In the second stage, mathematical modeling was performed based on solving the Reynolds equations using the SST turbulence model. Next, the experimental data were compared with the calculation results. The optimization of parameters using the second-order model allowed us to find the maximum value of the efficiency of the vortex chamber ejector, which is equal to 16 %. The geometric parameters selected as factors are the relative height and diameter of the vortex chamber, the relative diameter of the supply channel. The relative height of the vortex chamber has the greatest influence on the efficiency. The significance of the obtained coefficients of the regression equations was tested using Student's *t*-test.

Keywords: vortex chamber ejector, design of experiment, regression equation, geometric parameters, numerical calculation, efficiency.

Вступ. Надійність і довговічність нагнітачів, які добре зарекомендували себе під час роботи на однорідних середовищах, значно знижуються під час перекачування гетерогенних [1]. Гетерогенні середовища мають у своєму складі тверді абразивні частинки або повітря, що приводить до швидкого зношування елементів насосів або до значного погіршення характеристик. Так, у багатьох галузях промисловості, динамічні насоси швидко виходять з ладу внаслідок впливу різних несприятливих чинників з боку робочих середовищ і особливостей технологічного процесу [2]. Особливо гостро питання зносу стоїть у галузях промисловості, де доводиться перекачувати сипучі матеріали або робочі середовища сильно забруднені [3]. У цьому випадку рухомі робочі органи нагнітачів швидко зношуються внаслідок абразивного зносу. Середнє напрацювання на відмову динамічних насосів на гірничо-збагачувальних комбінатах становить близько 700–2000 год [4]. Крім того, перекачування гетерогенних середовищ призводить до значного зниження показників

ефективності нагнітачів.

Аналіз останніх досліджень. Знос і зниження ефективності роботи нагнітачів з рухомими робочими органами [5] призводить до того, що стає доцільними використовувати струминні апарати в багатьох технологічних процесах [6]. Однак, струминні прямооточні нагнітачі, хоча й мають порівняно з іншими струминними апаратами, високий ККД, що досягає 30 %, мають значні поздовжні розміри, що в деяких технологічних процесах ускладнює їхнє компонування [7]. З іншого боку, використання властивостей закручених потоків [8], таких як зниження тиску на осі, призвело до створення вихрових ежекторів, проте їхні енергетичні показники та ККД були знижені [9] у порівнянні з класичними прямооточними струминними насосами та ежекторами [10]. Крім того, вихрові ежектори не мають можливості перекачування твердих середовищ через особливості робочого процесу, в якому частинки з більшою густиною концентруються на периферії, а змішаний потік повинен виходити біля осі вихрової

камери. Таким чином, удосконалення енергетичних характеристик струминних нагнітачів є актуальною проблемою. Розв'язанням цієї проблеми може бути використання більш досконалих принципів передавання енергії та технічних рішень у конструюванні струминних нагнітачів на основі вихрової камери. Такими нагнітачами є вихорокамерні нагнітачі [11], які завдяки використанню відцентрової сили, мають кращу, порівняно з вихровими ежекторами, енергетичну ефективність [12].

У роботах, присвячених струминним нагнітачам із вихровою камерою змішування, не було проведено оптимізації геометричних параметрів нагнітача з метою отримання оптимальних характеристик [3; 11; 12]. Тому, на сьогодні, немає розуміння які саме геометричні розміри каналів та вихрової камери вибирати для конструкції з роботою в бездренажному режимі, крім того, що канал живлення повинен бути меншим за площею за канал виходу. Конструкція, запропонована в [11], має недоліки, пов'язані з наявністю скидання середовища в дренажний канал. Автори [11] обґрунтували ефективність застосування вихорокамерних нагнітачів під час перекачування сипких середовищ і провели експериментальні дослідження, що довели їхні кращі характеристики, порівняно з іншими струминними нагнітачами з вихровою камерою, проте не знайдено залежності енергетичних показників від геометричних параметрів.

Мета. Метою роботи є знаходження залежності коефіцієнта корисної дії вихорокамерного ежектора від його геометричних параметрів на основі методів планування експерименту.

Результати досліджень. Дослідження складалося з трьох етапів: на першому етапі було проведено експериментальне дослідження роботи вихорокамерного ежектора (ВКЕ) однорідного середовища з початковими для оптимізації геометричними параметрами вихрової камери та каналів підводу та відводу. На другому етапі проведено математичне моделювання на основі розв'язання рівнянь Рейнольдса, із використанням SST-моделі турбулентності. Після чого проведено порівняння експериментальних даних з результатами розрахунку і зроблено висновок про адекватність математичного моделювання. Тому що математичне моделювання дозволяє визначати характеристики ВКЕ значно швидше ніж експериментальне дослідження, то вирішено зміну геометричних параметрів робити не для фізичного експерименту, а за допомогою математичної моделі. Тому, на третьому етапі проведено планування числового експерименту, виділено чинники і функцію мети (ККД ежектора), отримано рівняння регресії, що дало змогу визначити залежність ККД від геометричних параметрів ежектора.

Повний трифакторний експеримент [13; 14] реалізовано для дослідження впливу відносного діаметра вихрової камери $\bar{D} = D / d_{in}$, її відносної висоти $\bar{H} = H / d_{in}$ та відносного діаметра каналу живлення ежектора $\bar{d}_s = d_s / d_{in}$ на ККД ежектора η .

Ці три фактори обрані як основні, що впливають на ККД на основі експериментальних досліджень та зміни діаметрів каналів ежектора [15]. Крім того, попередні дослідження бездренажного варіанта ежектора показали вплив лише двох факторів: діаметра вихрової камери та відносного діаметра каналу живлення ежектора. З іншої сторони, саме зміна площі вхідного тангенціального каналу приводить до зміни робочого процесу у ВКЕ, тому неврахування її впливу було б недоцільним [3]. Для оцінки впливу зазначених факторів і математичного опису використано на першому етапі модель першого порядку виду:

$$\eta = b_0 + b_1 \bar{H} + b_2 \bar{D} + b_3 \bar{d}_s + b_{12} \bar{H} \bar{D} + b_{13} \bar{H} \bar{d}_s + b_{23} \bar{D} \bar{d}_s + b_{123} \bar{H} \bar{D} \bar{d}_s. \quad (1)$$

Ця модель є найпростішою моделлю першого порядку й дає змогу оцінити вплив факторів на функцію цілі.

Значення обраних рівнів варіюваних факторів наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Значення обраних рівнів факторів, що варіюються

Рівень факторів, що варіюються	Позначення кодоване	$\bar{H}$	$\bar{D}$	$\bar{d}_s$
		x_1	x_2	x_3
Основний рівень	0	2,83	7,08	0,8
Інтервал варіювання	Δx_i	1,2	3	0,1
Верхній рівень	+1	4,06	10,08	0,9
Нижній рівень	-1	1,63	4,08	0,7

Внаслідок того, що під час розрахунку спостерігалися невеликі коливання витрат та інших інтегральних показників роботи за ітераціями, то для кожного дослідження обирали три значення для ітерацій, які відповідали максимальній, мінімальній та середній витратам у каналі всмоктування ежектора. Такі коливання часто спостерігаються під час числового розрахунку гідравлічних та пневматичних машин, та можуть бути обумовлені нестационарністю можливих відривів рідини від твердих стінок [16; 17]. Для числового розрахунку течії нестисливої рідини використовували програмний комплекс AnsysCFX [18; 19] зі студентською ліцензією та обмеженням в 0,5 мільйони елементів сітки для розрахунку рівнянь Рейнольдса, нестисливості та моделі турбулентності SST. Математичну модель наведено в [20]. Використано коригування на кривизну ліній струму й обертання потоку. Під час моделювання як граничні умови задавали повний тиск на вході в каналі живлення, статичний тиск у каналах всмоктування і виходу [21]. Це дозволяло в процесі розрахунку визначити витрати в усіх каналах, потім порівняти ці значення з експериментальними та зробити висновок про адекватність розрахунку та достатність кількості сіткових елементів. Сітка складалася з тетраедральних і призматичних елементів загальною кількістю не більше ніж 0,5 млн, що було достатньо для отримання точних результатів

згідно з проведенням аналізом чутливості розв'язку [22]. Задачу розв'язували в статичній постановці, і процес обчислення закінчувався після досягнення невязань рівнянь величини 10^{-5} із забезпеченням постійних витрат у всіх каналах протягом 100 ітерацій [23] або виділення періодичності зміни витрати за постійної амплітуди.

Результати експерименту наведено в табл. 2, де η_1, η_2, η_3 відповідають трьом значенням, що відповідали максимальній, мінімальній та середній витратам у каналі всмоктування ежектора. s_u^2 – дисперсія паралельних дослідів.

Таблиця 2 – Результати визначення ККД ежектора для різних точок матриці

№	ККД у відсотках				s_u^2
	η_1	η_2	η_3	$\bar{\eta}$	
1	11,9	11,6	12	11,8	0,039
2	5,5	5,1	5,9	5,50	0,16
3	10,3	10,0	10,8	10,4	0,18
4	3,5	3,3	3,7	3,50	0,04
5	11,5	11,4	11,8	11,6	0,05
6	0	0	0	0,00	0
7	0	0	0	0,00	0
8	0,55	0,4	0,6	0,52	0,01
Разом					0,48

Середнє значення ККД ежектора за паралельними дослідом визначалося за формулою:

$$\bar{\eta}_i = \frac{1}{r} \sum_{i=1}^r \eta_{li} = \frac{11,9+11,6+12}{3} = 11,8.$$

Дисперсію паралельних дослідів визначали за формулою на прикладі для першого рядка матриці:

$$s_i^2 = \frac{1}{r-1} \sum_{i=1}^r (\eta_{li} - \bar{\eta}_i)^2 = \frac{0,01+0,04+0,028}{2} = 0,039.$$

Для визначення можливості проведення регресійного аналізу розраховано однорідність дисперсій паралельних дослідів за критерієм Кохрена [24]:

$$G_p = \frac{s_{u \max}^2}{\sum_{u=1}^N s_u^2} = \frac{0,18}{0,48} = 0,375.$$

Розрахункове значення критерію порівнювали з табличним для ступенів вільності: чисельника $f_1 = r - 1$ (кількість паралельних дослідів – 1, що дорівнювало 2), знаменника $f_2 = N$ (кількість дослідів у матриці – 8) і відповідно за обраного рівня значущості $\alpha = 0,05$ $G_{table} = 0,5157 > G_p = 0,375$. Отже, гіпотеза про однорідність дисперсій паралельних дослідів приймається [25]. Звідси дисперсія відтворюваності дорівнює

$$s^2(\eta) = \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N s_u^2 = \frac{0,48}{8} = 0,06.$$

$$\text{Помилка експерименту} - s(\eta) = \sqrt{s^2(\eta)} = 0,24.$$

Коефіцієнти рівняння (1) для кодіваних факторів (змін x_1, x_2, x_3 відбувається в діапазоні $[-1; 1]$):

$$\eta = 5,41 - 3,03x_1 - 1,81x_2 - 2,39x_3 + 1,44x_1x_2 + 0,27x_1x_3 - 0,95x_2x_3 + 1,58x_1x_2x_3. \quad (2)$$

Перевірку статистичної значущості коефіцієнтів проводили за допомогою t -критерію. Для повного факторного експерименту помилки всіх коефіцієнтів дорівнюють між собою і визначаються

$$s(b_i) = \frac{s(\eta)}{\sqrt{Nr}} = \frac{0,24}{\sqrt{8 \cdot 3}} = 0,05.$$

Довірчий інтервал довжиною $2\Delta b_i$: $\Delta b_i = t_{cr}s(b_i) = 2,12 \cdot 0,05 = 0,106$. Критичне значення t_{cr} обирали для числа ступенів вільності (16) і прийнятому рівні значущості 0,05. Усі коефіцієнти виявилися статистично значущими.

Отримане рівняння (2) перевіряли на адекватність. У табл. 3 подано результати розрахунку дисперсії адекватності. Гіпотезу про адекватність рівняння (2) перевіряли за формулами

$$s_{ad}^2 = \frac{r}{N-\lambda} \sum_{u=1}^N (\bar{\eta}_u - \hat{\eta})^2 = 0;$$

$$F = \frac{s_{ad}^2}{s^2(\eta)} = \frac{0,000356}{0,06} = 0,006 < 1.$$

Таблиця 3 – Перевірка адекватності рівняння (2)

№ досл.	$\bar{\eta}_u$	$\hat{\eta}$	$\bar{\eta}_u - \hat{\eta}$	$(\bar{\eta}_u - \hat{\eta})^2$
1	11,83	11,8	0,013	0,000178
2	5,50	5,5	0	0
3	10,37	10,37	-0,013	0,000178
4	3,50	3,5	0	0
5	11,57	11,57	0,0067	0
6	0,00	0	0	0
7	0,00	0	0	0
8	0,52	0,517	-0,003	0
Разом				0,000356

Для приведення рівняння (2) до вигляду з натуральними значеннями факторів використано формули кодування, підставляючи в рівняння (2) замість кодіваних натуральні значення факторів:

$$\eta = -38,8 + 17,5\bar{H} + 10,6\bar{D} + 79,7\bar{d}_s - 3,1\bar{H}\bar{D} - 28,7\bar{H}\bar{d}_s - 15,4\bar{D}\bar{d}_s + 4,38\bar{H}\bar{D}\bar{d}_s. \quad (3)$$

На рис. 1 наведено залежність відносного ККД ВКЕ від факторів. Усі значення ККД віднесено до максимального значення (11,8 %) отриманого за формулою (3) у заданому діапазоні зміни факторів.

На підставі отриманих результатів та аналізу рівнянь (2) і (3) можна зробити такі висновки:

1. Зі збільшенням відносних висоти вихрової камери, її діаметра і діаметра каналу живлення ККД ежектора зменшується (тому що коефіцієнти за всіх

чинників негативні в рівнянні (2)), причому найбільший вплив чинить відносна висота вихрової камери за обраних рівнів варіювання.

2. Поряд із лінійними ефектами значущими виявилися також і ефекти взаємодії. Для збільшення ККД необхідно прагнути при зменшенні діаметра вихрової камери зменшувати її висоту і діаметр каналу живлення.

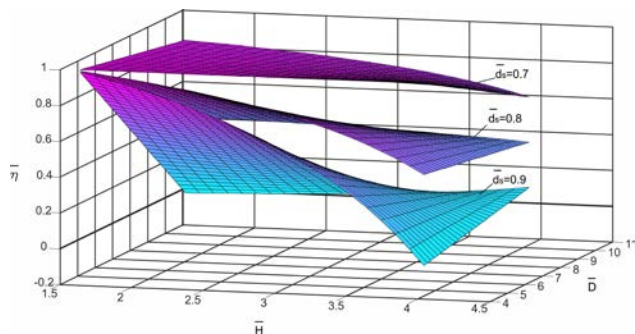


Рис. 1. Залежність відносного до максимального ККД ВКН від відносних висоти, діаметра вихрової камери для різних відносних діаметрів каналу живлення

Часто, на другому етапі досліджень використовують плани другого порядку через неможливість детального дослідження області оптимуму за допомогою планів першого порядку на локально-лінійному наближенні поверхні відгуку. Доцільно провести дослідження шляхом розширення матриці планування за допомогою «зіркових» точок, що дозволяє отримати інформацію про лінійні, квадратичні та ефекти взаємодії.

Таким чином, для оцінки впливу факторів і математичного опису використано модель другого порядку виду:

$$\eta = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i \neq j}^k b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k b_i x_i^2. \quad (4)$$

В табл. 4 наведено рівні факторів із «зірковими» точками.

Таблиця 4 – Значення обраних рівнів факторів, що варіюються

Рівень факторів, що варіюються	Позначення кодоване	$\bar{H}$	$\bar{D}$	$\bar{d}_s$
		x_1	x_2	x_3
Основний рівень	0	2,83	7,08	0,8
Інтервал варіювання	Δx_i	1,2	3	0,1
Верхній рівень	+1	4,06	10,08	0,9
Нижній рівень	-1	1,63	4,08	0,7
Зіркові точки (-)	-1,41	1,14	2,85	0,66
Зіркові точки (+)	+1,41	4,52	11,3	0,94

Згідно розробленому плану із заданим значенням «зіркових» точок $\alpha = 1,41$ реалізовано 18 експериментів, 4 дослідження виконано в центрі області для збереження рівнів «зіркових» точок у подальших дослідженнях із додаванням четвертого фактора. В табл. 5 представлена матриця планування та результати експерименту.

Таблиця 5 – Результати визначення ККД ежектора для різних точок матриці

№	Матриця планування			η		$\bar{\eta}_u - \hat{\eta}$
	$\bar{H}$	$\bar{D}$	$\bar{d}_s$	$\bar{\eta}_u$	$\hat{\eta}$	
1	-1	-1	-1	11,8	12,7	-1,12
2	1	-1	-1	5,3	2,67	2,43
3	-1	1	-1	10,2	9,15	0,85
4	1	1	-1	3,4	4,98	-1,68
5	-1	-1	1	11,5	10,2	1,16
6	1	-1	1	0	1,3	-1,3
7	-1	1	1	0	2,88	-2,88
8	1	1	1	0,48	0	0,58
9	-1,41	0	0	16,1	14,7	1,31
10	1,41	0	0	5,37	5,5	-0,11
11	0	-1,41	0	3,65	4,59	-0,86
12	0	1,41	0	3,08	1	2,04
13	0	0	-1,41	7,86	8,4	-0,46
14	0	0	1,41	4,62	3	1,65
15	0	0	0	7,34	7,6	-0,27
16	0	0	0	7,36	7,6	-0,26
17	0	0	0	7,3	7,6	-0,27
18	0	0	0	7,33	7,6	-0,25

На другому етапі досліджень для скорочення кількості експериментів кожна точка повторювалася двічі. Однорідність дисперсій паралельних досліджень перевірено за критерієм Бартлета (табл. 6):

$$B = \frac{2,303}{c} \left[f \lg s^2(y) - \sum_{u=1}^N f_u \lg s_u^2 \right], \quad (5)$$

де $f_u = r_u - 1$ – число ступенів вільності u -го дослід;
 r_u – кількість паралельних вимірювань u -го дослід;
 f – число ступенів вільності всього експерименту;

$$c = 1 + \frac{1}{3(N-1)} \left(\sum_{u=1}^N \frac{1}{f_u} - \frac{1}{f} \right) =$$

$$= 1 + \frac{1}{3(15-1)} \left(\frac{14}{1} + \frac{1}{7} - \frac{1}{21} \right) = 1,34.$$

Дисперсія:

$$s^2(y) = \frac{\sum_{u=1}^N f_u s_u^2}{\sum_{u=1}^N f_u} = \frac{0,26}{21} = 0,0124.$$

Середня квадратична помилка:

$$s(y) = \sqrt{s^2(y)} = 0,11.$$

$$B = \frac{2,303}{c} \left[f \lg s^2(y) - \sum_{u=1}^N f_u \lg s_u^2 \right] =$$

$$= \frac{2,303}{1,34} [21 \cdot (-1,9) - (-50,4)] = 17,9.$$

Отримане значення критерію порівнювалося з табличним $B_{table} = 22,4$ за рівня значущості 0,05 та

ступенях вільності $f_1 = 14$ (кількість дослідів у матриці – 1, що дорівнювало 14). Тому що $B < B_{table}$, гіпотеза про однорідність дисперсій паралельних досвідів підтверджена.

Таблиця 6 – Перевірка адекватності рівняння

№ досл.	$\bar{\eta}_u$	s_u^2	f_u	$f_u \lg s_u^2$
1	11,8	0,045	1	-1,35
2	5,50	0,08	1	-1,1
3	10,4	0,045	1	-1,35
4	3,50	0,02	1	-1,7
5	11,6	0,005	1	-2,3
6	0,00	0,0001	1	-4
7	0,00	0,0001	1	-4
8	0,52	0,01125	1	-1,95
9	16,1	0,005	1	-2,3
10	5,37	0,005	1	-2,3
11	3,65	0,0128	1	-1,89
12	3,08	0,0032	1	-2,5
13	7,86	0,0128	1	-1,9
14	4,62	0,0018	1	-2,7
15–18	7,33	0,00189	7	-19,1
Разом			21	-50,4

Дисперсії коефіцієнтів рівняння регресії:

$$s^2(b_i) = \frac{s^2(\bar{y})}{2^k + 2\alpha^2} = \frac{0,0124}{12} = 0,00103;$$

$$s^2(b_{ij}) = \frac{s^2(\bar{y})}{2^k} = \frac{0,0124}{8} = 0,00155;$$

$$s^2(b_{ii}) = \frac{s^2(\bar{y})}{2^k(1 - X_i') + 2\alpha^2(1 + \alpha^2)} = \frac{0,0124}{8} = 0,00155;$$

$$s^2(b_0) = \frac{s^2(\bar{y})}{N} + \bar{X}_i'^2 \sum_{i=1}^k s^2(b_{ii}) = \frac{0,0124}{18} + \frac{2}{3} \cdot 3 \cdot 0,00155 = 0,00379;$$

$$s(b_i) = 0,0321; \quad s(b_{ij}) = 0,0394;$$

$$s(b_{ii}) = 0,0394; \quad s(b_0) = 0,0616.$$

Значущість отриманих коефіцієнтів рівняння регресії перевіряли за допомогою t -критерію Стюдента. Коефіцієнт вважали значущим за умови $|b_i| > ts(b_i)$, де t -критерій для довірчої ймовірності 0,95 та ступенів вільності (18) $t = 2,1$. Таким чином максимальне значення умови для b_0 : $ts(b_0) = 2,1 \cdot 0,0616 = 0,13$, що вказує на те, що всі коефіцієнти рівняння регресії виявилися значущими.

Остаточне рівняння регресії другого порядку для другої серії експериментів:

$$\eta = 7,66 - 3,27x_1 - 1,28x_2 - 1,91x_3 + 1,45x_1x_2 + 0,275x_1x_3 - 0,95x_2x_3 + 1,26x_1^2 - 2,44x_2^2 - 0,97x_3^2. \quad (6)$$

Після використання замість кодових натуральних

значень факторів:

$$\eta = -39,7 - 13,4\bar{H} + 4,805\bar{D} + 152\bar{d}_s + 0,403\bar{H}\bar{D} - 2,29\bar{H}\bar{d}_s - 3,17\bar{D}\bar{d}_s + 0,875\bar{H}^2 - 0,271\bar{D}^2 - 97\bar{d}_s^2. \quad (7)$$

На рис. 2 наведено залежність другого порядку відносного ККД ВКЕ від факторів. Усі значення ККД віднесено до максимального значення (16,7 %) отриманого за формулою (7) у заданому діапазоні зміни факторів.

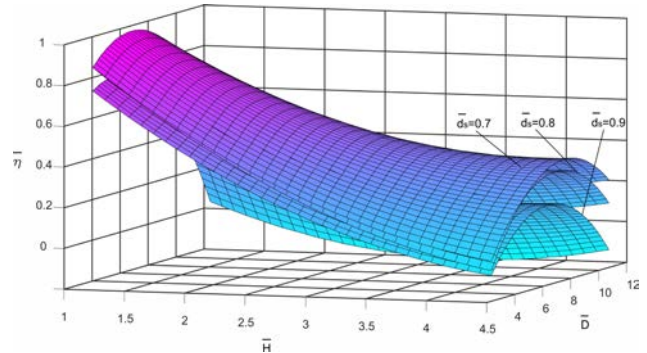


Рис. 2. Залежність відносного ККД ВКН від відносних висоти, діаметра вихрової камери для різних відносних діаметрів каналу живлення (модель другого порядку)

Дослідження рівняння регресії (7) дозволило знайти максимальне значення ККД ВКЕ, яке дорівнює 16 %. Це значення знайдено на границі досліджуваної області за параметром відносної висоти вихрової камери й відповідає $\bar{D} = 5,65$, $\bar{H} = 1,14$ та $\bar{d}_s = 0,7$. Таким чином, після першої частини досліджень на основі планування експерименту та моделі першого порядку ККД підвищено на 62 % з 7,3 % до 11,8 %, після другої частини досліджень та розширення досліджуваної області й використання моделі другого порядку ККД ще підвищено на 40 % з 11,8 % до 16,7 %. Потребує подальшого дослідження вплив відносної висоти вихрової камери за рахунок збільшення області дослідження або руху за градієнтом, що стане темою подальших досліджень.

Висновки. На основі методів планування експерименту знайдено залежності коефіцієнта корисної дії вихорокамерного ежектора від його геометричних параметрів. Експеримент проведено числовим шляхом. Перевірено адекватність отриманих лінійної та моделі другого порядку.

Лінійна залежність ККД від відносних висоти, діаметра вихрової камери для різних відносних діаметрів каналу живлення дозволила встановити, що зі збільшенням відносних висоти вихрової камери, її діаметра і діаметра каналу живлення ККД ежектора зменшується, причому найбільший вплив чинить відносна висота вихрової камери за обраних рівнів варіювання.

Для подальшої оптимізації параметрів збільшено область значень факторів та отримано модель другого порядку, яка дозволила знайти максимальне значення ККД ВКЕ, яке дорівнює 16 %. Це значення відповідає $\bar{D} = 5,65$, $\bar{H} = 1,14$ та $\bar{d}_s = 0,7$.

Список літератури

1. Фатєєва Н. М., Шевченко Н. Г., Фатєєв О. М. Надійність гідропневмоагрегатів металорізального устаткування. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv: NTU "KhPI". 2016. No. 41 (1213). P. 84–87.
2. Antonenko S., Sapozhnikov S., Kondus V., Chernobrova A., Mandryka A. Creation a universal technique of predicting performance curves for small-sized centrifugal stages of well oil pump units. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 1741, 012011. doi: 10.1088/1742-6596/1741/1/012011
3. Роговий А. С. Концепція створення вихорокамерних нагнітачів та принципи побудови систем на їх основі. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. Северодонецьк: Вид-во ЧНУ ім. Володимира Даля. 2017. № 3 (233). С. 168–173.
4. Chernetskaya-Beletskaya N., Rogovyi A., Baranov I., Krut A., Miroshnikova M., Bragin N. Increasing the efficiency of highly concentrated coal-water fuel based on the simulation of non-Newtonian fluid flow. *MATEC Web of Conferences*. 2019. Vol. 294. P. 01009.
5. Wang J., Li K., Feng L. Tracing the technological trajectory of coal slurry pipeline transportation technology: An HMM-based topic modeling approach. *Frontiers in Energy Research*. 2022. Vol. 10. P. 974747. doi: 10.3389/fenrg.2022.974747
6. Zhang J., Geng J., Yang S., Cheng F., Zhu G., Wang C., Yang Z., Lyu Y. Influence of geometric parameters on the performance of ejector used in aeroengine air system. *Thermal Science and Engineering Progress*. 2023. Vol. 37. P. 101571. doi: 10.1016/j.tsep.2022.101571
7. Baha V., Pavlenko I., Židek K., Cizak O. Ensuring the Abrasive Jet Machining Efficiency Using a Nozzle with a Perforated Insert. *Machines*. 2024. Vol. 12, issue 5. P. 347. doi: 10.3390/machines12050347
8. Melentiev R., Fang F. Recent advances and challenges of abrasive jet machining. *CIRP Journal of Manufacturing Science and technology*. 2018. Vol. 22. P. 1–20.
9. Panevnyk D. Simulation of a downhole jet-vortex pump's working process. *Nafta-Gaz*. 2021. Vol. 77 (9). P. 579–586.
10. Merzliakov I., Pavlenko I., Chekh O., Sharapov S., Ivanov V. Mathematical modeling of operating process and technological features for designing the vortex type liquid-vapor jet apparatus. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing II: Proc. of the 2nd Int. Conf. on Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange, DSMIE-2019 (11–14 June 2019, Lutsk, Ukraine)*. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Cham: Springer, 2020. P. 613–622.
11. Rogovyi A., Neskorozhenyi A., Krasnikov S., Tynyanova I., Khovanskyi S. Improvement of Vortex Chamber Supercharger Performances Using Slotted Rectangular Channel. *Advanced Manufacturing Processes IV: Selected Papers from the 4th Grabchenko's Int. Conf. on Advanced Manufacturing Processes, InterPartner 2022 (6–9 September 2022, Odessa, Ukraine)*. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Cham: Springer, 2023. P. 552–561. doi: 10.1007/978-3-031-16651-8_52
12. Сьомін Д. О., Роговий А. С. Вплив умов входу середовища, що перекачується, на енергетичні характеристики вихорокамерних насосів. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv: NTU "KhPI". 2015. No. 3 (1112). P. 130–136.
13. Yurko I., Bondarenko G. A new approach to designing the S-shaped annular duct for industrial centrifugal compressor. *International Journal of Rotating Machinery*. 2014. ID 925368. 10 p. doi: 10.1155/2014/925368
14. Antony J. *Design of experiments for engineers and scientists*. Elsevier, 2023. 294 p.
15. Rogovyi A., Neskorozhenyi A., Panamariova O., Zoria M., Khovanskyi S. Hydrodynamic Characteristics of Pumping Bulk Materials Using Vortex Chamber Ejectors. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing VI: Proc. of the 6th Int. Conf. on Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange, DSMIE-2023. Vol. 2: Mechanical and Materials Engineering (6–9 June 2023, High Tatras, Slovak Republic)*. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Cham: Springer, 2023. P. 148–157. doi: 10.1007/978-3-031-32774-2_15
16. ANSYS, C. R22. 1 Help manual. ANSYS Inc. 2022.
17. Besagni G., Inzoli F. Computational fluid-dynamics modeling of supersonic ejectors: Screening of turbulence modeling approaches. *Applied Thermal Engineering*. 2016. Vol. 117. P. 122–144.
18. Rezvaya K., Cherkashenko M., Drankovskiy V., Tynyanova I., Makarov V. Using mathematical modeling for determination the optimal geometric parameters of a pump-turbine water passage. *2020 IEEE 4th International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS) (2020, Istanbul)*. Istanbul: IEEE, 2020. P. 212–216. doi: 10.1109/IEPS51250.2020.9263139
19. Rezvaya K., Krupa E., Shudryk A., Drankovskiy V., Makarov V. Solving the hydrodynamical tasks using CFD programs. *2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS) (2018, Kharkiv)*. Kharkiv: IEEE, 2018. P. 205–209. doi: 10.1109/IEPS.2018.8559548
20. Smirnov P. E., Menter F. R. Sensitization of the SST turbulence model to rotation and curvature by applying the Spalart-Shur correction term. *Journal of Turbomachinery*. 2009. Vol. 131, issue 4. P. 1–8. doi: 10.1115/1.3070573
21. Шевченко Н. Г., Калюжний В. В., Андрієвська В. С. Чисельне моделювання течії технологічної рідини у трубах котлобінгової установки. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv: NTU "KhPI". 2023. No. 1. P. 60–65. doi: 10.20998/2411-3441.2023.1.10
22. Krupa E., Rezvaya K., Makarov V. Parameter Estimation of Hydraulic Equipment of Hydro-Electric Power Station Based on Numerical Simulation of the Spatial Flow. *Conf. Proc. 2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek) (13–17 September 2021, Kharkiv, Ukraine)*. Kharkiv, 2021. P. 681–685.
23. Myronov K., Dmytriienko O., Basova Y., Rezvaya K., Vorontsov S. Improving the Energy Performance of a High-Head Francis Turbine. *Int. Conf. on Reliable Systems Engineering, ICoRSE 2023. Vol. 762 (7–8 September 2023, Bucharest, Romania)*. Lecture Notes in Networks and Systems. Cham: Springer, 2023. P. 66–77. doi: 10.1007/978-3-031-40628-7_5
24. Antoska Knights V., Millaku J. Three-factor experimental design as a tool in applied statistics. *International Journal of Statistics and Applied Mathematics*. 2023. Vol. 8, issue 1. P. 46–49. doi: 10.22271/math.2023.v8.i1a.929
25. Engel A. *Verification, validation, and testing of engineered systems*. John Wiley & Sons, 2010. 720 p. doi: 10.1002/9780470618851

References (transliterated)

1. Fatieieva N. M., Shevchenko N. H., Fatyeyev O. M. Nadiynist' hidropnevmoahrehativ metalorizal'noho ustatkuvannya [Reliability of hidropnevmoahrehativ metalorizal'noho ustatkuvannya]. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2016, no. 41 (1213), pp. 84–87.
2. Antonenko S., Sapozhnikov S., Kondus V., Chernobrova A., Mandryka A. Creation a universal technique of predicting performance curves for small-sized centrifugal stages of well oil pump units. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021, vol. 1741, 012011. doi: 10.1088/1742-6596/1741/1/012011
3. Rogovyi A. S. Kontseptsiya stvorenniya vykhoroakamernykh nahnitachiv ta pryntsyipy pobudovy system na yikh osnovi [The concept of vortex chamber superchargers creation and the principle of systems designing on their basis]. *Visnyk Shkhidnoukrayins'koho natsional'noho universytetu imeni Volodymyra Dalia* [Visnik of the Volodymyr Dahl East Ukrainian national university]. Severodonetsk, SNU named after Volodymyr Dahl Publ., 2017, no. 3 (233), pp. 168–173.
4. Chernetskaya-Beletskaya N., Rogovyi A., Baranov I., Krut A., Miroshnikova M., Bragin N. Increasing the efficiency of highly concentrated coal-water fuel based on the simulation of non-Newtonian fluid flow. *MATEC Web of Conferences*. 2019, vol. 294, p. 01009.
5. Wang J., Li K., Feng L. Tracing the technological trajectory of coal slurry pipeline transportation technology: An HMM-based topic modeling approach. *Frontiers in Energy Research*. 2022. Vol. 10. P. 974747. doi: 10.3389/fenrg.2022.974747
6. Zhang J., Geng J., Yang S., Cheng F., Zhu G., Wang C., Yang Z., Lyu Y. Influence of geometric parameters on the performance of ejector used in aeroengine air system. *Thermal Science and Engineering Progress*. 2023, vol. 37, p. 101571. doi:

- 10.1016/j.tsep.2022.101571
7. Baha V., Pavlenko I., Židek K., Ciszak O. Ensuring the Abrasive Jet Machining Efficiency Using a Nozzle with a Perforated Insert. *Machines*. 2024, vol. 12, issue 5, p. 347. doi: 10.3390/machines12050347
 8. Melentiev R., Fang F. Recent advances and challenges of abrasive jet machining. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2018, vol. 22, pp. 1–20.
 9. Panevnyk D. Simulation of a downhole jet-vortex pump's working process. *Nafta-Gaz*. 2021, vol. 77 (9), pp. 579–586.
 10. Merzliakov I., Pavlenko I., Chekh O., Sharapov S., Ivanov V. Mathematical modeling of operating process and technological features for designing the vortex type liquid-vapor jet apparatus. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing II: Proc. of the 2nd Int. Conf. on Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange, DSMIE-2019 (11–14 June 2019, Lutsk, Ukraine). Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Cham, Springer Publ., 2020, pp. 613–622.
 11. Rogovyi A., Neskorozenyi A., Krasnikov S., Tynyanova I., Khovanskyi S. Improvement of Vortex Chamber Supercharger Performances Using Slotted Rectangular Channel. *Advanced Manufacturing Processes IV: Selected Papers from the 4th Grabchenko's Int. Conf. on Advanced Manufacturing Processes, InterPartner 2022 (6–9 September 2022, Odessa, Ukraine). Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Cham, Springer Publ., 2023, pp. 552–561. doi: 10.1007/978-3-031-16651-8_52
 12. Syomin D. O., Rogovyi A. S. Vplyv umov vkhodu seredovyscha, shcho perekachuyet'sya, na enerhetychni kharakterystyky vykhrekamernykh nasosiv [The influence of the inlet conditions of the pumped medium on the energy characteristics of vortex chamber pumps]. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2015, no. 3 (1112), pp. 130–136.
 13. Yurko I., Bondarenko G. A new approach to designing the S-shaped annular duct for industrial centrifugal compressor. *International Journal of Rotating Machinery*. 2014, ID 925368, 10 p. doi: 10.1155/2014/925368
 14. Antony J. *Design of experiments for engineers and scientists*. Elsevier Publ., 2023. 294 p.
 15. Rogovyi A., Neskorozenyi A., Panamariova O., Zoria M., Khovanskyi S. Hydrodynamic Characteristics of Pumping Bulk Materials Using Vortex Chamber Ejectors. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing VI: Proc. of the 6th Int. Conf. on Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange, DSMIE-2023. Vol. 2: Mechanical and Materials Engineering (6–9 June 2023, High Tatras, Slovak Republic). Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Cham, Springer Publ., 2023, pp. 148–157. doi: 10.1007/978-3-031-32774-2_15
 16. ANSYS, C. (2022). R22. 1 Help manual. ANSYS Inc.
 17. Besagni G., Inzoli F. Computational fluid-dynamics modeling of supersonic ejectors: Screening of turbulence modeling approaches. *Applied Thermal Engineering*. 2016, vol. 117, pp. 122–144.
 18. Rezvaya K., Cherkashenko M., Drankovskiy V., Tynyanova I., Makarov V. Using mathematical modeling for determination the optimal geometric parameters of a pump-turbine water passage. *2020 IEEE 4th International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS) (2020, Istanbul)*. Istanbul, IEEE Publ., 2020, pp. 212–216. doi: 10.1109/IEPS51250.2020.9263139
 19. Rezvaya K., Krupa E., Shudryk A., Drankovskiy V., Makarov V. Solving the hydrodynamical tasks using CFD programs. *2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS) (2018, Kharkiv)*. Kharkiv, IEEE Publ., 2018, pp. 205–209. doi: 10.1109/IEPS.2018.8559548
 20. Smirnov P. E., Menter F. R. Sensitization of the SST turbulence model to rotation and curvature by applying the Spalart–Shur correction term. *Journal of Turbomachinery*. 2009, vol. 131, issue 4, pp. 1–8. doi: 10.1115/1.3070573
 21. Shevchenko N. H., Kalyuzhnyy V. V., Andriyevs'ka V. S. Chysel'ne modelyuvannya techiyi tekhnolohichnoyi ridyny u trubakh koltyubinhovoyi ustanovky [Numerical simulation of process fluid flow in the pipes of a coiled tubing installation]. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2023, no. 1, pp. 60–65. doi: 10.20998/2411-3441.2023.1.10
 22. Krupa E., Rezvaya K., Makarov V. Parameter Estimation of Hydraulic Equipment of Hydro-Electric Power Station Based on Numerical Simulation of the Spatial Flow. *Conf. Proc. 2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek) (13–17 September 2021, Kharkiv, Ukraine)*. Kharkiv, 2021, pp. 681–685.
 23. Myronov K., Dmytriienko O., Basova Y., Rezvaya K., Vorontsov S. Improving the Energy Performance of a High-Head Francis Turbine. *Int. Conf. on Reliable Systems Engineering, ICoRSE 2023. Vol. 762 (7–8 September 2023, Bucharest, Romania). Lecture Notes in Networks and Systems*. Cham, Springer Publ., 2023, pp. 66–77. doi: 10.1007/978-3-031-40628-7_5
 24. Antoska Knights V., Millaku J. Three-factor experimental design as a tool in applied statistics. *International Journal of Statistics and Applied Mathematics*. 2023, vol. 8, issue 1, pp. 46–49. doi: 10.22271/math.2023.v8.i1a.929
 25. Engel A. *Verification, validation, and testing of engineered systems*. John Wiley & Sons Publ., 2010. 720 p. doi: 10.1002/9780470618851

Надійшла (received) 28.08.2024

Відомості про авторів / About the Authors

Роговий Андрій Сергійович (Rogovyi Andrii) – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри «Гідравлічні машини ім. Г. Ф. Проскури»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6057-4845>; e-mail: asrogovoy@ukr.net

Нескороженний Артем Олегович (Neskorozenyi Artem) – Харківський національний автомобільно-дорожній університет, аспірант кафедри «Деталі машин і теорії механізмів і машин»; м. Харків, Україна; e-mail: nao@tm-impex.com.ua

Тімченко Євген Ігорович (Timchenko Yevhen) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри «Гідравлічні машини ім. Г. Ф. Проскури»; м. Харків, Україна; e-mail: yevhen.timchenko@mit.khpi.edu.ua

Андрієвська Вікторія Сергіївна (Andriievska Viktoriia) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студентка кафедри «Гідравлічні машини ім. Г. Ф. Проскури»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9620-9401>; e-mail: viktoria.andriievska@mit.khpi.edu.ua

Ярошенко Микола Андрійович (Yaroshenko Mykola) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студент кафедри «Гідравлічні машини ім. Г. Ф. Проскури»; м. Харків, Україна; e-mail: mykola.yaroshenko@mit.khpi.edu.ua