

УДК 637.116:621.51

ОПТИМІЗАЦІЯ КОНСТРУКТИВНО-РЕЖИМНИХ ПАРАМЕТРІВ РОТАЦІЙНОГО ВАКУУМНОГО НАСОСУ ІНДИВІДУАЛЬНОЇ ДОЇЛЬНОЇ УСТАНОВКИ

Павленко С. І., к. т. н., доцент

Інститут механізації тваринництва НААН

Дудін В. Ю., ст. викладач

Дніпропетровський державний аграрний університет

Тел.: (0562) 744-81-32

Алієв Е. Б., аспірант

Інститут механізації тваринництва НААН, тел./факс: (061) 289-81-44

Приведено результати експериментальних досліджень ротаційного вакуумного насосу індивідуальної доїльної установки та обґрунтовано оптимальні співвідношення його конструктивно-режимних параметрів.

Ключові слова: індивідуальна доїльна установка, ротаційний вакуумний насос, коефіцієнт відкачування, питома енергоємність.

Проблема. На сьогодні ротаційні вакуумні насоси знайшли широке використання як силові агрегати доїльних установок. Поруч із потужними установками, які обслуговують великі підприємства з виробництва молока, дана конструкція застосовується і в індивідуальних доїльних установках, призначених для малих приватних ферм. При цьому питомі показники ефективності роботи ротаційних вакуумних машин – коефіцієнт відкачування і питома енергоємність залишаються на досить низькому рівні (табл. 1).

Таблиця 1 – Питомі показники ефективності роботи вакуумних насосів
вітчизняного виробництва, які використовуються в доїльних
установках

Показник	Марка насоса							
	РВН-200	РВН-0,65	РВН-40/350	СУ	ДПР-3Г	РВН-25	УВ-45	РВН-40С
Коефіцієнт відкачування	0,36	0,31	0,36	0,36	0,34	0,40	0,39	0,33
Питома енергоємність, кВт/м ³	0,076	0,070	0,070	0,070	0,100	0,068	0,062	0,070

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Як свідчать літературні джерела, на внутрішні перетікання повітря доводиться приблизно 60 % втрат об'ємної продуктивності насоса [1]. Основним параметром, що закладаються на стадії розробки насоса, який суттєво впливає на внутрішні перетікання повітря, є фази розподілу повітря. Як відомо вакуумні насоси, які працюють із доїльними установками, мають ступінь стиску, який не перевищує трьох одиниць і тому фази розподілу повітря повинні обиратися з урахуванням можливих перетікань повітря, тому що навіть у геометрично близьких машин коефіцієнт подачі коливається в межах 0,3-0,9 і залежить від коефіцієнта перетікань і коефіцієнта підігріву [2]. Тому невільно обрані фази розподілу повітря, форма і розріз вікон і патрубків негативно впливають на робочий процес насоса, його температурний режим і надлишковий тиск повітря на випуску з насоса. Обґрунтований же вибір положення та розмірів вікон в свою чергу залежить від правильного визначення зміни об'єму комірки в залежності від кута повороту ротора.

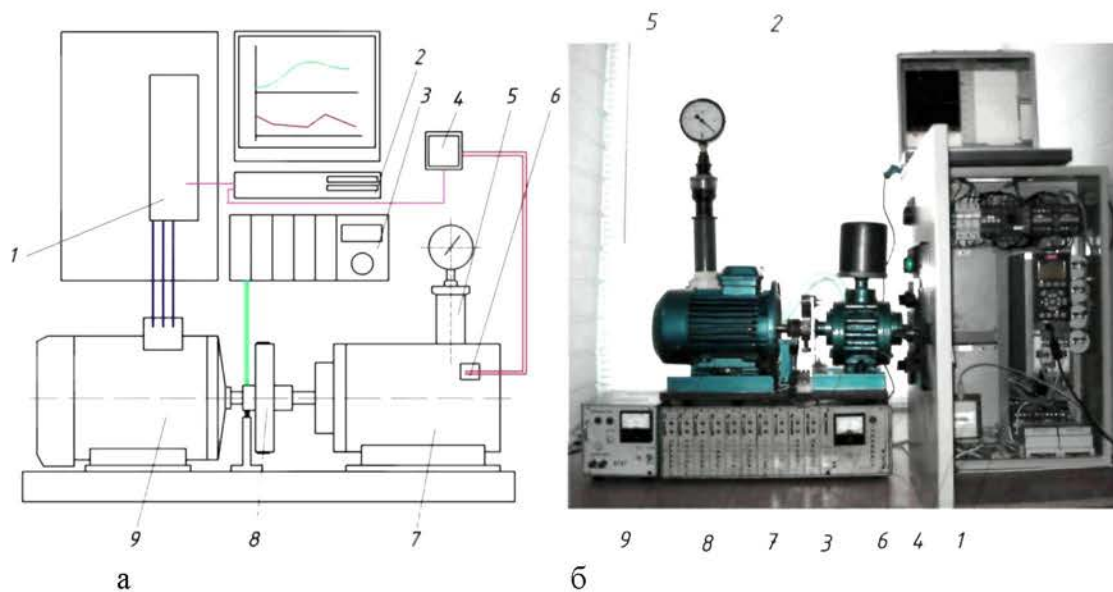
Існуюча методика визначення залежності зміни об'єму робочої камери, максимальне значення якого визначає теоретичну продуктивність, від кута повороту ротора φ [1, 2] досить точно описує динаміку зміни об'єму камери для насосів з радіальним розміщенням лопаток, у той же час автори пропонують користуватися цією залежністю і для насосів з тангенціальним розміщенням пластин, кут нахилу ψ яких не перевищує 30° . Як було доведено в [3, 4] насправді спостерігаються деякі відмінності, які дійсно незначно впливають на розрахункову продуктивність (відхилення менше 0,5 %), але максимальне значення об'єму робочої камери спостерігається не в точці, яка відповідає $\varphi = 0^\circ$, а в точці, яка зміщена на $13,4^\circ$. Базуючись на приведеній в [3, 4] методиці, було теоретично визначено, що для насоса з розмірами формуючих елементів робочої камери: діаметр статора $D = 0,105$ м, діаметр ротора $d = 0,088$ м, ширина пластини $L = 0,085$ м, кут нахилу пластин $\psi = 45^\circ$ параметри фаз розподілу повітря будуть наступними: кут всмоктування $\alpha_{вс} = 72,8^\circ$; повний кут стиснення $\alpha_n = 174,9^\circ$; кут випуску $\alpha = 50,3^\circ$; кут нагнітання $\alpha_{наг} = 52,8^\circ$; кут шкідливого простору $\delta = 58,7^\circ$.

Мета досліджень. З метою перевірки теоретичних положень та оптимізації його конструктивно-режимних параметрів було проведено експериментальні дослідження приведенного вакуумного насоса. Відповідно до поставленої мети робота виконувалися за наступною програмою:

- визначення максимально допустимої частоти обертання ротору;
- визначення впливу на зовнішню характеристику насоса конструктивних та режимних параметрів: частоти обертання ротора, величини вакууму та фаз розподілу повітря;

- визначення впливу на питомі показники роботи насосу конструктивних та режимних параметрів: частоти обертання ротора, величини вакууму та фаз розподілу повітря;
- оптимізація конструктивних та режимних параметрів вакуумного насосу.

Матеріали і методи. Експериментальні дослідження вакуумного насосу проводились за допомогою стану принципова схема та загальний вигляд якого приведено на рисунку 1.



1 – частотний регулятор; 2 – системний блок ПЕОМ; 3 – тензопідсилювач “Топаз-3-01”; 4 – аналогово-цифровий перетворювач NU 6008; 5 – витратомір КИ-4840М; 6 – ХА-термопара; 7 – експериментальний вакуумнасос; 8 – тензометричний моментомір; 9 – електродвигун Д71В2СУ1.

Рисунок 1 – Принципова схема (а) та загальний вигляд (б) стану для досліджень розробленого вакуумного насосу

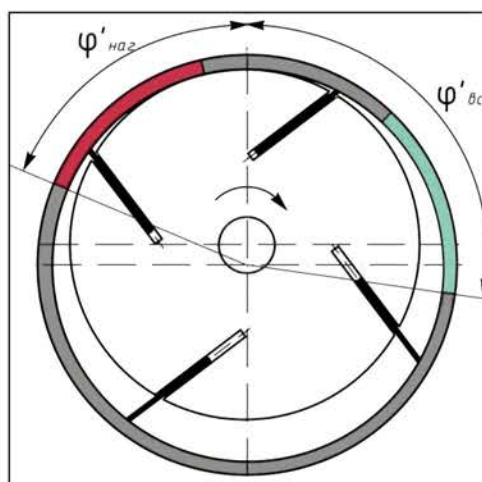
Частоту обертання ротора насоса n змінювали за допомогою частотного регулятора в межах від 1000 до 1700 хв^{-1} ; величину вакууму p_h (48-70 кПа) встановлювали за допомогою витратоміру КИ-4840М; фази розподілу повітря варіювали зміною двох кутів: кута нагнітання та кута всмоктування. Показники крутного моменту M на привідному валу електродвигуна знімали за допомогою тензометричного моментоміру; температуру статора насоса в зоні контакту пластина-статор фіксували за допомогою зачеканеної ХА-термопари; продуктивність насоса вимірювали за допомогою витратоміру КИ-4840М. Поточний запис перших двох показників за допомогою аналогово-цифрового перетворювача здійснювали за допомогою ПЕОМ.

Для визначення впливу факторів (табл. 2) на критерії оптимізації проводили чотирифакторний експеримент за планом Бокса-Бенкена. При проведенні експериментів приймали трикратну повторність дослідів. Однорідність дисперсій дослідів перевіряли за критерієм Кохрена для 95% рівня довірчої ймовірності.

Таблиця 2 – Перелік та рівні варіювання факторів

Фактор і його позначення	Рівні варіювання факторів		
	-1	0	1
$X1$ – частота обертання ротору n , об/хв	1000	1600	2200
$X2$ – величина вакууму p_h , кПа	40	55	70
$X3$ – кут, що характеризує початок нагнітання $\varphi_{\text{наг}}^*$, град	50	56	62
$X4$ – кут, що характеризує закінчення всмоктування $\varphi_{\text{вс}}^*$, град	123	129	135

*пояснення на рис. 2.

Рисунок 2 – Схема до розташування кутів $\varphi_{\text{наг}}$ та $\varphi_{\text{вс}}$

Обробку результатів досліджень виконували з використанням ПЕОМ методом варіаційної статистики, а також регресійного та кореляційного аналізу.

Результати досліджень. Максимальне значення частоти обертання ротору обмежується температурою в зоні контакту пластина – статор, яка після виходу на сталий режим повинна знаходитись в інтервалі 80...90 °С. Як свідчить графічна залежність, приведена на рис. 3, ці межі досягаються при частоті обертання ротору 1800 об/хв., хоча насос продовжує стабільно працювати і при частоті обер-

тання 2200 об/хв., що, вочевидь, можна пояснити високою термостійкістю матеріалу пластин – до 200°C.

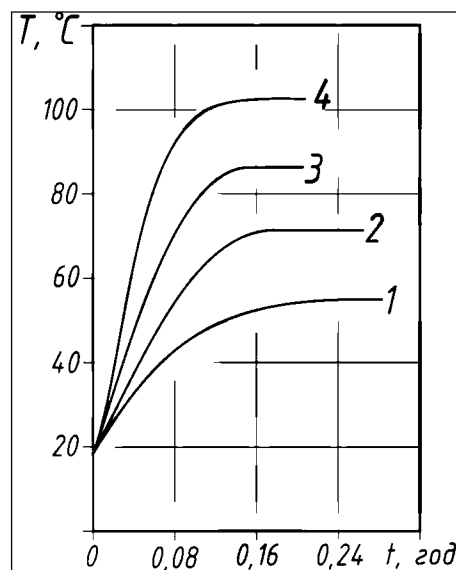


Рисунок 3 – Час виходу на режимну температуру: 1 – 800 об/хв.; 2 – 1400 об/хв.; 3 – 1800 об/хв.; 4 – 2200 об/хв.

З метою визначення впливу техніко-технологічних і конструктивних параметрів насоса, а саме частоти обертання ротору n , величини вакууму p_h та фаз розподілу повітря, які характеризувались кутами $\varphi_{вс}$ та $\varphi_{наг}$ на його продуктивність та потужність на привід був проведений чотирифакторний експеримент, у ході якого були отримані наступні математичні моделі:

$$Q = 15,13722 + 7,62833n + 0,59646n^2 - 2,63583p_h - 0,82833\varphi_{вс}, \quad (1)$$

$$N = 962,877 + 433,19n - 1,026p_h - 63,166\varphi_{наг} - 24,0024\varphi_{вс}^2 + 113,877np_h. \quad (2)$$

Отримані моделі адекватні на будь-якому рівні довірчої ймовірності, коефіцієнти з рівнем значимості більше 0,5 у моделі не включалися.

За отриманими математичними моделями було побудовано тривимірні поверхні відгуку (рис. 4). Як свідчать отримані залежності характер впливу частоти обертання та величини вакууму на досліджувані показники близький до лінійного та є цілком закономірним. Оптимум по продуктивності для кутів $\varphi_{вс}$ та $\varphi_{наг}$ спостерігається при значеннях $126,2^\circ$ та $54,4^\circ$ відповідно, які є близькими до отриманих теоретично. Що стосується потужності на привід, то більш інтенсив-

ний вплив зміни кута $\varphi_{\text{наг}}$ на неї можна пояснити витратами енергії на стискання газу, при цьому оптимум знаходиться за межами досліджуваних рівнів. Тому було прийнято за необхідне дослідити вплив згаданих вище факторів на питомі показники роботи насосу, а саме коефіцієнт подачі λ (Q/Q_0) та питому енергоємність q ($\text{кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^3$).

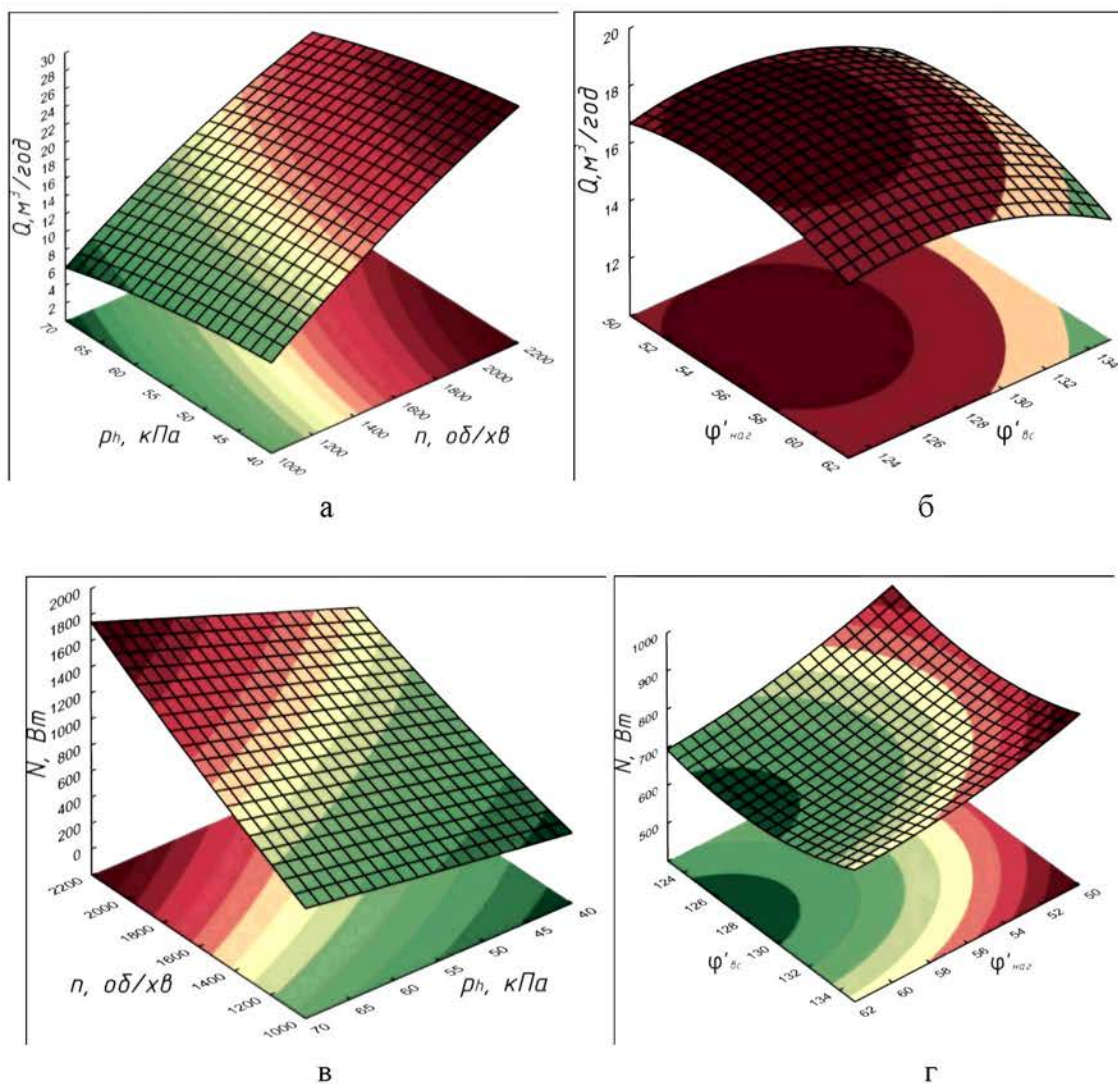


Рисунок 4 – Поверхні відгуку впливу частоти обертання ротору n , величини вакууму p_h та фаз розподілу повітря, які характеризувались кутами $\varphi_{\text{вс}}$ та $\varphi_{\text{наг}}$ на його продуктивність (а, б) та потужність на привід (в, г)

В процесі досліджень було отримано математичні моделі, адекватність яких перевірено за критерієм Фішера, а незначущі коефіцієнти відсіяно згідно критерію Ст'юдента:

$$\lambda = 0,341750 + 0,04900605n - 0,0231375n^2 - 0,0625572p_h + 0,0095012p_h^2 - 0,01987\varphi_{\text{вс}} - 0,0102919\varphi_{\text{вс}}^2, \quad (3)$$

$$q = 0,068398 - 0,005875n - 0,003965n^2 - 0,028418p_h - 0,003989p_h^2 + 0,005806\varphi_{\text{вс}} - 0,003576\varphi_{\text{вс}}^2 - 0,007678n\varphi_{\text{вс}}. \quad (4)$$

За отриманими математичними моделями було побудовано тривимірні поверхні відгуку (рис. 5), які свідчать про те, що вплив величини розрідження на досліджувані параметри близький до лінійного – з ростом вакууму коефіцієнт подачі зменшується а енергоємність збільшується. Що стосується частоти обертання, то її вплив складніший – для обох показників спостерігаються чітко виділені зони оптимуму: коефіцієнт подачі стрімко зростає до ділянки 1900-2000 об/хв., після чого стабілізується на максимальному рівні. Це пов'язано зі стабілізацією втрат через внутрішні перетікання повітря в насосі. Питома енергоємність в інтервалі 1700-1900 об/хв., навпаки, має мінімальні показники, після чого починає зростати.

Характер впливу параметрів фаз розподілу повітря для кожного з показників дозволяє визначити оптимальні їх значення. Так максимум коефіцієнту подачі 0,44 спостерігається при значеннях кутів $\varphi_{\text{вс}}$ та $\varphi_{\text{наг}}$ 125,8° та 54,3° Мінімального значення питома енергоємність приймає при $\varphi_{\text{вс}} = 126,9^\circ$ та $\varphi_{\text{наг}} = 59,6^\circ$. Таким чином оптимуми за критеріями коефіцієнту подачі та питомої енергоємності не співпадають. Отже, подальша раціоналізація конструктивно-режимних параметрів насосу потребує вирішення компромісної задачі пошуку оптимуму для двох критеріїв.

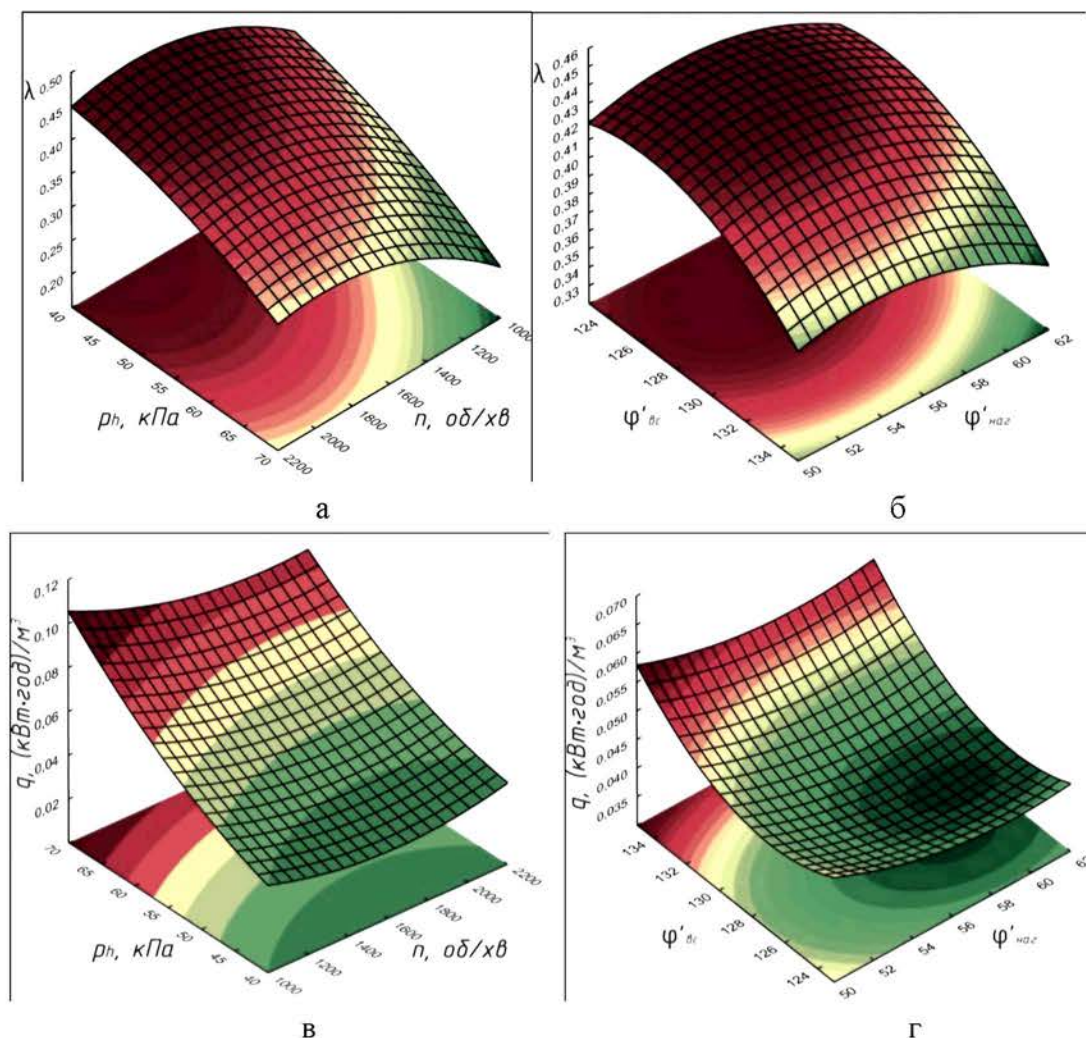


Рисунок 5 – Поверхні відгуку впливу частоти обертання ротору n , величини вакууму p_h та фаз розподілу повітря, які характеризувались кутами $\varphi_{вс}$ та $\varphi_{наг}$ на його коефіцієнт подачі (а, б) та питому енергоємність (в, г)

Задачу було вирішено за допомогою програмного пакету STATISTICA методом пошуку рівнів змінних факторів n , p_h , $\varphi_{вс}$ та $\varphi_{наг}$, які одночасно дають найбільш бажані відгуки критеріїв оптимізації λ та q . При цьому рівень бажаності критеріїв оптимізації було виражено в закодованому виді, який відповідав їх оптимальним значенням в досліджуваному діапазоні: $k_{\max}^{\lambda} = 1$ при $\lambda_{\max} = 0,48$; $k_{\max}^q = 1$ при $q_{\min} = 0,033$ кВт·год/м³. На рис. 6 зображено графіки структури профілю відгуку, з використанням оптимальних значень рівнів факторів у якості поточних значень кривих.

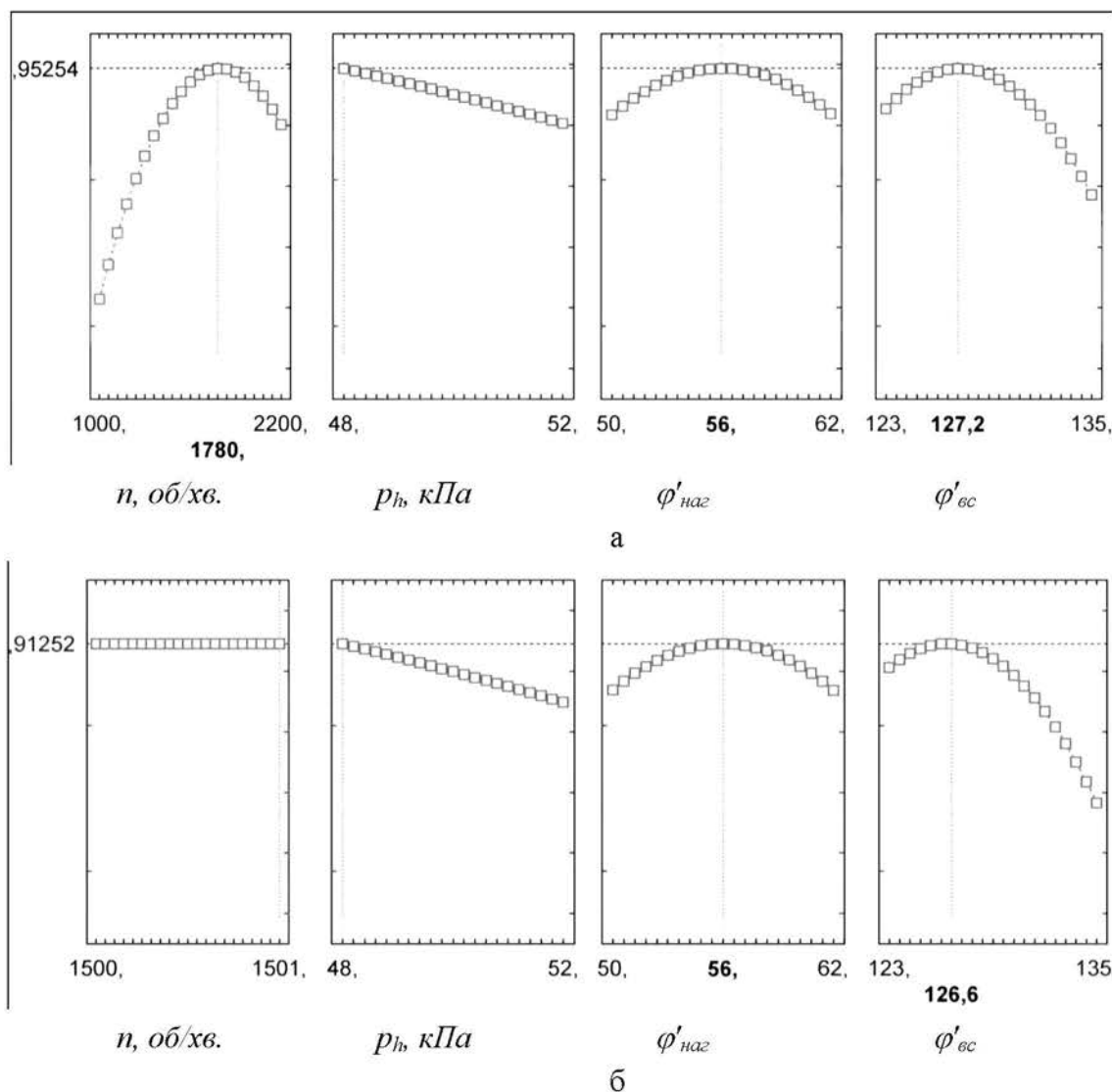


Рисунок 6 – Результати визначення оптимального рівня факторів за двома критеріями оптимізації: а – $p_h=48$ кПа; б – $p_h=48$ кПа, $n=1500$ об/хв

На основі отриманих результатів можна стверджувати, що при робочому вакуумі 48 кПа розроблена конструкція насосу буде мати оптимальні експлуатаційні характеристики ($\lambda=0,46$, $q=0,035$ кВт·год/м³) при значеннях параметрів фаз розподілу повітря, які відповідають $\varphi_{вс}=127,2^\circ$ та $\varphi_{наг}=56^\circ$ при частоті обертання 1780 об/хв. В зв'язку з забезпеченням можливості прямого приводу (без передавальних механізмів) та відсутністю електродвигунів з отриманою вище частотою обертання було проведено пошук оптимального співвідношення параметрів фаз розподілу повітря (рис. 6, б) для фіксованої частоти обертання 1500 об/хв. (за технічною характеристикою електродвигуна АИ1Е80А4Б4). Як видно з отриманих

залежностей, найбільш бажані відгуки критеріїв оптимізації λ та q спостерігаються при значенні кутів $\varphi_{\text{вс}}=126,6^\circ$ та $\varphi_{\text{наг}}=56^\circ$, і в натуральному вигляді набувають значень $\lambda=0,44$ та $q=0,036$ кВт·год/м³. Таким чином, уточнені за результатами експериментальних досліджень значення кутів всмоктування та повного стиснення будуть рівні $\alpha_{\text{вс}}=70,4^\circ$ та $\alpha_n=177,4^\circ$. Враховуючи можливість використання насосу в установці, укомплектованій доїльними апаратами з робочим вакуумом 52 кПа, було проведено аналогічну оцінку оптимального співвідношення рівнів факторів (рис. 7), яка дала наступні результати: $n=1840$ об/хв., $\varphi_{\text{вс}}=127,2^\circ$, $\varphi_{\text{наг}}=56,6^\circ$ при фіксованому вакуумі та $\varphi_{\text{вс}}=126^\circ$, $\varphi_{\text{наг}}=56,6^\circ$ при $n=1500$ об/хв., $p_h=52$ кПа.

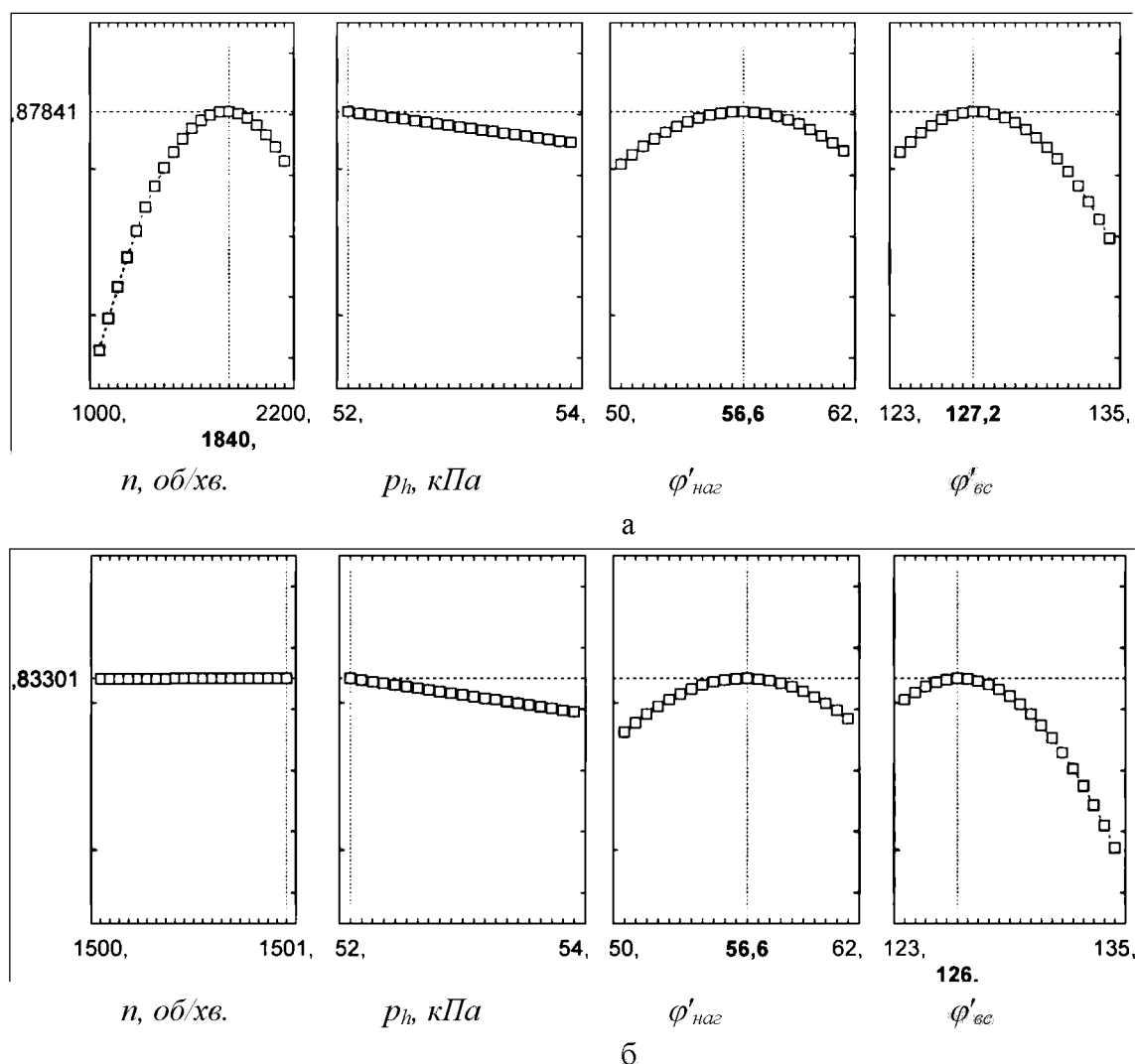


Рисунок 7 – Результати визначення оптимального рівня факторів за двома критеріями оптимізації: а - $p_h=52$ кПа; б - $p_h=52$ кПа, $n=1500$ об/хв

Висновки

В результаті проведених досліджень встановлено наступне:

- досліджуваний вакуумний насос стабільно працює при значенні частоти обертання ротора 2200 об/хв.;
- отримані в результаті експерименту математичні моделі впливу частоти обертання ротора, величини вакууму та фаз розподілу повітря на продуктивність та потужність на привід не дали змогу виявити оптимальну комбінацію цих факторів;
- отримані в результаті експерименту математичні моделі впливу змінних факторів на питомі показники насосу свідчать про те, що оптимуми за критеріями коефіцієнту подачі та питомої енергоємності не співпадають;
- в результаті пошуку рівнів змінних факторів n , p_h , $\varphi_{вс}$ та $\varphi_{наз}$, які одночасно дають найбільш бажані відгуки критеріїв оптимізації коефіцієнту подачі λ та питомої енергоємності q встановлено, що при робочому вакуумі 48 кПа досліджуваний конструкція насос буде мати оптимальні експлуатаційні характеристики ($\lambda=0,46$, $q=0,035$ кВт·год/м³) при значеннях параметрів фаз розподілу повітря, які відповідають $\alpha_{вс}=71^\circ$ та $\alpha_n=177,4^\circ$ при частоті обертання 1780 об/хв. та $\lambda=0,44$ та $q=0,036$ кВт·год/м³ при $\alpha_{вс}=70,4^\circ$ та $\alpha_n=177,4^\circ$, $n=1500$ об/хв.;
- отримані дані свідчать про те, що відхилення від визначених теоретично значень показників фаз розподілу повітря складає 3,3 % для $\alpha_{вс}$ та 1,4 % для α_n при робочому вакуумі та частоті обертання ротора, які відповідають реальним виробничим умовам;
- досліджуваний вакуумний насос має переваги перед існуючими за питомими показниками ефективності роботи – коефіцієнтом відкачування та питомою енергоємністю.

Перелік посилань

1. Мжельский Н. И. Вакуумные насосы для доильных установок. / Н. И. Мжельский // – М. : Машиностроение, 1974. – 151 с.
2. Механические вакуумные насосы / Е. С. Фролов, И. В. Автономова, В. И. Васильев и др. // – М.: Машиностроение, 1989. – 288 с.
3. Обґрунтування деяких конструктивних характеристик ротаційних вакуумних насосів з тангенціальним розміщенням пластин. С. І. Павленко, М. М. Науменко, В. Ю. Дудін. Вісник ХНТУСГ ім. Петра Василенка, випуск № 108. – С. 159-163.
4. К вопросу определения фаз распределения воздуха ротационного вакуумного насоса с тангенциальным расположением лопаток. С. И. Павленко, Н. Н. Науменко, В. Ю. Дудин, Материалы Международной научно-практической

конференции "Научно-технический прогресс в сельскохозяйственном производстве", Т.2. – С. 107-112.

**OPTIMIZATION OF IS CONSTRUCTIVE-REGIME PARAMETERS
OF THE ROTATIONAL VACUUM PUMP OF THE INDIVIDUAL
MILKING MACHINE**

Summary. Results of experimental researches of the rotational vacuum pump of the individual milking machine are resulted and optimum parities of its is constructive-regime parameters are proved.