

УДК 697.922.566

ПЛАНУВАННЯ БАГАТОФАКТОРНОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ РЕГУЛЮЮЧИХ ПРИСТРОЇВ АЕРОДИНАМІЧНОЇ МЕРЕЖІ

Г. С. Ратушняк, Р. В. Степанковський

Виконано планування багатофакторного експерименту методом Бокса-Уілсона для побудови факторного простору дослідження аеродинамічних процесів, виявлення впливу конструктивно-технологічних параметрів регулюючих пристроїв на аеродинаміку робочого середовища. Розроблено експериментальну установку для дослідження роботи регулюючих пристроїв – ДКЗВ та вдосконаленої конструкції ДКЕВ при регулюванні багатофазного середовища.

Выполнено планирование многофакторного эксперимента методом Бокса-Уилсона для построения факторного пространства исследования аэродинамических процессов, выявления влияния конструктивно-технологических параметров регулирующих устройств на аэродинамику рабочей среды. Разработана экспериментальная установка для исследования работы регулирующих устройств – ДКЗВ и усовершенствованной конструкции ДКЕВ при регулировании многофазного среды.

Completed planning multifactorial experiment using Box-Wilson for building quotient space exploration aerodynamic processes, identifying the impact of constructive-technological parameters regulating devices on the aerodynamics of the working environment. Experimental setup for the study of the control devices – DKZV and improved design DKEV in regulating multiphase medium.

Вступ

Аеродинамічні мережі є невід'ємною складовою інженерно-технічних споруд, що забезпечують необхідні санітарно-технічні норми в приміщеннях для комфортного перебування людей та сприятливого впливу на будівельні конструкції, побутові цінності, ннавколишнє технологічне обладнання тощо. Комплексний підхід при проектуванні, ефективне функціонування аеродинамічної мережі залежить від оптимальної взаємодії всіх її елементів, одним з яких є регулюючі пристрої [1-5]. Нечіткість налагоджування аеродинамічної мережі при використанні існуючих засобів регулювання приводить до похибки замірів 15-20 %, однією з причин яких є неврахування можливості похибок при осьових замірах швидкостей повітря, через їх значну нестабільність [1-5].

Вищенаведена неефективність існуючих засобів регулювання визначає створення нових напрямків в рішенні науково-технічних задач підвищення техніко-економічних характеристик аеродинамічної мережі, оптимізації їх конструктивних та аеродинамічних характеристик. Дослідження аеродинамічних процесів, виявлення впливу конструктивно-технологічних параметрів регулюючих пристроїв на закономірність зміни аеродинаміки транспортованого робочого середовища невід'ємно пов'язано з експериментом, початковим етапом якого є його планування [6].

Метою роботи є планування багатофакторного експерименту для дослідження функціонування регулюючих пристроїв аеродинамічної мережі.

Основна частина

Ефективність регулювання аеродинамічної мережі залежить від плавності втрати тиску та збільшення його діапазону від мінімального до максимального на регулюючій ділянці. Регулюючий пристрій в аеродинамічній мережі є місцевим опором, тому втрата тиску на ньому визначається за формулою [2].

$$\Delta p = \xi \frac{\rho v^2}{2}, \quad (1)$$

де ξ – коефіцієнт місцевого опору регулюючого пристрою;

ρ – густина робочого середовища, кг/м³;

v – швидкість робочого середовища, м/с.

Керування потоками повітря в аеродинамічних мережах здійснюється механічною арматурою різного призначення, різновидом якої є дросель-клапан для регулювання витрати робочого середовища на відгалуженнях, надалі ДКЗВ. Влаштування регулюючої пластини або ряд пластин всередині корпусу обумовлює інтенсивне вихроутворення, турбулентність, при зіткненні робочого середовища з регулюючою пластиною.

Для зменшення турбулентності, впорядкованості аеродинамічних потоків розроблена нова конструкція дросель-клапана, надалі ДКЕВ, що захищена патентом України на корисну модель [11] та наведена на рис. 1.

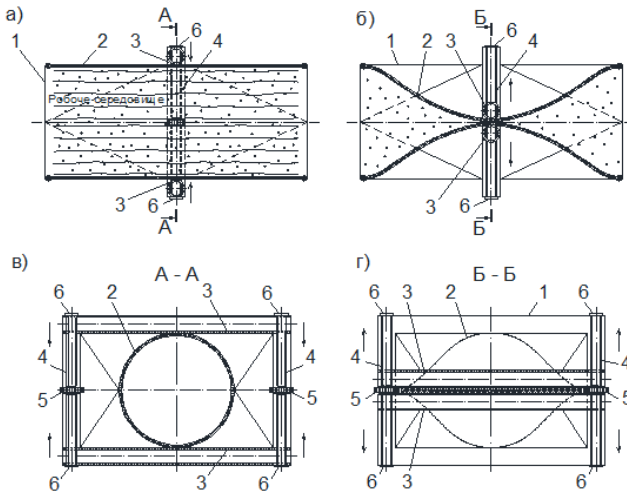


Рис. 1. Дросель-клапан з еластичною вставкою (ДКЕВ):
1 – корпус; 2 – еластична розтягувальна вставка; 3 – регулюючо-запірні елементи; 4 – регулюючі гвинти; 5 – колеса регулювання; 6 – заглушки

Для дослідження роботи регулюючих пристроїв ДКЗВ та ДКЕВ спроектована та виготовлена експериментальна установка (рис. 2). Експериментальні аеродинамічні випробування проводяться згідно з [10].

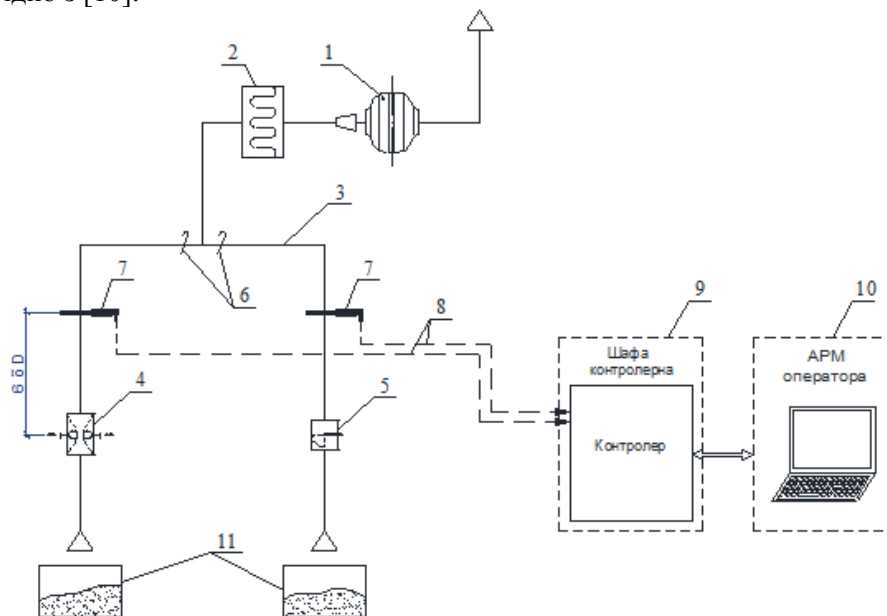


Рис. 2. Схема експериментальної установки:

- 1 – вентиляційний агрегат VKA125LD; 2 – пилоочисне обладнання (фільтр); 3 – аеродинамічна мережа (повітропровід) Ø100 мм; 4 – дросель-клапан з еластичною вставкою (ДКЕВ); 5 – дросель-клапан із влаштованою всередині регулюючою пластиною (ДКЗВ); 6 – шибер; 7 – датчики динамічного перепаду тиску; 8 – кабельно-провідникова мережа; 9 – шафа з контролером; 10 – автоматизоване робоче місце (АРМ) оператора; 11 – смінь для транспортованого середовища (цукрового пилу)

При проведенні експерименту заміри тиску робочого середовища виконуються при змінному регулюванні аеродинамічної мережі різними конструкціями регулюючих пристроїв, відповідно 4 та 5, відсікаючи попереміно повітропровід шиберами 6. Значення втрат тиску на

регулюючому пристрої сприймаються датчиками динамічного перепаду тиску 7, далі через шафу з контролером 9 до автоматизованого робочого місця (АРМ) оператора 10.

Зіставлення результатів вимірювань тиску робочого середовища, при змінному регулюванні аеродинамічної мережі регулюючими пристроями двох різних конструкцій ДКЗВ та ДКЕВ, здійснюється при однакових їх площах поперечного перерізу $F_1 = F_2$ (рис. 3).

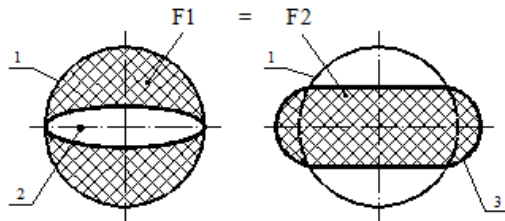


Рис. 3. Схема зіставлення площ поперечних перерізів регулюючих пристроїв різних конструктивних виконань:

1 – корпус; 2 – регулюючий орган – металевий диск; 3 – регулюючий орган – еластична вставка;

F_1 – площа поперечного перерізу дросель-клапана з влаштованою всередині регулюючою пластиною (ДКЗВ); F_2 – площа поперечного перерізу дросель-клапана з еластичною вставкою (ДКЕВ).

Дослідження роботи регулюючих пристроїв запропоновано в системі аспірації на прикладі технологічної складової цукрових заводів. Згідно з [3] приймаємо запиленість відсмоктувального повітря 800 мг/м^3 . Оскільки концентрація цукрового пилу може набагато перевищувати рекомендовану концентрацію, внаслідок осідання цукрового пилу на металевих конструкціях, обладнаннях, збільшимо концентрацію в 2 рази, що і буде верхньою межею варіювання 1600 мг/м^3 . Інтервал варіювання становитиме $800 \dots 1600 \text{ мг/м}^3$. В експериментальній установці для досягнення заданої концентрації цукрового пилу в робочому середовищі (від 800 до 1600 мг/м^3) в ємність для цукрового пилу 11 додаємо необхідну кількість цукрового пилу при роботі вентиляційного агрегату 1.

Значення втрат тиску на регулюючому пристрої Δp є функцією факторів впливу на її величину

$$\Delta p = f(v, \varphi, \mu), \quad (2)$$

де v – швидкість робочого середовища, м/с;

$\varphi = S_{\Delta p} / S_{max}$ – коефіцієнт, що враховує співвідношення площі відкриття регулюючого пристрою до площі поперечного перерізу аеродинамічної мережі;

μ – вагова концентрація домішок транспортованого середовища, кг/кг.

Чутливість величини втрат тиску Δp залежить від факторів впливу v , φ , μ та конструктивних властивостей регулюючого пристрою.

Коефіцієнт φ визначає величину коефіцієнта місцевого опору регулюючого пристрою. При виборі інтервалу варіювання коефіцієнта φ враховували роботи авторів [2, 5], в яких рекомендується поворот стулки в регулюючому пристрої ДКЗВ обмежувати кутом повороту від 0° до 40° .

Інтервал варіювання коефіцієнта φ та вагової концентрації домішок транспортованого середовища μ наведено в табл. 1.

Дослідження впливу факторів v , φ , μ на втрату тиску Δp при проведенні багатофакторних експериментів пов'язано із значним об'ємом робіт. Використовуючи методи матричного планування експериментів об'єм робіт можна скоротити [6, 7].

З метою уникнення протиріч при виборі діапазону варіювання факторів впливу та їхньої сукупності в даному діапазоні, при плануванні експерименту проведено пошукові експерименти для визначення області, в межах якої були б реалізовані сполучення рівнів факторів. Оскільки фактори впливу є величинами, що мають різну розмірність, а значення цих величин мають різні порядки, для отримання поверхні відгуку цих функцій проведено операцію кодування факторів у вигляді лінійного перетворення факторного простору [6]. Встановлено такі значення рівнів факторів в умовному масштабі: мінімальний -1 , середній 0 , максимальний $+1$ та “зіркові” значення, відповідно, $-1,682$ та $+1,682$, загальна кількість дослідів n дорівнює 20 [6].

Істинні значення факторів встановлено на основі проведення пошукових експериментів і наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Рівні факторів та інтервали варіювання

Фактори	Рівні варіювання факторів					Інтервал варіювання
	-1,682	-1	0	+1	+1,682	
x_1 – швидкість робочого середовища, м/с (v)	8	9,19	10	11,19	12	$\pm 1,19$
x_2 – коефіцієнт, що враховує співвідношення площі відкриття регулюючого пристрою до площі поперечного перерізу аеродинамічної мережі (φ)	0,36	0,486	0,67	0,854	0,97	$\pm 0,184$
x_3 – вагова концентрація домішок транспортованого середовища, кг/кг (μ)	$6,7 \times 10^{-4}$	$8,66 \times 10^{-4}$	$1,0 \times 10^{-3}$	$1,2 \times 10^{-3}$	$1,33 \times 10^{-3}$	$1,96 \times 10^{-4}$

Складено матриці планування експериментів для функції відгуку Δp_1 – втрати тиску в аеродинамічній мережі при влаштуванні ДКЗВ та Δp_2 – втрати тиску в аеродинамічній мережі при влаштуванні ДКЕВ, з метою проведення повнофакторного експерименту вигляду 2^3 , які наведено в табл. 2, 3.

Вплив факторів v , φ , μ на втрати тиску Δp описуємо такими регресійними моделями 2-го порядку [7]:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2, \quad (3)$$

де y – функція Δp ;

$b_0, b_1, \dots, b_3, b_{12}, \dots, b_{13}, b_{11}, \dots, b_{33}$ – коефіцієнти регресії.

Для визначення значень $b_0, b_1, \dots, b_3, b_{12}, \dots, b_{13}, b_{11}, \dots, b_{33}$ використано метод найменших квадратів [6].

Адекватність регресійних моделей перевіряємо за критерієм Фішера F [6]. Для визначення адекватності регресійної моделі розрахункове значення критерію F порівнювалося з критичним $[F]$: при $F > [F]$ регресійна модель вважалася неадекватною.

Для забезпечення достатньої достовірності отриманих результатів, необхідної для кожного виду експерименту, кількість повторних дослідів повинна бути не менша, визначена за формулою [9].

$$n \geq \frac{1 + \gamma + 2 \cdot n_{\text{відк}}}{1 - \gamma}, \quad (4)$$

де γ – довірча ймовірність того, що похибка вимірювання знаходиться в допустимих межах;

$n_{\text{відк}}$ – число вимірювань, що відкидається.

Згідно з рекомендаціями [8, 9] довірча ймовірність при нормуванні оцінки результуючої та випадкової похибок вимірювальної техніки вибирається в межах (0,8...0,9), тоді при $n_{\text{відк}} = 0$, кількість повторних дослідів

$$n \geq \frac{1 + (0,8...0,9)}{1 - (0,8...0,9)} = 9...19.$$

Значимість коефіцієнтів регресії проводилася за t_i – критерієм Стьюдента [6].

Розрахункове значення критерію t_i порівнювалося з критичним і при $|t_i| \leq [t]$ i -й коефіцієнт регресії вважався незначним. Отже, ще одною умовою коректності і достовірності регресійних моделей була умова про те, що у випадку отримання при всіх значимих коефіцієнтах розрахункових значень $|t_i| \leq [t]$, рівняння регресії вважались некоректними.

Оброблення експериментальних даних та виведення рівняння регресії здійснювалося за допомогою програмного забезпечення, розробленого в НДЛ гідродинаміки ВНТУ з використання програмної оболонки Borland Delphi 5.0.

Матрицю планування експерименту для функції відгуку Δp_1 – втрати тиску на ДКЗВ наведено в табл. 2.

Для функції відгуку Δp_1 рівняння регресії (3) згідно з багатофакторним експериментом для кодованих значень має вигляд

$$\Delta p_1 = 27,94 + 2,804x_1 - 14,51x_2 - 0,98x_3 - 2,71x_1x_2 + 0,84x_1x_3 - 1,28x_2x_3 - 0,241x_1^2 + 0,938x_2^2 + 0,0065x_3^2. \quad (5)$$

При цьому дисперсія відтворюваності $S_{відт}^2 = 0,84$; дисперсія адекватності $S_{ад}^2 = 2,25$; критерій Фішера $F=2,67 < [F]=2,77$, отже регресійна модель (5) адекватна. Коефіцієнт кореляції $R^2=0,995$.

Після відкидання сполучення факторів, які обумовлені умовою $|t_i| \leq [t]$, рівняння регресії (5) в кодованих значеннях має вигляд

$$\Delta p_1 = 27,94 + 2,804x_1 - 14,51x_2 - 0,98x_3 - 2,71x_1x_2 + 0,84x_1x_3 - 1,28x_2x_3 + 0,938x_2^2. \quad (6)$$

Для дійсних значень факторів рівняння регресії (6) для функції Δp_1 має вигляд, Па

$$\Delta p_1 = 4,06 + 7,03v + 42,98\varphi - 17355,3\mu - 12,36v\varphi + 3606,8v\mu - 35388,5\varphi\mu + 27,716\varphi^2. \quad (7)$$

Таблиця 2

Матриця планування експерименту для функції відгуку Δp_1

№ досліду	X0	X1	X2	X3	X1X2	X1X3	X2X3	X1 ²	X2 ²	X3 ²	Y
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	13,04
2	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	10,31
3	1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	1	48,1
4	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	37,47
5	1	1	1	-1	1	-1	-1	1	1	1	15,2
6	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	1	18,76
7	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	48,08
8	1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	37,89
9	1	-1,682	0	0	0	0	0	2,83	0	0	21,89
10	1	1,682	0	0	0	0	0	2,83	0	0	32,78
11	1	0	-1,682	0	0	0	0	0	2,83	0	55,64
12	1	0	1,682	0	0	0	0	0	2,83	0	5,7
13	1	0	0	-1,682	0	0	0	0	0	2,83	28,74
14	1	0	0	1,682	0	0	0	0	0	2,83	27,33
15	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	28,24
16	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	27,24
17	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	27,16
18	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	27,32
19	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	28,4
20	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	29,5
b _i	27,94	2,80	-14,51	-0,98	-2,71	0,84	-1,28	-0,24	0,94	0,0065	
β _i	4,06	7,03	42,98	-17355,35	-12,36	3606,80	-35388,48	-0,17	27,72	169863	
t	74,60	11,28	-58,40	-3,94	-8,33	2,59	-3,93	-1,00	3,88	0,027	[t]=2,571

Матрицю планування експеримента для функції відгуку Δp_2 – втрати тиску на ДКЕВ наведено в табл. 3.

Для функції відгуку Δp_2 рівняння регресії (3) згідно з багатофакторним експериментом для кодованих значень має вигляд

$$\Delta p_2 = 23,87 + 2,77x_1 - 12,96x_2 - 1,12x_3 - 2,43x_1x_2 + 0,966x_1x_3 - 1,071x_2x_3 + 0,318x_1^2 + 0,997x_2^2 + 0,281x_3^2. \quad (8)$$

При цьому дисперсія відтворюваності $S_{відт}^2 = 0,85$; дисперсія адекватності $S_{ад}^2 = 2,09$; критерій Фішера $F=2,45 < [F]=2,77$, отже регресійна модель (8) адекватна. Коефіцієнт кореляції $R^2=0,994$.

Після відкидання сполучення факторів, які обумовлені умовою $|t_i| \leq [t]$, рівняння регресії (8) в кодованих значеннях має вигляд

$$\Delta p_2 = 23,87 + 2,77x_1 - 12,96x_2 - 1,12x_3 - 2,43x_1x_2 + 0,966x_1x_3 - 1,071x_2x_3 + 0,997x_2^2. \quad (9)$$

Таблиця 3

Матрицю планування експерименту для функції відгуку Δp_2

№ досліду	X0	X1	X2	X3	X1X2	X1X3	X2X3	X1 ²	X2 ²	X3 ²	Y
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	11,88
2	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	9,14
3	1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	1	43,65
4	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	32,8
5	1	1	1	-1	1	-1	-1	1	1	1	13,7
6	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	1	16,43
7	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	42,79
8	1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	34,2
9	1	-1,682	0	0	0	0	0	2,83	0	0	19,15
10	1	1,682	0	0	0	0	0	2,83	0	0	30,1
11	1	0	-1,682	0	0	0	0	0	2,83	0	48,77
12	1	0	1,682	0	0	0	0	0	2,83	0	4,32
13	1	0	0	-1,682	0	0	0	0	0	2,83	26,2
14	1	0	0	1,682	0	0	0	0	0	2,83	22,84
15	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	24,1
16	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	22,24
17	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	23,6
18	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	24,42
19	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	24,9
20	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	24,2
bi	23,87	2,77	-12,96	-1,12	-2,43	0,97	-1,07	0,32	1,00	0,28	
βi	19,95	5,62	19,65	-23097,43	-11,09	4142,73	-29704,14	0,22	29,44	7304542	
t	63,43	11,10	-51,92	-4,49	-7,45	2,96	-3,28	1,31	4,10	1,15	[t]=2,571

Для дійсних значень факторів рівняння регресії (9) для функції Δp_2 має вигляд, Па

$$\Delta p_2 = 19,95 + 5,618\nu + 19,647\varphi - 23097,4\mu - 11,092\nu\varphi + 4142,73\nu\mu - 29704,1\varphi\mu + 29,44\varphi^2. \quad (10)$$

Для виявлення різниці значень втрат тиску на регулюючих пристроях двох різних конструкцій Δp_1 і Δp_2 побудовані графіки функцій $\Delta p_{1,2}$ від кількості дослідів n (рис. 4). Значні втрати тиску досягалися внаслідок перекривання поперечного перерізу регулюючих пристроїв (ДКЗВ, ДКЕВ) на 60 %, що відповідає 40° кута повороту регулюючого органу ДКЗВ. Порівнюючи графіки функцій Δp_1 , Δp_2 можна виділити зону нестабільності функції Δp_1 при дослідженні роботи ДКЗВ, а саме: $\Delta p_1 = (37,47 \dots 55,64)$ Па (рис. 4). Коливання в даній зоні Δp_1 обумовлені великою турбулентністю, вихроутворенням, неупорядкованістю аеродинамічних потоків за регулюючим органом ДКЗВ, що призводять до нечіткості досягнення проектного значення втрат тиску на відгалуженні та складності налагодження аеродинамічної мережі в цілому.

Робота аеродинамічної мережі з ДКЕВ свідчить про більш впорядковане, плавне регулювання, особливо в діапазоні $\Delta p_2 = (34,2 \dots 48,77)$ Па. Крім того, всі значення функції Δp_2 є меншими значень функції Δp_1 при однакових зіставленнях їх площ поперечних перерізів $F_1=F_2$ (рис. 3). Плавність зростання втрат тиску в ДКЕВ обумовлено зменшенням турбулентності, вихроутворення, впорядкованістю аеродинамічних потоків, внаслідок плавного спектра обтікання регулюючого органу робочим середовищем.

Розбіжність оптимумів функцій (див. табл. 2, 3), а саме: $\Delta p_1 = 55,64$ Па > $\Delta p_2 = 48,77$ Па свідчить про можливість розширення діапазону регулювання при застосуванні вдосконаленої конструкції ДКЕВ.

Отримані рівняння регресії (7) та (10) можуть бути використані для математичного моделювання втрати тиску на ділянці аеродинамічної мережі (системи аспірації) при влаштування регулюючих пристроїв різного конструктивного виконання, відповідно, ДКЗВ та ДКЕВ, а також для розроблення інженерної методики розрахунку її параметрів.

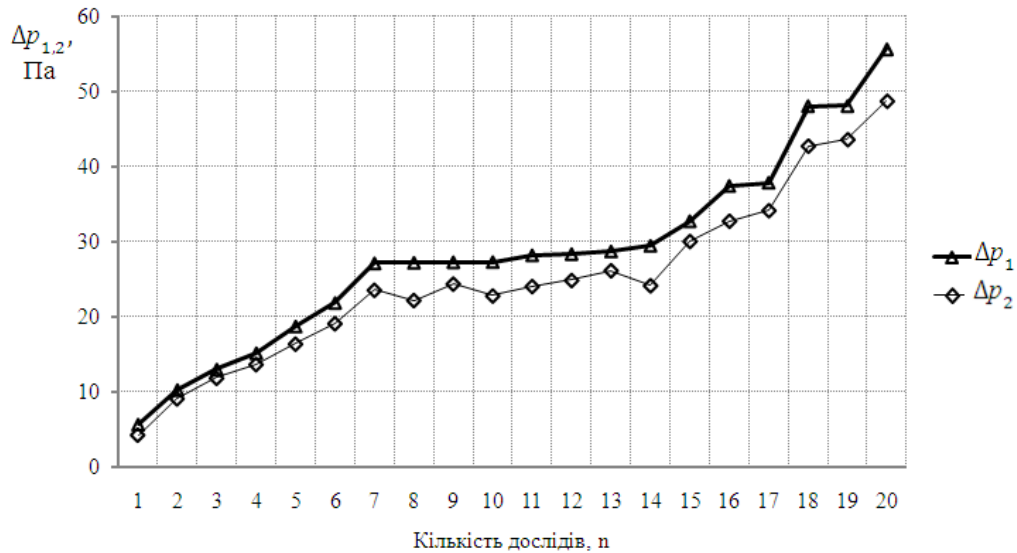


Рис. 4. Відмінність значень функцій Δp_1 , Δp_2

Також отримано поверхні відгуків функцій Δp_1 і Δp_2 в залежності від окремих параметрів оптимізації в площині їх дійсних значень, що відображають сполучення факторів v , φ , μ (рис. 5).

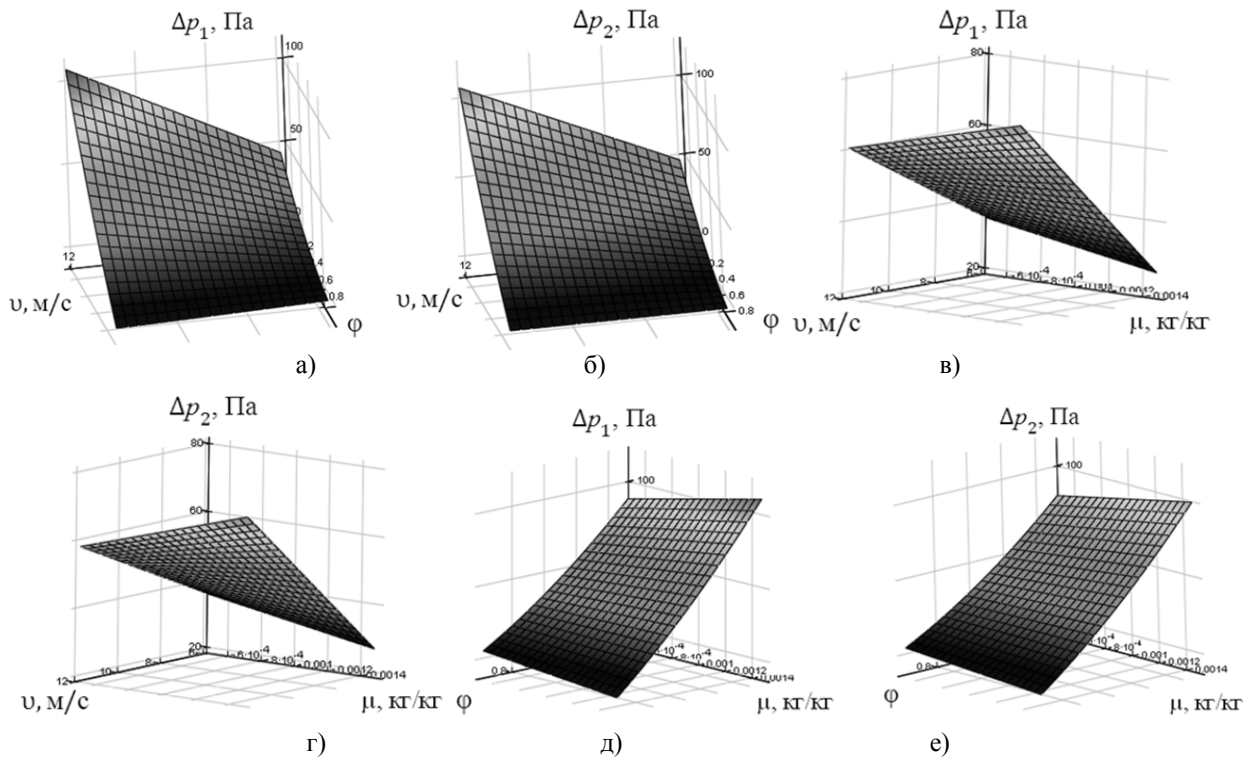


Рис. 5. Поверхні відгуків функцій Δp_1 і Δp_2 в залежності від окремих параметрів оптимізації в площині їх дійсних значень: а) $\Delta p_1 = f(v, \varphi)$; б) $\Delta p_2 = f(v, \varphi)$; в) $\Delta p_1 = f(v, \mu)$; г) $\Delta p_2 = f(v, \mu)$; д) $\Delta p_1 = f(\varphi, \mu)$; е) $\Delta p_2 = f(\varphi, \mu)$

Аналіз факторних просторів залежності параметрів оптимізації Δp_1 і Δp_2 від сполучення факторів v , φ , μ показує, що найбільш впливовими факторами на величину втрат тиску є швидкість робочого середовища v , та коефіцієнт, який враховує співвідношення площі відкриття регулюючого пристрою до площі поперечного перерізу аеродинамічної мережі, тобто φ (рис. 5). Про це свідчить крутий підйом поверхонь відгуку відносно Δp_1 і Δp_2 в міру зростання v , та зменшення φ . Зростання втрат тиску Δp_1 і Δp_2 при зменшенні φ обумовлюється тим, що коефіцієнт φ визначає величину місцевого опору на регулюючих пристроях.

Менш впливовим фактором є вагова концентрація домішок транспортуемого середовища

$\mu = 6,7 \times 10^{-4} \dots 1,33 \times 10^{-3}$ (рис. 5, в, г, д, е). Це обумовлено незначною концентрацією домішок, прикладом якої є концентрація цукрового пилу на сушильному та пакувальному відділеннях цукрових заводів.

Розбіжність оптимумів, найбільших втрат тиску на регулюючих пристроях, поверхонь відгуків $\Delta p_{1\text{опт}} > \Delta p_{2\text{опт}}$, свідчить про можливість розширення діапазону регулювання аеродинамічної мережі при влаштуванні вдосконаленої конструкції ДКЕВ.

Висновки

- Виконано планування багатофакторного експерименту методом Бокса-Уїлсона для побудови факторного простору дослідження аеродинамічних процесів, виявлення впливу конструктивно-технологічних параметрів регулюючих пристроїв на аеродинаміку робочого середовища.
- Розроблено експериментальну установку для дослідження роботи регулюючих пристроїв - ДКЗВ та вдосконаленої конструкції ДКЕВ при регулюванні багатофазного середовища.
- Робота ДКЕВ характеризує більш впорядковане, плавне регулювання, внаслідок зменшення турбулентності, вихроутворення, впорядкованості аеродинамічних потоків. Розходження значень втрат тиску $\Delta p_1 > \Delta p_2$ свідчить про можливість розширення діапазону регулювання при застосуванні вдосконаленої конструкції ДКЕВ – більше 60 % перекриття поперечного перерізу проходження робочого середовища, що відповідає куту повороту регулюючого органу ДКЗВ більше 40°.

Використана література

1. Богуславский Л. Д. Энергосбережение в системах теплоснабжения, вентиляции и кондиционирования воздуха: Справ. пособие / Богуславский Л. Д., Ливчак В. И., Титов В. П. – М. : Стройиздат, 1990. – 624 с.
2. Староверов И. Г. Справочник проектировщика. Внутренние санитарно-технические устройства. Часть II. Вентиляция и кондиционирование воздуха / И. Г. Староверов. – М. : Стройиздат, 1977. – 502 с.
3. Ведомственные нормы технологического проектирования свеклосахарных заводов: ВНТП 03 – 91. – М. : Гипросахпром, 1991. – 357 с.
4. Штокман Е. А. Очистка воздуха от пыли на предприятиях пищевой промышленности. – 2-е изд. перераб. и доп. / Е. А. Штокман. – М. : Агропромиздат, 1989. – 312 с.
5. Ратушняк Г. С. Вдосконалення регулювання аеродинамічних потоків трубопровідних систем / Г. С. Ратушняк, Р. В. Степанковський // Вісник Хмельницького національного університету (серія «Технічні науки»). – № 4, 2010. – С. 26-33.
6. Адлер Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – М. : Наука, 1976. – 280 с.
7. Спиридонов А. А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов / Спиридонов А. А. – М. : Машиностроение, 1981. – 184 с.
8. Левшина Е. С. Электрические измерения физических величин: (Измерительные преобразователи). Учеб. пособие для вузов / Е. С. Левшина, П. В. Новицкий. – Л. : Энергоаотиздат, 1983. – 320 с.
9. Новицкий П. В. Оценка погрешностей результатов измерений / П. В. Новицкий, И. А. Зограф. – Л. : Энергоаотиздат, 1985. – 114 с.
10. Методы аэродинамических испытаний: ГОСТ 12.3.018-79. – М. : Изд-во стандартов, 1981. – 10 с.
11. Патент 52768 UA, МПК F16K 7/00, B08B 15/00. Дросельний пристрій / Степанковський Р. В., Ратушняк Г. С. – Заявл. 25.02.2010; опубл. 10.09.2010, Бюл. № 17. – 4 с.

Ратушняк Георгій Сергійович – к.т.н., професор, завідувач кафедри теплогазопостачання, Вінницький національний технічний університет.

Степанковський Роман Володимирович – аспірант кафедри теплогазопостачання, Вінницький національний технічний університет.