

Jerzy SZULIKOWSKI

Instytut Ogrzewnictwa, Wentylacji i Ochrony Powietrza
Politechnika Śląska

ZASTOSOWANIE METODY PLANOWANIA EKSPERYMENTU W BADANIACH NAD OPTYMALIZACJĄ PRACY MOKREGO ODPYLACZA

Streszczenie: W pracy przeprowadzono optymalizację parametrów pracy mokrego odpylacza w oparciu o równania empiryczne opisujące jego skuteczność odpylania i zapotrzebowanie mocy jednostkowej. Do wyznaczenia współczynników równań empirycznych zastosowano metodę planowania eksperymentu, która pozwoliła znacznie ograniczyć liczbę czasochłonnych pomiarów.

1. Wstęp

Dla celów optymalizacji parametrów pracy urządzenia odpylającego potrzebna jest znajomość równań opisujących jego skuteczność odpylania oraz zapotrzebowanie mocy jednostkowej, które stanowią główne kryteria optymalizacji. Najczęściej równania takie określa się eksperymentalnie. Wobec dużej czasochłonności pomiarów, głównie skuteczności odpylania, istotne jest znaczne ograniczenie ich liczby. Do opisu skuteczności odpylania i mocy jednostkowej mokrego odpylacza kinetycznego zastosowano metodę planowania eksperymentu z liniowo-kwadratową postacią równania aproksymacyjnego. Zastosowana metoda pozwoliła na znaczne ograniczenie liczby pomiarów, umożliwiając jednocześnie uzyskanie wystarczającej, dla celów optymalizacji, dokładności aproksymacji. W oparciu o wyznaczone równania przeprowadzono optymalizację parametrów pracy odpylacza, której wyniki wskazują na możliwość uzyskania znacznych oszczędności energii przy zastosowaniu optymalnego zestawu wartości parametrów pracy.

2. Metoda pięciopoziomowego ortogonalnego planowania eksperymentu

Pośród wielu metod planowania eksperymentu [1,2] metoda opierająca się na planie pięciopoziomowym ortogonalnym jest najbardziej efektywna. Metodę charakteryzuje stosunkowo mała liczba doświadczeń w przypadku poszukiwania modeli matematycznych z liczbą zmiennych niezależnych większą od 2, a także nieskomplikowany sposób wyznaczania współczynników równania aproksymacyjnego. Umożliwia ona również przeprowadzenie oceny dokładności uzyskanej aproksymacji. W metodzie tej [1] zakłada się, że badany obiekt opisany jest nieznaną charakterystyką nieliniową:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_s, z) \quad (1)$$

gdzie: x_1, x_2, \dots, x_s - oznaczają wejścia obiektu (zmienne niezależne),
 z - oznacza niemierzalne zakłócenia,

oraz przyjmuje się, że poszukiwana funkcja jest ciągła i ma jedno ekstremum, oraz że w otoczeniu danego punktu daje się ją aproksymować modelem liniowo-kwadratowym o postaci:

$$\begin{aligned} \hat{y} = & c_0 + c_1 x_1 + c_2 x_2 + \dots + c_s x_s + \\ & + c_{11} x_1^2 + c_{22} x_2^2 + \dots + c_{ss} x_s^2 + \\ & + c_{12} x_1 x_2 + \dots + c_{1s} x_1 x_s + \dots + \\ & + c_{23} x_2 x_3 + \dots + c_{2s} x_2 x_s + \dots + \\ & + c_{s-1, s} x_{s-1} x_s \end{aligned} \quad (2)$$

3. Przedmiot i zakres badań

Działania optymalizacyjne dotyczyły parametrów pracy tzw. odpylacza kinetycznego, przeznaczonego do odpylania odlotowych gazów przemysłowych metodą moką. Podstawowymi elementami tego urządzenia, którego przekrój poprzeczny przedstawia rys.1, są: zwężka Venturiego posiadająca możliwość zmiany szerokości gardzieli oraz przewał, które wraz ze schładzaczem i odkraplaczem wirowym stanowią jedną zwartą konstrukcję. Ustalenia parametrów pracy odpylacza kinetycznego, które są istotne w zakresie działań optymalizacyjnych, dokonano na podstawie analizy procesu odpylania w zwężce Venturiego i przewale [3]. Parametrami tymi w niniejszych badaniach były:

- w - prędkość gazu w gardzieli zwężki,
- m - względny wydatek wody podawanej do zwężki,
- h - wysokość poziomu wody w przewale

w następujących zakresach, które uwzględniają wartości stosowane powszechnie w eksploatacji odpylaczy ze zwężką Venturiego i przewalowych:

$$\begin{aligned} w &= 30 + 70 \text{ m/s} \\ m &= (0,4 + 3) \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{m}^3 \\ h &= (0 + 60) \cdot 10^{-3} \text{ m} \end{aligned}$$

Zachodzi zatem potrzeba określenia funkcji skuteczności odpylania η oraz mocy jednostkowej M odpylacza kinetycznego ujmujących wpływ powyższych parametrów pracy:

$$\eta = \eta(w, m, h) \quad (3)$$

$$M = M(w, m, h) \quad (4)$$

Opierając się na wynikach badań odpylaczy ze zwężką Venturiego i przewalowych, prezentowanych m.in. w pracach [3, 4], funkcję skuteczności odpylania należy zapisać równaniem (5), natomiast funkcja mocy jednostkowej określona jest równaniem (6):

$$\eta = 1 - \exp(-E) \quad (5)$$

$$M = \Delta p + \Delta p_w \quad m \quad (6)$$

gdzie:

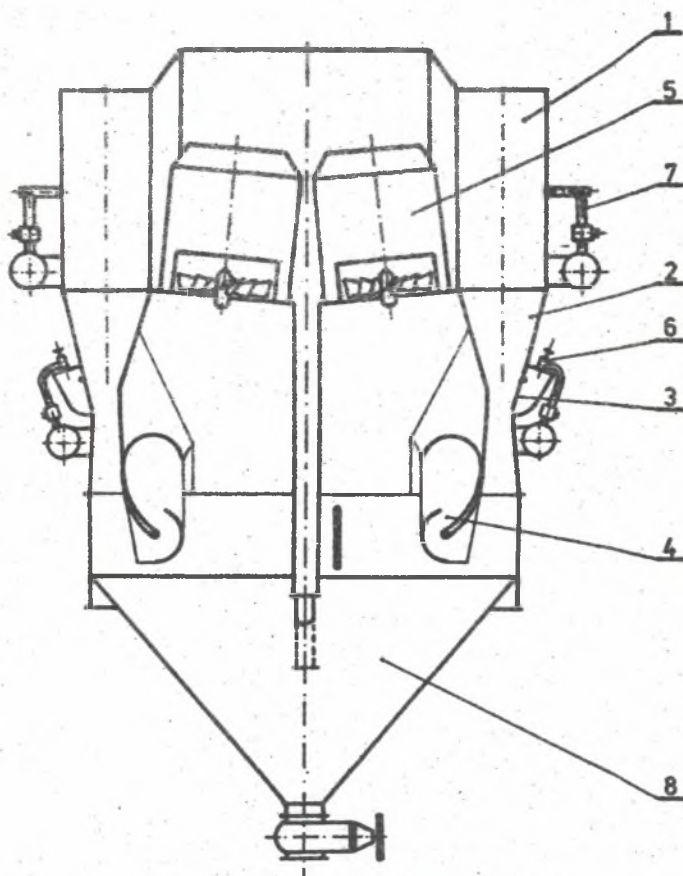
- E - wyrażenie uwzględniające parametry pracy odpylacza,
 Δp - strata ciśnienia gazu w obrębie odpylacza,
 Δp_w - nadciśnienie wody w kolektorze doprowadzającym wodę do zwężki Venturiego.

Dla odpylacza o określonej konstrukcji oraz konkretnych właściwości fizycznych aerozolu można zapisać:

$$M = f(w, m, h) \quad (7)$$

$$\Delta p = f(w, m, h) \quad (8)$$

$$\Delta p_w = f(m) \quad (9)$$



Rys.1. Przekrój poprzeczny odpylacza kinetycznego.
 1-schładzacz, 2-zwężka Venturiego, 3-przesłona gardzieli,
 4-przewał, 5-odkraplacz wirny, 6-układ podawania wody do zwężki, 7-układ podawania wody do schładzacza, 8-zbiornik wody.

Do wyznaczenia równań empirycznych opisujących funkcje (7) i (8) zastosowano metodę planowania eksperymentu, natomiast funkcja (9) została opisana metodą tradycyjną [5] przy założeniu kwadratowej zależności oporów przepływu od strumienia objętości wody, słuszną w zakresie ruchu burzliwego. Funkcje (7), (8), (9) przyjmą zatem postać równań (10), (11), (12), których współczynniki należało wyznaczyć w oparciu o eksperyment:

$$E = a_0 + a_1 w + a_2 m + a_3 h + a_{11} w^2 + a_{22} m^2 + a_{33} h^2 + a_{12} w m + a_{13} w h + a_{23} m h \quad (10)$$

$$\Delta p = b_0 + b_1 w + b_2 m + b_3 h + b_{11} w^2 + b_{22} m^2 + b_{33} h^2 + b_{12} w m + b_{13} w h + b_{23} m h \quad (11)$$

$$\Delta p_w = r m^2 \quad (12)$$

4. Plan i wyniki eksperymentu

Zgodnie z zasadami pięciopoziomowego planowania eksperymentu każda zmienna niezależna przyjmuje w badaniach pięć wartości. Zakładając jedno doświadczenie typu centralnego [1] to liczba pomiarów skuteczności odpylania i oporów przepływu potrzebnych do obliczenia współczynników równań (10) i (11) wyniesie 15. Szczegółowy plan doświadczeń przedstawiono w tablicy 1.

Tablica 1. Plan doświadczeń dla wyznaczenia współczynników równań (10) i (11) i wyniki pomiarów η oraz Δp .

Nr. pomiaru	Wartości parametrów			Wyniki pomiarów	
	w m/s	m $10^{-3} \text{ m}^3/\text{m}^3$	h 10^{-3} m	η %	Δp Pa
1	33,54	0,63	5,3	92,42	1670
2	66,46	0,63	5,3	97,39	3690
3	33,54	2,77	5,3	98,43	2490
4	66,46	2,77	5,3	99,54	4180
5	33,54	0,63	54,7	98,14	2845
6	66,46	0,63	54,7	98,78	4325
7	33,54	2,77	54,7	99,31	3490
8	66,46	2,77	54,7	99,70	4960
9	30	1,7	30	98,37	2680
10	70	1,7	30	99,24	4650
11	50	0,4	30	96,32	2785
12	50	3	30	99,17	3445
13	50	1,7	0	97,86	2705
14	50	1,7	60	99,24	3690
15	50	1,7	30	98,78	3245

Eksperyment przeprowadzono na stanowisku w skali półtechnicznej o wydajności $1500 \text{ m}^3/\text{h}$ powietrza. Badany odpylacz kinetyczny stanowił wycinek odpylacza przemysłowego traktowany jako model w skali naturalnej. Jako pył testowy przyjęto pył pochodzący z kotłów energetycznych o składzie ziarnowym podanym w tabl.2 oraz o gęstości $2000 \text{ kg}/\text{m}^3$ i kącie zwilżania $50 \div 70^\circ$.

Tablica 2. Skład ziarnowy pyłu użytego w badaniach odpylacza kinetycznego.

Srednica zastępcza	μm	0 ÷ 2	2 ÷ 5	5 ÷ 10	10 ÷ 20	20 ÷ 40	40 ÷ 60	> 60
Udział masowy	%	6,3	17,2	52,1	13,8	6,5	3,8	0,3

W wyniku przeprowadzonych, zgodnie z planem doświadczeń, pomiarów uzyskano wartości całkowitej skuteczności odpylania oraz oporów przepływu, które zestawiono w tabl.1. Pozwoliły one na obliczenie, według [1], współczynników równań (10) i (11). Wartości tych współczynników wynoszą:

$a_0 = 2,266$		$b_0 = 1,752 \cdot 10^3$	kg/ms ²
$a_1 = -2,687 \cdot 10^{-2}$	s/m	$b_1 = -52,04$	kg/m ² s
$a_2 = 8,417 \cdot 10^2$	-	$b_2 = 6,081 \cdot 10^5$	kg/ms ²
$a_3 = 35,183$	1/m	$b_3 = 3,221 \cdot 10^4$	kg/m ² s ²
$a_{11} = 5,43 \cdot 10^{-4}$	s ² /m ²	$b_{11} = 1,14$	kg/m ³
$a_{22} = -8,142 \cdot 10^4$	-	$b_{22} = -5,472 \cdot 10^7$	kg/ms ²
$a_{33} = 89,7$	1/m ²	$b_{33} = -4,4 \cdot 10^4$	kg/m ³ s ²
$a_{12} = 4,138$	s/m	$b_{12} = -2,43 \cdot 10^3$	kg/m ² s
$a_{13} = -0,32$	s/m ²	$b_{13} = -2,35 \cdot 10^2$	kg/m ³ s
$a_{23} = -4,375 \cdot 10^3$	1/m	$b_{23} = -1,37 \cdot 10^5$	kg/m ² s ²

Wartość współczynnika r została wyznaczona w wyniku odrębnych pomiarów i wyniosła $r = 6,975 \cdot 10^9$ kg/ms². Tak więc ostatecznie funkcje skuteczności odpylania i mocy jednostkowej odpylacza kinetycznego przyjmują postać równań (13) i (14):

$$\eta = 1 - \exp \left[- (2,266 - 2,687 \cdot 10^{-2} w + 8,417 \cdot 10^2 m + 35,183 h + 5,43 \cdot 10^{-4} w^2 - 8,142 \cdot 10^4 m^2 + 89,7 h^2 + 4,138 wm - 0,32 wh - 4,375 \cdot 10^3 mh) \right] \quad (13)$$

$$M = 1,752 \cdot 10^3 - 52,04 w + 6,081 \cdot 10^5 m + 3,221 \cdot 10^4 h + 1,14 w^2 - 5,472 \cdot 10^7 m^2 - 4,4 \cdot 10^4 h^2 - 2,43 \cdot 10^3 wm - 2,35 \cdot 10^2 wh - 1,37 \cdot 10^5 mh + 6,975 \cdot 10^9 m^3, \quad w/\frac{m}{s}, Pa \quad (14)$$

5. Ocena dokładności aproksymacji

Ocenę dokładności uzyskanej aproksymacji oparto na zaproponowanej w [1] wariancji uogólnionej $\text{var}(\hat{y})$ współczynników równania liniowo-kwadratowego. Dla oszacowania błędu aproksymacji równaniami (10) i (11) obliczono wartości $\pm \sqrt{\text{var}(\hat{y})}$ dla wszystkich przeprowadzonych doświadczeń. W przypadku skuteczności odpylania wartości te są praktycznie stałe i wynoszą $\pm 0,1$, co odpowiada $\pm 0,75$ % skuteczności na poziomie 92 % oraz $\pm 0,1$ % skuteczności na poziomie 99 %. W przypadku oporów przepływu zawierają się one w przedziale $\pm (50 \div 70)$ Pa, co daje błąd względny od 1 do 4 % w zależności od wartości oporów przepływu.

W tabl.3 zestawiono wartości skuteczności odpylania oraz mocy jednostkowej odpylacza uzyskane w wyniku pomiarów i obliczone wg wzorów (13) i (14). Uzyskaną dokładność aproksymacji można uznać za wystarczającą dla celów optymalizacji.

6. Optymalizacja parametrów pracy odpylacza

W oparciu o równania aproksymacyjne (13) i (14) przeprowadzono optymalizację parametrów pracy odpylacza kinetycznego. Procedura optymalizacyjna polegała na poszukiwaniu dla zadawanej wartości skuteczności odpylania, w oparciu o badania iteracyjne, najkorzystniejszego, a także najniekorzystniejszego,

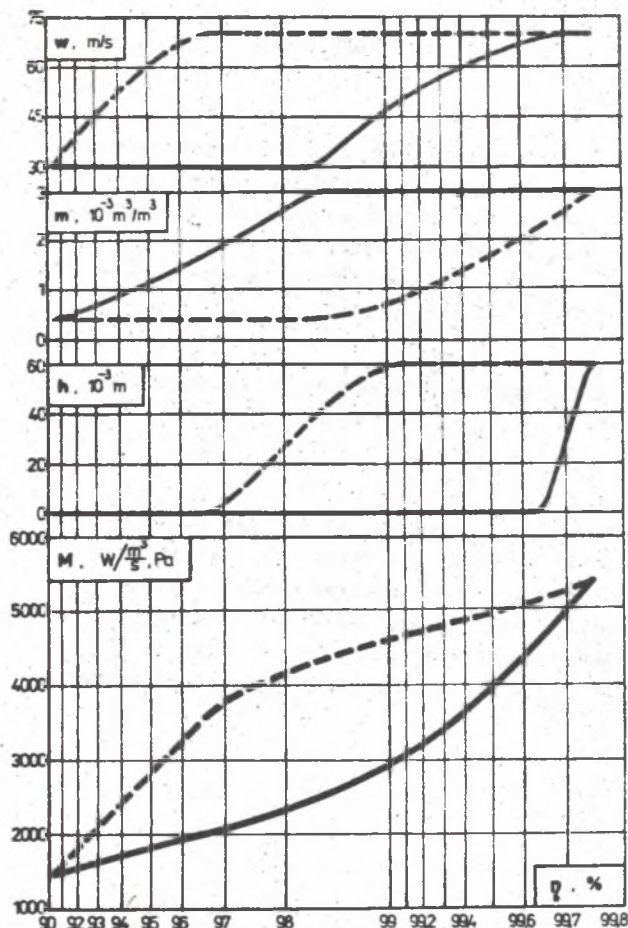
Tablica 3. Porównanie wyników pomiarów z obliczeniami wg wzorów (13) i (14).

Nr pomiaru	Skuteczność odpylania η , %		Moc jednostkowa $N, W/\frac{m^3}{s}$	
	zmierzona	obliczona wg wzoru (13)	zmierzona	obliczona wg wzoru (14)
1	92,42	93,13	1675	1725
2	97,39	97,30	3695	3650
3	98,43	98,40	2510	2455
4	99,54	99,53	4200	4210
5	98,14	98,20	2950	2795
6	98,78	98,81	4330	4345
7	99,31	99,33	3510	3510
8	99,70	99,67	4990	4885
9	98,37	98,13	2690	2680
10	99,24	99,31	4650	4685
11	96,32	96,28	2790	2750
12	99,17	99,29	3465	3520
13	97,86	97,82	2715	2660
14	99,24	99,22	3700	3720
15	98,78	98,59	3255	3230

słego pod względem energetycznym, rozwiązania polegającego na określeniu wartości parametrów pozwalających uzyskać zadaną skuteczność odpylania. Odpowiednie obliczenia wykonano na e.m.c. "NOVA-2" w oparciu o odpowiedni algorytm [3]. W wyniku tych obliczeń uzyskano zależności przedstawione na rys. 2, gdzie linie ciągłe oznaczają zależność optymalną $\eta(\dot{M}_{\min})$ oraz realizujące tę zależność zestawy wartości w, m, h , natomiast linie przerywane oznaczają zależności najniekorzystniejsze.

7. Wnioski końcowe

1. Zastosowana w pracy metoda planowania eksperymentu pozwoliła na znaczne ograniczenie liczby czasochłonnych pomiarów, jednakże wymaga ona dużej dokładności ich wykonania.
2. Model liniowo-kwadratowy właściwy dla zastosowanej metody planowania eksperymentu nadał się bezpośrednio do opisu oporów przepływu odpylacza kinetycznego. Modelem takim można opisać skuteczność odpylania, jeżeli stanowi on wykładnik potęgowy E funkcji $\eta = 1 - \exp(-E)$.
3. Przy eksploatacji odpylacza kinetycznego z uwzględnieniem optymalizacji jego parametrów pracy dla osiągnięcia zadanej skuteczności należy w pierwszej kolejności zwiększać względny wydatek wody w zwężce, natomiast w drugiej kolejności należy zwiększać prędkość gazu w gardzieli zwężki.
4. Uzyskane w wyniku badań konkretne wartości skuteczności odpylania odnoszą się jedynie do własności badanego pyłu. W odniesieniu do oporów przepływu i mocy jednostkowej odmienne własności pyłu nie będą wpływać na uzyskane wyniki w sposób istotny.



Rys.2. Moc jednostkowa dla określonych skuteczności odpylania w warunkach optymalnych i najniekorzystniejszych nastaw parametrów pracy odpylacza kinetycznego.

Literatura

- [1] Mańczak K.: Technika planowania eksperymentu. WNT, Warszawa 1976.
- [2] Zieliński R.: Wybrane zagadnienia optymalizacji statystycznej. PWN, Warszawa 1982.
- [3] Szulikowski J.: Badania nad optymalizacją parametrów pracy mokrego odpylacza kinetycznego. Praca doktorska. Politechnika Śląska, Gliwice 1983 (niepubl.).
- [4] Warych J.: Odpylanie gazów metodami mokrymi. WNT, Warszawa 1979.
- [5] Szydłowski H.: Teoria pomiarów. PWN, Warszawa 1981.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ПЛАНИРОВКИ ЭКСПЕРИМЕНТА В ИССЛЕДОВАНИЯХ ПО ОПТИМИЗАЦИИ ДЕЙСТВИЯ МОКРОГО ПЫЛЕУЛОВИТЕЛЯ

Р е з ю м е

В работе проведено оптимизацию параметров действия мокрого пылеуловителя опираясь на эмпирические уравнения описывающие его эффективность пылеулавливания и требование удельной мощности. К обозначению коэффициентов эмпирических уравнений применено метод планировки эксперимента который позволил значительно ограничить число времяпоглощающих замеров.

APPLICATION OF EXPERIMENT DESIGN METHOD TO THE RESEARCH ON THE OPTIMIZATION OF DUST SCRUBBER PERFORMANCE

S u m m a r y

The paper presents an optimization of dust scrubber performance parameters on the basis of empirical equations describing dust collection efficiency and specific power requirements of the dust scrubber. In order to determine coefficients in the empirical equations the method of experiment design has been applied owing to which it has been possible to reduce significantly the number of time-consuming measurements.