

Bolesław RACZYŃSKI

Instytut Podstaw Inżynierii Środowiska
PAN - Zabrze

WPLYW NIEKTÓRYCH PARAMETRÓW GAZU I PYŁU NA OPÓR HYDRAULICZNY I SKUTECZNOŚĆ ODPYLANIA W FILTRZE ZE ZŁOŻEM NASYPOWYM

Streszczenie. W referacie przedstawiono własne wyniki badań wpływu temperatury i wilgotności odpylanego gazu na skuteczność zatrzymywania pyłu i na opór hydrauliczny złoża nasypowego utworzonego z klinkieru cementu portlandzkiego. Podjęto próbę jakościowego wyłumaczenia uzyskanych wyników badań w powiązaniu z danymi literaturowymi oraz równaniami ujmującymi fizyczne własności gazu w zależności od temperatury i wilgotności.

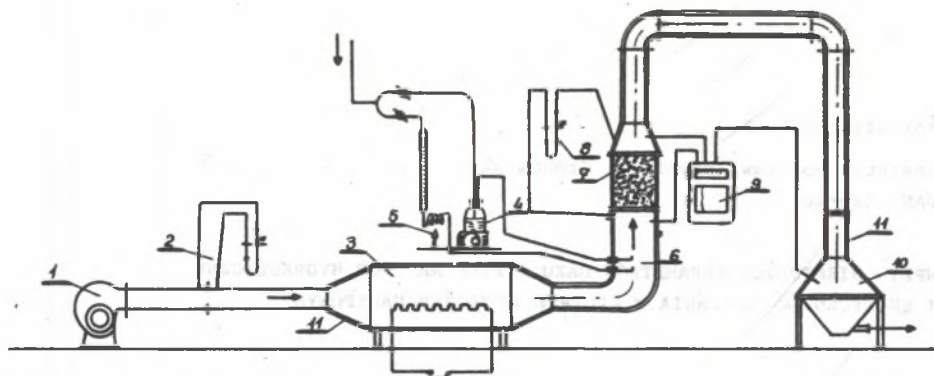
WSTĘP

Skomplikowany i niedostatecznie zbadany mechanizm odpylania w filtrach ze złożem nasypowym spowodował, że urządzenia te nie zostały dotychczas szerzej rozpowszechnione. Zachodzący w filtrach nasypowych proces filtracji nieustalonej jest przyczyną znacznych różnic w skuteczności ich działania w zależności od własności pyłów, wymiarów elementów złoża, parametrów gazu oraz czasu pracy filtru. Tylko dokładne rozpoznanie wszystkich cząstkowych zależności oraz połączenie ich w jednolitą współzależność może pozwolić na właściwe projektowanie, konstrukcję i eksploatację filtrów nasypowych, zapewniając ich niezawodne założone działanie.

Wpływ temperatury i wilgotności gazu na opór hydrauliczny i skuteczność odpylania w filtrze nasypowym

Istnieje znaczna liczba publikacji dotycząca wpływu temperatury gazu na skuteczność filtracji. Badania wpływu temperatury na skuteczność filtracji filtrów ceramicznych przedstawiono w [1], filtrów z silikonowanych włókien szklanych w [2] oraz filtrów z tworzyw węglowych w [3]. Autorzy wymienionych prac nie są zgodni co do kierunku wpływu temperatury i wilgotności odpylanego gazu na skuteczność filtracji w filtrach nasypowych. Podjęto zatem w tym zakresie badania dla dokonania oceny jakościowej.

Badania prowadzono w układzie pomiarowym schematycznie przedstawionym na rys. 1; jako złożo nasypowe stosowano klinkier o granulacji 5-7 mm. Żądaną temperaturę gazu przed filtrem osiągnęto poprzez pracę nagrzewnicy o mocy 15 kW.



Rys. 1. Schemat układu pomiarowego do badania skuteczności filtracji i oporu hydraulicznego filtru w zależności od temperatury i wilgotności powietrza
 1 - wentylator, 2 - punkt pomiaru natężenia przepływu, 3 - nagrzewnica oporowa, 4 - podmuchowy podajnik pyłu, 5 - wytwornica pary z przegrzewaczem, 6 - sonda pyłu i pary, 7 - filtr ze złożem nasypowym, 8 - punkt pomiaru oporów hydraulicznego filtru, 9 - rejestrator temperatury i termopary, 10 - filtr bibułowy, 11 - izolacja termiczna

Fig. 1. Diagram of measurement system for testing of filtration efficiency and hydraulic resistance of the filter as a function of temperature and air damp

Temperaturę powietrza mierzono przed i za badanym filtrem nasypowym oraz przed kontrolnym filtrem bibułowym. W przypadku prowadzenia badań skuteczności filtracji i oporu hydraulicznego przy podwyższonej wilgotności powietrza do układu doprowadzano przegrzaną parę wodną.

Natężenie przepływu powietrza w układzie pomiarowym mierzono za pomocą kryzy pomiarowej po stronie dopływu powietrza zimnego. Po ustaleniu się w układzie pomiarowym założonej temperatury oraz prędkości powietrza, która w prowadzonych badaniach wynosiła 1,0 m/s, rozpoczynano dozowanie pyłu skalenia. Koncentracja pyłu przed filtrem wynosiła około 3,0 g/m³. Za badanym filtrem nasypowym umieszczano kontrolny filtr bibułowy. Skuteczność badanego filtru określono na podstawie masy pyłu zatrzymanego na filtrze bibułowym i masy pyłu podanego.

W przypadku badań przy podwyższonej wilgotności powietrza do układu wprowadzano ściśle określoną ilość przegrzanej pary wodnej, którą wytwarzano w specjalnie do tego celu wykonanym podgrzewaczu. Kontrolnych pomiarów wilgotności powietrza w układzie pomiarowym dokonano przy użyciu rurki wypełnionej granulowanym chlorkiem wapnia. Badania wykonano przy temperaturach powietrza 293, 393, 453 i 483 K i wilgotności bezwzględnej powietrza 8,0 g/m³ oraz przy wilgotnościach bezwzględnych 8,0; 17,4; 21,6 i 31,7 g/m³ i temperaturze gazu 363 K.

Tabela 1

Wyniki pomiarów skuteczności filtracji i oporów przepływu przez warstwy klinkieru o granulacji 5-7 mm, grubości 195 mm i prędkości dopływu powietrza 1,0 m/s w zależności od temperatury powietrza

Lp.	Czas pracy filtru t min.	Zapylenie powietrza przed filtrem z g/m^3	Skuteczność filtracji η_c w zależności od temperatury powietrza				Opór przepływu przez złożę w zależności od temperatury powietrza				Obciążenie pyłowe filtru kg/m^3
			293 K	393 K	453 K	483 K	$\Delta P,$		Pa		
1	15	2,97	94,3	93,5	93,0	93,0	981,0	990,8	1000,6	1030,0	13,0
2	30		96,3	93,9	93,8	93,2	1216,4	1370,1	1356,2	1374,4	26,1
3	45		94,7	93,5	93,2	93,2	1442,0	1500,9	1620,9	1669,6	39,0
4	60		94,5	93,0	93,2	93,2	1765,8	1814,8	1860,0	1860,0	52,0
5	75		94,4	91,8	91,5	91,0	2050,1	2120,8	2158,0	2345,8	65,0
6	90		94,2	91,2	90,2	89,5	2413,2	2437,2	2580,0	2603,7	78,0
7	105		94,0	89,6	89,0	88,7	2660,8	2701,5	2720,2	2910,0	91,0

Wyniki badań skuteczności filtracji warstwy nasypowej klinkieru w zależności od temperatury powietrza ujęto w tabeli 1. Wynika z niej, że skuteczność filtracji warstwy złoża nasypowego maleje ze wzrostem temperatury powietrza. Przy tym obserwuje się szybszy spadek skuteczności przy większych obciążeniach pyłowych. Według Zimona ze wzrostem temperatury gazu wzrasta przyczepność cząstek pyłu do powierzchni filtracyjnej [4], a więc skuteczność filtracji winna wzrastać, tymczasem wyniki badań wykazują obniżanie się skuteczności zatrzymywania pyłu ze wzrostem temperatury.

Obniżenie się skuteczności zatrzymywania pyłu ze wzrostem temperatury może być spowodowana zmianą lepkości gazu. Wiadomo, że ze wzrostem temperatury jego lepkość rośnie. Zależność lepkości gazu od temperatury ujmując wzór Sutherlanda [5], który dobrze opisuje zależność lepkości gazu od temperatury, ale jest niewygodny w obliczeniach.

Dla temperatur zawartych między 293–673 K zależność lepkości powietrza od temperatury ujmując wzór:

$$\frac{\mu}{\mu_0} = \left(\frac{T}{T_0}\right)^\omega \quad (1)$$

W podanych granicach temperatur wykładnik ω dla powietrza wynosi $0,768 \approx 3/4$.

Biorąc pod uwagę fakt, że zastosowany w badaniach pył skalenia (tabela 3) charakteryzuje się przewagą ziarn o dużych wymiarach (85% powyżej μm) oraz że stosowana prędkość dopływu powietrza do warstwy nasypowej była równie duża (1,0 m/s), z przeprowadzonej analizy mechanizmów wytrącania pyłu wynika, że dominującym czynnikiem mającym wpływ na skuteczność filtracji jest niewątpliwie mechanizm bezwładnościowy. Współczynnik zderzeń bezwładnościowych można przedstawić następująco [2]:

$$G_b^* = \psi_b(\text{Stk}) \frac{u a^2 f T_0^{3/4}}{18 \mu_0 D T^{3/4}} \quad (2)$$

Ponieważ dla powietrza

$$\frac{T_0^{3/4}}{\mu_0} = K_0 = \text{const}, \quad (3)$$

to

$$G_b^* = \psi_b(\text{Stk}) \frac{K_0 u a^2 f}{18 D T^{3/4}} \quad (4)$$

Przy założeniu, że we wzorze (4) ulega zmianie tylko temperatura filtrowanego gazu, łatwo zauważymy, że ze wzrostem temperatury skuteczność bez-

Tabela 2

Wyniki pomiarów skuteczności filtracji i oporów przepływu powietrza przez warstwę kilnkieru o granulacji 5-7 mm, grubości 195 mm i prędkości dopływu powietrza 1,0 m/s w zależności od wilgotności bezwzględnej powietrza

Lp.	Czas pracy filtru t min	Zapylenie powietrza przed filtrem z g/m ³	Skuteczność zatrzymywania pyłu przy temp. 363 K i wilgotności bezwzględnych powietrza x, g/m ³				Opór przepływu powietrza przez złożo nasypowe (Pa) o temp. 363 K i wilgotności bezwzględnych x, g/m ³				Obciążenie pyłowe filtru x kg/m ³
			8,0	17,4	21,6	31,7	8,0	17,4	21,6	31,7	
1	15	2,97	93,0	94,2	95,1	96,6	1030,0	1010,4	971,2	951,6	13,0
2	30		93,2	94,2	95,2	96,5	1373,4	1353,8	1304,7	1265,5	26,1
3	45		93,5	94,0	95,3	96,6	1667,7	1638,3	1608,8	1589,2	39,0
4	60		93,2	93,9	95,0	95,2	1863,9	1834,5	1795,2	1740,4	52,0
5	75		91,0	93,1	94,5	95,0	2344,6	2305,4	2295,5	2266,1	65,0
6	90		89,5	92,7	93,7	94,5	2599,6	2570,2	2540,8	2501,5	78,0
7	105		88,7	91,1	92,5	94,0	2913,6	2854,7	2815,5	2776,2	91,0

władnościowego wytrącania pyłu obniża się, co jest zgodne z uzyskanymi wynikami doświadczeń. A więc stwierdzony doświadczalnie spadek skuteczności odpylania ze wzrostem temperatury może być wytłumaczony zmianą lepkości powietrza.

Zmiana ta niewątpliwie w większym stopniu obniża skuteczność filtracji niż wynikający wzrost skuteczności filtracji z uwagi na zwiększoną przyczepność cząstek ze wzrostem temperatury.

Ogólne równanie oporu przepływu gazu czystego przez warstwę porowatą ma postać:

$$\Delta P = \lambda_0 \cdot \frac{\rho_u^2 h}{\rho_p} \quad (5)$$

Wprowadzając do równania (5) zależność (1) otrzymamy równanie oporu hydraulicznego w następującej postaci:

$$\Delta P = \lambda_0 \frac{T^{3/4} u^2 h}{\rho_p} \quad (6)$$

Z równania (6) wynika, że ze wzrostem temperatury odpylanego gazu opór hydrauliczny złoży rośnie, co potwierdzają przeprowadzone w tym zakresie badania.

Ze wzrostem wilgotności odpylanego powietrza skuteczność zatrzymywania pyłu rośnie. Wzrost skuteczności filtracji ze wzrostem wilgotności powietrza tłumaczyć należy niewątpliwie tym, że:

- ze wzrostem wilgotności powietrza rośnie przyczepność cząstek pyłu do powierzchni elementów filtracyjnych [4],
- wzrost wilgotności powietrza powoduje obniżenie się jego lepkości, co również w konsekwencji prowadzi do wzrostu skuteczności wytrącania.

Wzrost wilgotności powietrza, jak wykazały badania, powoduje obniżenie się oporu hydraulicznego warstwy nasypowej (tabela 2).

Obniżenie się oporu hydraulicznego warstwy nasypowej ze wzrostem wilgotności wynika ze zmiany parametrów gazu. Z analizy równania na opór przepływu gazu przez złożę nasypowe wynika, że opór hydrauliczny zależy między innymi od lepkości i gęstości gazu. Wzrost wilgotności gazu powoduje zarówno obniżenie lepkości jak i gęstości powietrza, co w konsekwencji prowadzi do obniżenia oporu hydraulicznego złoża nasypowego.

Tabela 3

Fizyczne własności pyłu skalenia zużytego do badań

Lp.	Skład ziarnowy		Gęstość δ_t kg/m ³	Porowatość β_u
	Przedział wymiarowy a, μm	Udział wagowy K, %		
1	40-60	4,75	2600	0,64
2	30-40	4,29		
3	20-30	8,74		
4	10-20	57,06		
5	5-10	11,64		
6	0-5	15,22		

WNIOSKI

W przypadku zastosowania filtrów ze złożem nasypowym do odpylania gazów o wyższych temperaturach należy się liczyć z pewnym obniżeniem skuteczności filtracji i wzrostem oporu przepływu gazu.

Ze wzrostem bezwzględnej wilgotności odpylanych gazów skuteczność zatrzymywania pyłu rośnie, obniża się natomiast opór przepływu gazu.

LITERATURA

- [1] First M.W., Graham J.B. i inni: Ind and Engr. Chem. 1956, t. 48, s. 692.
- [2] Raczyński B.: Własności filtracyjne niektórych silikonowanych tkanin szklanych w zastosowaniu do pyłomierzy przemysłowych. Biuletyn ZBN GOP PAN, 1966, nr 6, s. 27.
- [3] Raczyński B.: Zagadnienie wpływu temperatury na skuteczność filtracji w filtrze tkaninowym. Sympozjum RWPG. Teoria filtracji aerozoli i jej zastosowanie. Zabrze, 1971. Wyd. ZOSRP-PAN.
- [4] Zimon A.D.: Adgezija pyli i poroszkow. Izd. Chimija, Moskwa 1967.
- [5] Hobler T.: Ruch ciepła i wymienniki. WNT, Warszawa 1971, s. 45.
- [6] Jeans A.: Kinetic Theory of gases. London, 1940, s. 76.

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

a	- wymiar cząstki pyłu
D	- charakterystyczny wymiar elementu złoża nasypowego
G_b^x	- współczynnik zderzeń bezwładnościowych
h	- grubość warstwy filtracyjnej
K_o	- stała
ΔP	- opór hydrauliczny filtru
Stk	- liczba Stokesa
T	- temperatura bezwzględna
u	- prędkość przepływu gazu
ρ	- gęstość gazu
ρ_f	- gęstość pyłu
δ_p	- wymiar poru w danej chwili filtracji
λ	- współczynnik oporu warstwy złoża
μ	- współczynnik dynamicznej lepkości gazu

ВЛИЯНИЕ НЕКОТОРЫХ ПАРАМЕТРОВ ГАЗА И ПЫЛИ НА ГИДРАВЛИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ ФИЛЬТРАЦИИ В ФИЛЬТРАХ С ГРАНУЛИРОВАННЫМ СЛОЕМ

Резюме

В докладе приведены результаты исследований влияния температуры и влажности очищаемого от пыли газа на эффективность пылеудавливания и гидравлическое сопротивление насыпного слоя, образованного из клинкера порландского цемента.

Предпринята попытка качественного истолкования полученных результатов исследований в сопоставлении с литературными данными и уравнениями, выражающими физические свойства газа в зависимости от температуры и влажности.

AN INFLUENCE OF GAS AND DUST PARAMETERS ON THE HYDRAULIC RESISTANCE AND FILTERING EFFICIENCY IN THE FILTER WITH GRANULAR BED

Summary

In the paper results of investigation of the influence of temperature and humidity of the filtered gas on collection efficiency and pressure drop in granular bed at Portland cement clinker have been showed.

In connection with literature data and the equations describing the dependence of physical properties of the gas on temperature and humidity, a quantitative interpretation of the result received has been presented.