

ВАЛЕРЬЯН БЛИНИЧЕВ<sup>1</sup>, MAŁGORZATA ŚRODULSKA-KRAWCZYK<sup>2</sup>,  
ВАЛЕНТИН ШАРНИН<sup>1</sup>

## ZALEŻNOŚĆ MASY ZATRZYMANEJ OD MASY DOSTARCZONEGO PYŁU DO ZAWIESINY ODPYLAJĄCEJ

### DETENTIONS WEIGHT DEPENDENCE OF WEIGHT THE DUST PROVIDED FOR THE DEDUSTING SUSPENSION

#### Streszczenie

W pracy przedstawiono zależność masy zatrzymanej pyłu od masy dostarczonej do zawiesiny odpylającej. Model matematyczny procesu zbudowano na bazie rozwiniętego modelu Kerna Seatona przez analogię do procesu wzrostu oporu cieplnego osadu na powierzchni wymiany ciepła, w miarę dostarczania substancji osadotwórczej. Weryfikacji modelu dokonano na stanowisku laboratoryjnym, w którym kierowano aerozol bezpośrednio na lustro krzyżowo przepływającej cieczy. Prędkość aerozolu zmieniano w granicach  $10 \div 30$  m/s. W badaniach użyto pył talku i bieli tytanowej.

*Słowa kluczowe: mokre odpylanie gazu, uderzenie aerozolu w lustro cieczy, model matematyczny*

#### Abstract

The paper presents the dependence of the detention weight of the dust from the weight provided for suspension. The mathematical model has been build on the basis of the Kern Seaton model as analogy to the growth process of thermal resistance of deposits on heat on the heat transfer surface with the continuous supply of the sediment substance. The model verification has been conducted in the laboratory, where the aerosol has been directed directly on the cross-flowing liquid mirror. The aerosol velocity was varied in the range of  $10 \div 30$  m/s. The studies used talcum powder and titanium dioxide.

*Keywords: gas scrubbing, impact of aerosol to the liquid surface, mathematical model*

<sup>1</sup> Д.т.н., профессор Валерьян Николаевич Блиничев, д.х.н., профессор Валентин Аркадьевич Шарнин, Ивановский государственный химико-технологический университет.

<sup>2</sup> Dr inż. Małgorzata Śródulska-Krawczyk, Politechnika Krakowska.

## 1. Wstęp

W procesie mokrego odpylania, w warunkach pełnej recyrkulacji cieczy, stężenie ciała stałego w zawieszinie rośnie. W miarę wzrostu stężenia może dojść do obniżenia skuteczności wychwytywania cząstek pyłu a więc do zmian chłonności zawiesiny w czasie. Zmiana chłonności zależy przede wszystkim od prędkości strumienia aerozolu kierowanego w kierunku lustra cieczy. Cząstki pyłu zostaną pochłonięte przez zawiesinę, jeżeli zostaną pokonane siły napięcia powierzchniowego – a przy dużych stężeniach struktury wewnętrzne, od których mogą odbijać się cząsteczki pyłu.

Zmiana masy pyłu zatrzymanego w czasie może mieć charakter asymptotyczny, a więc teoretycznie można określić takie stężenie zawiesiny, które nie pozwoli na dalsze odpylanie gazu.

Podobne zjawisko można zaobserwować przy narastaniu warstwy osadu na powierzchniach kanałów i rur przez przepływający strumień zawiesin lub roztworów, z którego wytracają się cząstki kryształów na powierzchniach wymiany ciepła.

Pomimo licznych publikacji [1, 2, 3, 4, 6] dotyczących analizy wytrącania się osadów na powierzchni wymiany ciepła proces ten nie jest w pełni zbadany i ilościowo ujęty, z uwagi na bardzo złożony mechanizm powstawania osadów. Szczególnie duże rozbieżności występują przy ocenie wpływu prędkości przepływu czynnika na efekt powstawania warstwy osadu, a tym samym na współczynnik oporu cieplnego warstwy.

Wraz z częściowym przesłonięciem przekroju przewodu, wynikającym z utworzenia warstwy osadu, rośnie dynamiczne oddziaływanie strumienia na warstwę, a więc możliwa jest asymptotyczna zmiana grubości w czasie.

Przy założeniu, że współczynnik przewodzenia warstwy osadu pozostaje stały, niezależnie od jego grubości i zmiennych warunków narastania, miarą wzrostu grubości osadu może być zmiana oporu cieplnego utworzonej warstwy.

Model matematyczny dla obu omawianych przypadków można wyprowadzić z zależności:

$$\dot{m}_z = \dot{m}_d - \dot{m}_w \quad (1)$$

$\dot{m}_z$  – zmiana masy pyłu zatrzymanego w czasie, zmiana masy osadu w czasie

$\dot{m}_d$  – zmiana masy pyłu doprowadzonego w czasie, zmiana masy cząstek osadzonych

$\dot{m}_w$  – zmiana masy pyłu emitowanego w czasie, usuwanego z osadu

Przy założeniu, że:

$\dot{m}_d$  jest stałe w czasie oraz strumień masy pyłu emitowanego (strumień masy cząstek osadzonych) zależy od masy pyłu zatrzymanego w układzie (masy osadu)

$$\dot{m}_w = c \cdot m_z \quad (2)$$

Z równań (1) i (2) oraz przy założeniach, że  $m_z(0) = 0$  oraz

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \dot{m}_z = m_d \cdot t_c \quad (3)$$

uzyskujemy równanie na masę odłożonego osadu w czasie [5, 6]:

$$m_z(t) = \dot{m}_d \cdot t_c \cdot \left( 1 - \exp\left(-\frac{t}{t_c}\right) \right) \quad (4)$$

gdzie:  
 $t_c$  jest stałą czasową i określa czas, który jest wymagany dla osiągnięcia wielkości masy osadzonego pyłu odpowiadającej  $m_z^*$ , jeżeli pył zatrzymywany jest przy stałej wartości strumienia doprowadzania pyłu  $\dot{m}_d$ , bez procesu jego usuwania ( $\dot{m}_w = 0$ )

$m_z^*$  jest asymptotyczną masą zatrzymanego pyłu

$$t_c = \frac{m_z^*}{\dot{m}_d} \quad (5)$$

Po podstawieniu zależności (5) do (4) otrzymujemy:

$$m_z(t) = m_z^* \cdot (1 - \exp(-\beta \cdot t)) \quad (6)$$

gdzie  $\beta$  jest szybkością dochodzenia do stanu asymptotycznego i jest zależna od energii kinetycznej cząstek pyłu, pozwalającej na pokonanie sił napięcia powierzchniowego i rozbicie tworzących się wewnętrznych struktur w warstwie cieczy, a w przypadku tworzącego się osadu od naprężania ścinającego osadzone cząstki ciała stałego.

## 2. Model matematyczny zmiany oporu cieplnego w czasie

Współczynnik oporu cieplnego warstwy osadu zmienia się w czasie wskutek stopniowego wzrostu masy zanieczyszczeń. Często jednak, po okresie szybkiego wzrostu warstwy, jej grubość, a tym samym opór cieplny są praktycznie stałe. Istnieją zatem warunki do równoczesnego usuwania zanieczyszczeń z powierzchni.

Kern i Seaton [5] stwierdzili, że po okresie szybkiego powstawania warstwy osadu, grubość osadu oraz jego opór cieplny pozostawały praktycznie stałe. Wprowadzili funkcję zmiany oporu cieplnego w czasie, w postaci

$$R_f = R_f^* \cdot [1 - \exp(-\beta \cdot t)] \quad (7)$$

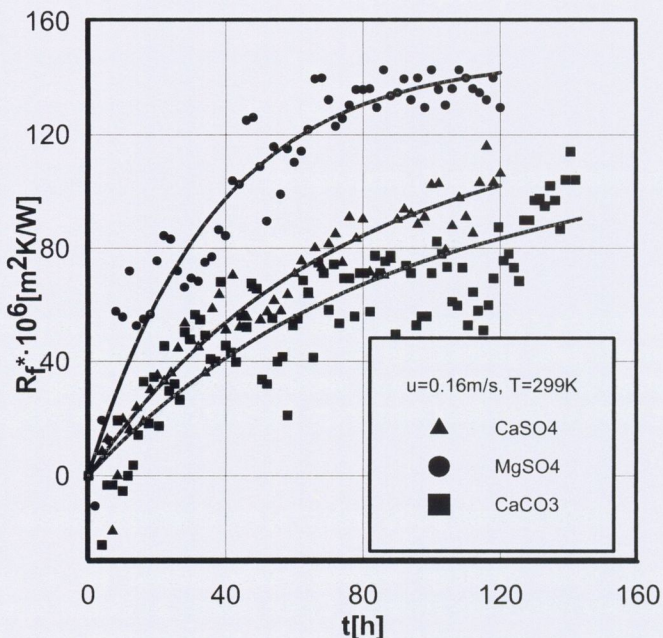
gdzie  $R_f^*$  jest asymptotyczną wartością oporu cieplnego przy czasie  $t \rightarrow \infty$  [5].

Model Kerna-Seaton'a [5] stał się modelem podstawowym, opisującym zmienność wartości współczynnika oporu cieplnego w czasie. Różnice pomiędzy modelem podstawowym oraz modelami pozostałymi polegają na odmiennym określaniu strumienia osadzającego i usuwającego.

Model matematyczny zweryfikowano na stanowisku, którego zasadniczym elementem stanowiska był wymiennik ciepła typu „rura w rurze” o długości 2 m i powierzchni wymiany ciepła  $0,1 \text{ m}^2$ .

Na rys. 1 przedstawiono, przykładowo, zależność  $R_f = f(t)$  dla trzech środków osadotwórczych przy  $u = 0,16 \text{ m/s}$  i  $T = 299 \text{ K}$ .

Na podstawie otrzymanych zależności  $R_f = f(t)$  widać, że zmiana współczynnika oporu cieplnego osadu ma charakter asymptotyczny, tak więc do opisu procesu przyjęto zależność Kerna – Seaton'a.



Rys. 1. Zależność  $R_f = f(t)$

Fig. 1. The  $R_f = f(t)$  function

Wartości współczynników  $R_f^*$ ,  $\beta$ ,  $t_0$  w równaniu (9) wyznaczone poprzez minimalizację funkcji będącej sumą kwadratów odchyleń pomiędzy punktami doświadczalnymi i teoretycznymi wyznaczonymi z równania i dla trzech badanych osadów przedstawiono poniżej.

Wartości  $R_f$ ,  $\beta$ ,  $t_0$  dla  $u = 0,16$  m/s,  $T = 299$  K

		CaSO <sub>4</sub>	CaCO <sub>3</sub>	MgSO <sub>4</sub>
$R_f^* \cdot 10^6$	m <sup>2</sup> K/W	121,2	116,5	144,6
$\beta$	1/h	0,0114	0,0117	0,0296
$t_0$	h	6	6	2,2

### 3. Model matematyczny zmiany masy zatrzymanej od dostarczonej do zawiesiny odpylającej

Wstawiając do równania (6) szybkość dochodzenia do stanu asymptotycznego w postaci (10)

$$\beta = \dot{m}_d \cdot k_2 \cdot u^2 \quad (8)$$

oraz uwzględniając, że możliwość zatrzymania cząstek pyłu przez ciecz i trwałą penetrację w głąb cieczy uzależniona jest od dynamicznej zwilżalności pyłu, zależność (8) zapisano w postaci:

$$\beta = k_2 \cdot \dot{m}_d \cdot u^{2-\alpha} \quad (9)$$

Uwzględniając zmienne warunki dostarczania pyłu do układu, wynikające ze zmiennej dyspersji pyłu przy różnych prędkościach wypływu aerozolu z dyszy wprowadzono współczynnik korekcyjny  $D$ . Strumień masy dostarczanej do układu można zapisać w postaci:

$$\dot{m}_d = k_1 \cdot u^D \quad (10)$$

Wstawiając (9) i (10) do równania (6) otrzymujemy model matematyczny zmian masy zatrzymanej pyłu w zawieszynie w postaci:

$$m_z = A \cdot u^D \cdot [1 - \exp(-B \cdot u^{2-c} \cdot m_d)] \quad (11)$$

$m_d$  – skumulowana masa doprowadzonego pyłu, wprost proporcjonalna do czasu eksploatacji.

Weryfikacji modelu dokonano na stanowisku laboratoryjnym, w którym kierowano aerozol bezpośrednio na lustro krzyżowo przepływającej cieczy. Prędkość aerozolu zmieniano w granicach  $10 \div 30$  m/s.

W badaniach użyto pyłu talku i bieli tytanowej. Osadzony w komorze uderzeniowej pył talku posiadał słabą dynamiczną zwilżalność, co objawiało się tym, że pływał po powierzchni cieczy. Pył bieli tytanowej był natychmiast wchłaniany przez ciecz, uwalniając jej powierzchnię do potrzebnej do dalszego wyłapywania cząstek pyłu.

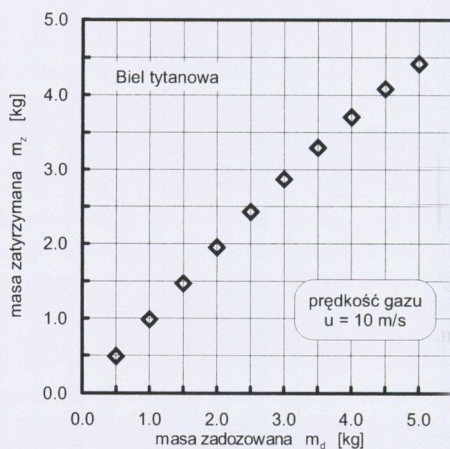
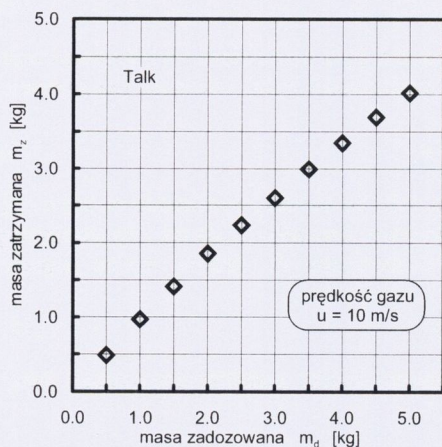
Współczynniki regresji równania (11) wyznaczono metodą estymacji liniowej.

Wartości współczynników regresji modelu (11)

	Talk	Biel
<i>A</i>	38,257	91,780
<i>D</i>	0,020	0,020
<i>B</i>	0,020	0,010
<i>C</i>	1,950	2,000

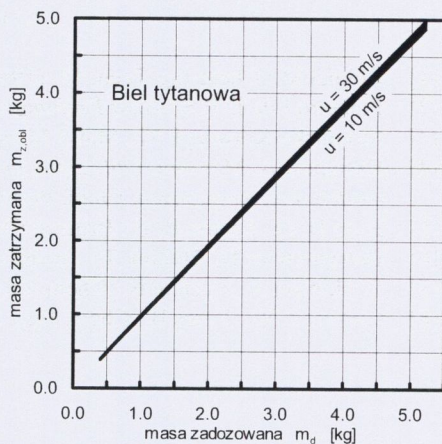
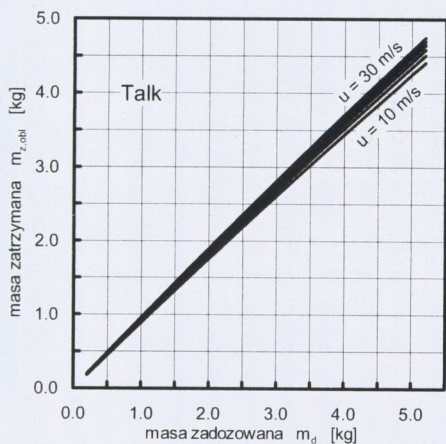
Średni błąd względny dopasowania korelacji wynosi:

- dla talku – 2,55%,
- dla bieli tytanowej – 1,76%.



Rys. 2. Doświadczalna zależność masy zatrzymanej od masy dostarczonej dla talku i bieli tytanowej

Fig. 2. Experimental dependence of the weight of the retained weight provided for talc and titanium dioxide



Rys. 3. Zależność masy zatrzymanej od masy dostarczonej do układu

Fig. 3. Mass dependence of custody from the mass supplied to the system

### Oznaczenia

$A, B, C, D$	– współczynniki regresji równania (11)	[–]
$k_1, k_2, k_3$	– współczynniki w równaniach	[–]
$m_z$	– masa pyłu zatrzymanego	[kg]
$m_d$	– masa pyłu zadozowanego do układu	[kg]
$\dot{m}_z$	– zmiana masy pyłu zatrzymanego w czasie	[kg/s]
$\dot{m}_d$	– zmiana masy pyłu doprowadzonego w czasie	[kg/s]
$\dot{m}_w$	– zmiana masy pyłu emitowanego w czasie	[kg/s]
$m_z^*$	– asymptotyczna wartość masy pyłu	[kg/s]
$R$	– współczynnik oporu cieplnego warstwy osadu	[m <sup>2</sup> K/W]
$R_f^*$	– asymptotyczna wartość oporu cieplnego przy czasie $t \rightarrow \infty$	[m <sup>2</sup> K/W]
$S_w$	– stężenie zapylenia	[kg/m <sup>3</sup> ]
$t, \tau$	– czas	[s]
$t_0$	– czas nukleacji	[s]
$t_c$	– stała czasowa	[s]
$V$	– wydatek objętościowy	[m <sup>3</sup> /s]
$u$	– prędkość liniowa	[m/s]
$\alpha, c,$	– współczynnik korekcyjny w funkcji usuwania	[–]

## Literatura

- [1] Bohnet M.: Chem-Ing-Tech, 57, (1985).
- [2] Pinheiro I de D.R.S.: *Heat Exchangers*, Kakac, Bergles, Mayinge, New York, 1981
- [3] Środulska-Krawczyk M., Mat. I Międz. Konf., Iwanowo – Plios, 1993.
- [4] Kutiepow A. M. i inni: *Obliczanie procesu powstawania osadów z wykorzystaniem modeli matematycznych*, Chim. Prom., 8, (1992).
- [5] Kern D. Q., Seaton R. E.: *Britisch Chem. Eng.*, 4, (1959).
- [6] Butrymowicz D., Hajduk T.: *Technika Chłodnicza i Klimatyzacyjna*, 3, (2006).
- [7] Watkinson A., Epstein N.: *Chem. Eng. Prog. Symp. Ser.*, 65, (1969).
- [8] Cleaver I. W., Yates B.: *Chem. Eng. Sci.*, 31, (1976).