

prof. dr h. inż. JERZY PIKOŃ
dr inż. JAN HEHLMANN

Polltechnika Śląska, Instytut Inżynierii Chemicznej i Budowy Aparatury, Gliwice

Zastosowanie osadników lamelowych w przemysłowych liniach technologicznych

W artykule omówiono możliwości aplikacyjne osadników lamelowych oraz przedstawiono algorytm projektowy, oparty o nowy, oryginalny model matematyczny procesu sedymentacji, opracowany w oparciu o badania zrealizowane dla wybranych materiałów.

Wstęp

Sedymentacja jako proces wydzielania cząstek ciała stałego z fazy ciekłej — stymulowana siłą grawitacyjną, znajduje tradycyjne zastosowanie w technologiach przygotowania stałych surowców, w technologiach utylizacyjnych oraz oczyszczania wód zrzutowych a także oczyszczania wód obiegowych i uzdatniania wód do celów przemysłowych i komunalnych. Stosowane w praktyce przemysłowej osadniki prostokątne lub kołowe wykazują jednak szereg wad, przy czym eliminacja ich wpływu na określony zbiór technologicznie istotnych parametrów:

$$T \in \{V_1, V_2, V_3, c_1, c_2, c_3, \dots\}$$

proWadzi do konieczności budowy urządzeń o znacznych wymiarach gabarytowych.

Wśród istotniejszych wad należy wyszczególnić:

- niekontrolowany, samoistny przepływ suspensji w dużych pojemnościach z wytworzeniem przestrzeni martwych;
- nierównomierne obciążenie przestrzeni roboczej wynikające ze sposobu doprowadzenia i odprowadzenia suspensji;
- długiej drogi opadania cząstek.

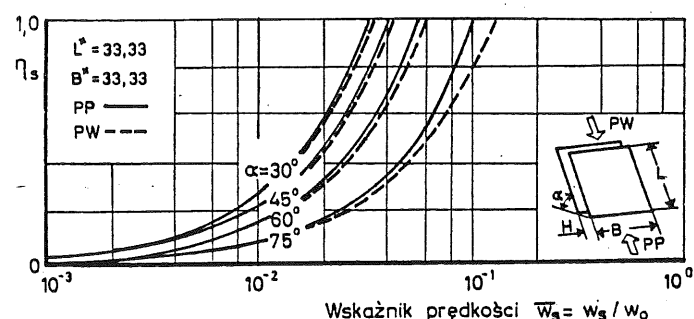
Wpływ powyższych wad można zasadniczo ograniczyć przez zastosowanie ukośnych wkładów lamelowych. Sedymentacja przebiega wówczas w laminarnym polu przepływu pomiędzy równoległymi płytami, a maksymalna wysokość osiadania cząstek zostaje zredukowana do pionowej odległości między płytami. Komora odstożnika może mieć zabudowę w postaci: — rur o przekroju kołowym, kwadratowym bądź prostokątnym, — płyt semiplaszczynowych, płyt o profilu falistym bądź o innych formach geometrycznych. Osadniki lamelowe mogą pracować w reżimie prze-

przepływu współ- i przeciwpłdowym oraz krzyżowym wg rysunku 1, przy czym miarodajnym kryterium kwalifikacyjnym jest relatywne ukierunkowanie strug suspensji i wydzielonego ciała stałego.

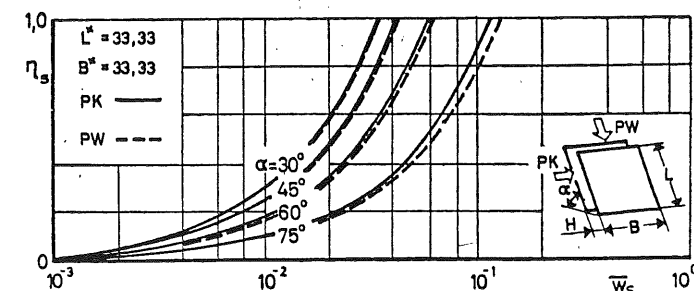
Przeprowadzone przez Bindera [1] badania w zakresie sedymentacji suspensji monodispersyjnej racjonalizują wybór konstrukcji oraz systemu hydraulicznego.

Rys. 2 i 3 przedstawia zależność skuteczności sedymentacyjnej w funkcji wskaźnika prędkości dla układu płyto- wego w przepływie współprądowym PW, przeciwpłdowym PP i przepływie krzyżowym PK. Okazuje się, że istnieje pewna gradacja; najkorzystniejszy jest system przeciwpłdowy a następnie krzyżowy i współprądowy. Różnice są jednak nieznaczne i wynoszą:

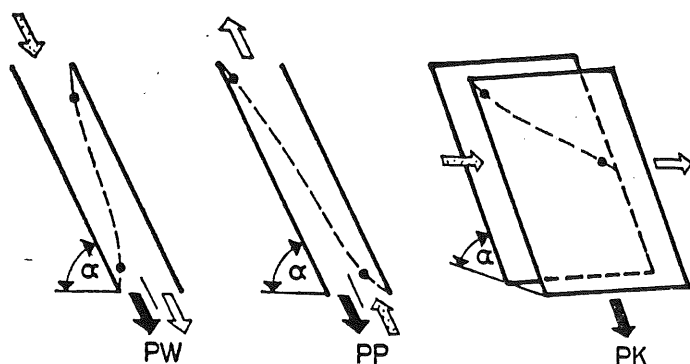
- w granicach od 2 do 20% w odniesieniu do skuteczności sedymentacyjnej η_s przy określonej wartości wskaźnika prędkości \bar{w}_s , z tym że wartość ta rośnie wraz z kątem pochylenia płyt;
- w granicach od 20% w odniesieniu do wskaźnika prędkości \bar{w}_s dla określonej wartości η_s , co oznacza jednak konieczność rozbudowy urządzeń o 20% i adekwatne podwyższenie relatywnych kosztów inwestycyjnych.



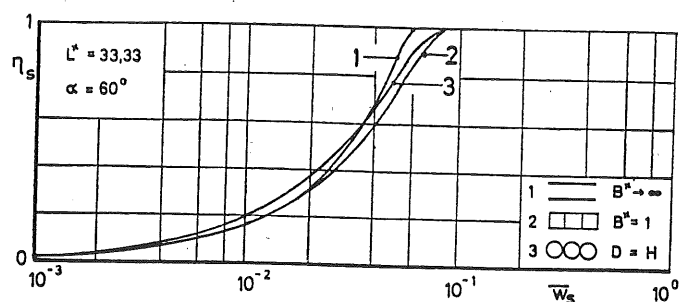
Rys. 2. Porównanie skuteczności sedymentacyjnej dla przepływu współ- i przeciwpłdowego



Rys. 3. Porównanie skuteczności sedymentacyjnej dla przepływu współprądowego i krzyżowego



Rys. 1. Reżim hydrauliczny osadników lamelowych



Rys. 4. Porównanie skuteczności sedymentacyjnej dla przepływu przeciwno- i współprądowego różnych wypełnień osadnika lamelowego

Na rys. 4 przedstawiono wpływ rozwiązania konstrukcyjnego elementów sedymentacyjnych na skuteczność procesową w funkcji wskaźnika prędkości \bar{w}_s . Dla przemysłowo interesujących skuteczności sedymentacyjnych $\eta_s > 0,6$ najkorzystniejszym okazuje się system płytowy, który przykładowo dla $\eta_s = 1,0$ posiada o 45% wyższą prędkość przepływu suspensji w_0 , co wpływa na odpowiednie zmniejszenie gabarytu urządzenia, i ma oczywiste dalsze implikacje techniczno-ekonomiczne.

Sedymentacyjna technika rozdzielania jest stosowana w przypadku suspensji zawierającej zawieszinę gruboziarnistą ale również może być stosowana dla roztworów koloidalnych ze wspomagającym udziałem środków płatkujących, mogących również wykazywać pożądaną przebieg towarzyszącej reakcji chemicznej.

Osadniki lamelowe są dotychczas szczególnie stosowane w dziedzinach, gdzie już stosowano technikę sedymentacyjnego oczyszczania. Poprzez swoją zwartość i ograniczony gabaryt znajdują zastosowanie również tam, gdzie dotychczas stosowano inne metody rozdzielania, a w szeregu przypadkach otwierają także możliwość technicznego rozwiązania uciążliwych problemów produkcyjnych. Przykładem takich aplikacji mogą być prowadzone przez nas prace wynikające z konkretnych potrzeb przemysłu.

Przedmiotem stosowania jest „Osadnik komorowy z wypełnieniem płytowym” wg patentu Nr 146451 którego twórcami są autorzy artykułu.

Udane próby urządzenia przeprowadzono w odniesieniu do instalacji produkcyjnej mleczka wapiennego, gdzie istotnym problemem okazało się wydzielanie ziarn piasku wprowadzanych wraz z surowcem. Stosowany układ sita łukowego oraz baterii hydrocyklonów nie spełniał wymogów technicznych. Rozwiązanie takie zastosowano również w instalacji utylizacji odpadów emalierskich uzyskując selektywną separację szkliwa emalierskiego oraz składników balastowych ze skutecznością 98%.

Osadnik stanowiący mutację rozwiązania patentowego, zastosowano do oczyszczania wód podszadzkowych na poziomie — 790 m w chodniku kopalnianym. Osadnik 12-modułowy o długości 25,1 m eliminuje konieczność budowy 7 osadników przepływowych o długości 120 m każdy, dając w efekcie poważne oszczędności inwestycyjne i eksploatacyjne wynikające z:

- wysokiej skuteczności sedymentacyjnej wynoszącej ok. 80–90% w odniesieniu do koncentracji piasku oraz
- ciągłego odprowadzania szlamu bez konieczności angażowania brygad pracowniczych do czyszczenia osadników, występującej w przypadku tradycyjnych osadników korytowych.

Przy projektowaniu osadników lamelowych przyjmuje się następujące parametry [5]:

- prędkość przepływu:
(0,1–0,5) m/h — dla przeciwno-
(0,6–0,7) m/h — dla współprądu;
- materiał płyt: stal, tworzywa sztuczne, szkło;
- odległość międzypłytowa: 25–80 mm;
- kąt pochylenia płyt: 30–75°;

Próby teoretycznego określenia sedymentacji zawiesziny polidispersyjnej, przedstawionej przez Schmidta i Wiesmana [2] nie posiadają uniwersalnego charakteru, gdyż w modelu bazującym na stosowaniu prawa Stokesa występuje szereg zakłóceń związanych z:

- występowaniem lokalnego przepływu wirowo-turbulentnego,
- rotacją cząstek,
- odstępstwem kształtu cząstek od postaci kulistej,
- szorstkością powierzchni,
- wzajemnym oddziaływaniem cząstek poprzez zderzenia i oddziaływaniem pól prędkości, występujących w obrębie opadających cząstek.

Szczególne trudności projektowe występują w przypadku zawieszin polidispersyjnych, utworzonych z składników zróżnicowanych chemicznie. Takim typem zawieszin są właśnie wody podszadzkowe zawierające — piasek, ility i cząstki węgla, a także omówiony przypadek mleka wapiennego i szkliwa emalierskiego. W celu wypracowania racjonalnej metodyki projektowej, podjęto prace nad określeniem teoretycznego modelu procesu sedymentacji zawiesziny polidispersyjnej oraz zrealizowano program badawczy określający współczynniki regresji modelu matematycznego.

Model procesu sedymentacji zawieszin polidispersyjnych

Przepływ zawieszin przez układ lamelowy wiąże się z wydzielaniem składnika stałego na powierzchni płyt. Elementarną ilość wydzielonego składnika określa równanie:

$$d\dot{m} = w_0 \cdot f \cdot dc \quad (1)$$

gdzie:

- w_0 [m/s] — prędkość przepływu cieczy,
- f [m²] — pole przekroju przepływowego,
- dc [kg/m³] — elementarna zmiana stężenia substancji stałej w suspensji.

Jednocześnie spełnione jest równanie kinetyki procesu sedymentacyjnego

$$d\dot{m} = k \cdot \Delta c_{m1} \cdot dF \quad (2)$$

gdzie:

- k [m/s] — współczynnik szybkości osiadania,
- $\Delta c_{m1} = (c_1 - c_1^*)$ — średni chwilowy spadek stężenia,
- dF [m²] — elementarna powierzchnia osiadania.

Z porównania równań (1) i (2) otrzymuje się:

$$k (c_1 - c_1^*) dF = w_0 \cdot f \cdot dc$$

oraz po rozdzieleniu zmiennych

$$\frac{k}{w_0 \cdot f} dF = \frac{dc}{c_1 - c_1^*}$$

gdzie:

- powierzchnia osadnika F zmienia się w przedziale $0 \rightarrow F$;
- stężenie c_1 zmienia się w przedziale $c_p \rightarrow c_k$, gdzie stężenie równowagowe dotyczy sklarowania cieczy, czyli $c^* = 0$ kg/m³, zatem powyższe równanie różniczkowe można rozwiązać poprzez obustronne całkowanie

$$\frac{k}{w_o \cdot f} \int_0^F dF = \int_{c_p}^{c_k} \frac{dc}{c_i - c_i^*} \quad (3)$$

otrzymując

$$\frac{k}{w_o} \cdot \frac{F}{f} = \ln \frac{c_p - c^*}{c_k - c^*}$$

czyli

$$\frac{k}{w_o} \cdot \frac{F}{f} = \ln \frac{c_p}{c_k} \quad (4)$$

Zgodnie z definicją, skuteczność sedymentacyjna

$$\eta_s = \frac{c_p - c_k}{c_p} \quad (5)$$

Równanie (4) po uwzględnieniu równania (5) można przekształcić do postaci:

$$\eta_s = 1 - \exp \left(- \frac{k}{w_o} \cdot \frac{F}{f} \right) \quad (6)$$

W równaniu tym wprowadza się:

$Mo = \left(\frac{k}{w_o} \right)$ — liczba Margulisa charakteryzująca procesy związane z wydzielaniem cząstek w suspensjach lub aerozolach,

$\left(\frac{F}{f} \right)$ — inwariant powierzchni, gdzie dla układu płytowego

$$\frac{F}{f} = \frac{l}{h} \quad (7)$$

zaś dla układu rurowego

$$\frac{F}{f} = \frac{2l}{d} \quad (8)$$

Można zatem wprowadzić moduł podobieństwa geometrycznego

$$\pi_1 = c_1 \left(\frac{l}{d} \right) \text{ lub } \left(\frac{l}{h} \right) \quad (9)$$

Toteż równanie skuteczności sedymentacyjnej można zapisać jako

$$\eta_s = 1 - \exp(-Mo) \quad (10)$$

gdzie liczba Margulisa jest określona równaniem modułowym

$$Mo = c \cdot \pi_1 \cdot \pi_2 \cdot \pi_3 \dots \pi_n \quad (11)$$

Określenie funkcyjnej zależności współczynnika szybkości sedymentacyjnej k wynika z analizy opadania pojedynczej cząstki w polu sił grawitacyjnych w trakcie jej transportu w strudze. Schemat rozpatrywanego zjawiska przedstawia rys. 5.

Przeprowadzona analiza pozwala określić funkcyjną zależność podstawowych parametrów fizycznych [3]:

$$k = f[d_z, \rho_c (\rho_z - \rho_c) w_o, \eta_c, g, w_s, l, h] \quad (12)$$

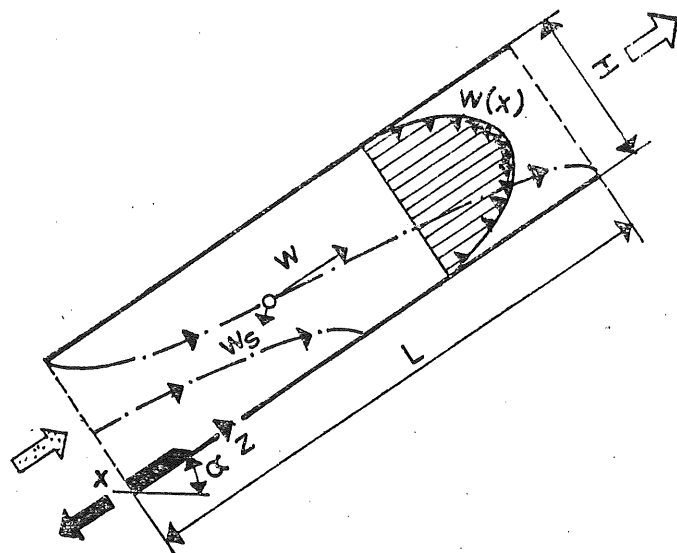
Stosując metodę analizy wymiarowej ustalono równanie modułowe

$$Mo = x_1 \cdot Ar^{x_2} \left(\frac{w_s}{w_o} \right)^{x_3} \dots \pi_n^{x_n} + 1 \quad (13)$$

Przy czym zgodnie z równaniami (6) i (9) wprowadzono dodatkowo:

— moduł względnej długości układu

$$\pi_3 = \left(\frac{1}{h} \right) \quad (14)$$



Rys. 5. Sedymentacja pomiędzy równoległymi płytami dla przeciwno-prądowego przepływu suspensji i osadu

— moduł reprezentujący kąt pochylenia układu płytowego

$$\pi_4 = \left(\frac{l_s}{h} \right) \quad (15)$$

— moduł reprezentujący wykładnik sedymentacyjnego rozdziału Rosina — Rammlera — Sperlinga

$$\pi_5 = \left(\frac{n}{n_o} \right) \quad (16)$$

gdzie:

n — wykładnik rozdziału RRS

n_o — wartość standardowa, przy czym wykładnik jest związany z dystrybucją rozkładu uziarnienia [4]:

$$W(d) = 100 \exp \left[- \left(\frac{d_z}{d_z'} \right)^n \right]$$

Ostatecznie więc

$$Mo = x_1 \cdot Ar^{x_2} \left(\frac{w_s}{w_o} \right)^{x_3} \left(\frac{l}{h} \right)^{x_4} \left(\frac{l_s}{h} \right)^{x_5} \left(\frac{n}{n_o} \right)^{x_6} \quad (17)$$

gdzie:

$$Ar = \left(\frac{g d_z^3}{\gamma_c^2} \right) \cdot \left(\frac{\rho_z - \rho_c}{\rho_c} \right) \text{ — liczba Archimedesza}$$

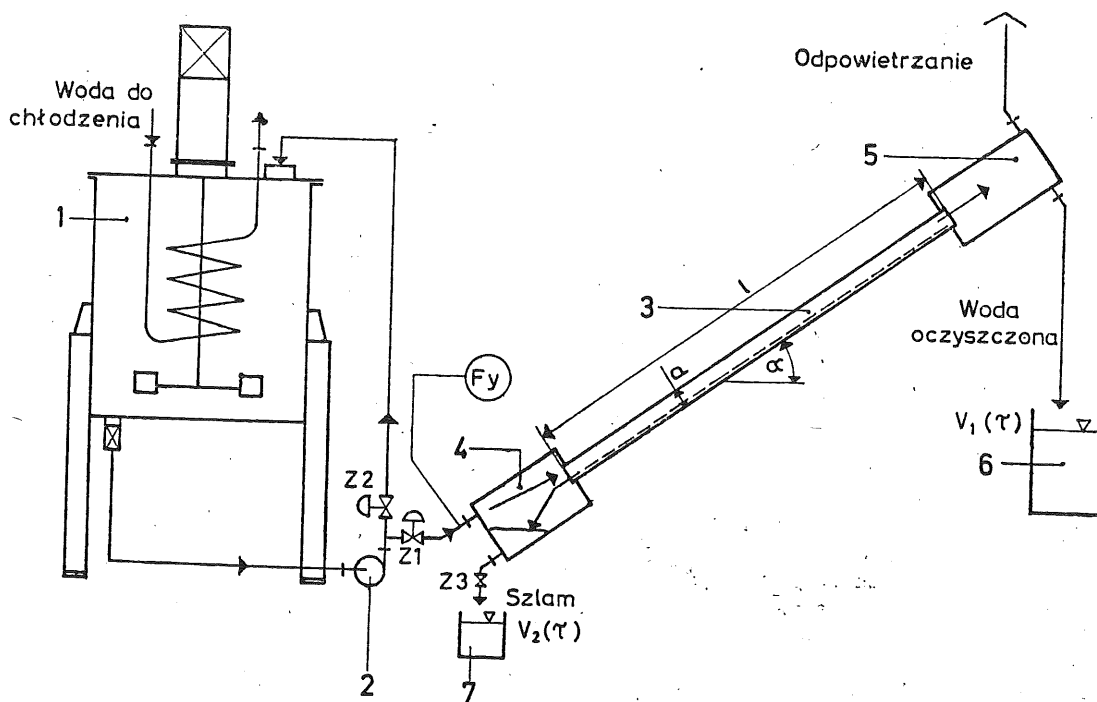
w_s [m/s] — prędkość sedymentacji ziarna o średnicy d_z obliczana wg wzoru Stokesa lub w oparciu o liczbę Reynoldsa dla $Re > 0,2$.

W celu określenia stałej x_1 i wykładników x_i równania korelacyjnego (17), przeprowadzono zaprogramowany cykl badań, w którym określono skuteczność sedymentacyjną wg równania (5), zaś odpowiednie wartości liczby Margulisa (Mo) oblicza się z przekształconego równania (10) dla kolejnego i -tego pomiaru:

$$Mo_i = \ln(1 - \eta_{si}) \quad (18)$$

Badania procesu sedymentacji

Badania przeprowadzono na instalacji przedstawionej na rys. 6. Zawiesinę materiałów badawczych o koncentracji 5000 mg/l mieszano w trakcie pomiarów w mieszalniku 1 o pojemności roboczej 70 l, stosując cyrkulację strumienia roboczego. Wewnątrz mieszalnika znajdowała się chłodnica wodna, stabilizująca temperaturę zawiesiny. Układ badawczy stanowiła pochyła szklana rura sedymentacyjna 3, re-



Rys. 6. Schemat instalacji badawczej

prezentująca działanie osadnika lamelowego. Rura posiadała głowicę dolotową 4 z króćcem odbioru szlamu i głowicę wylotową 5 z króćcem odbioru cieczy oczyszczonej i odpowietrzeniem. Natężenie przepływu wymuszono pompą, a regulację przeprowadzono za pomocą układu zaworów Z1 i Z2.

Badania przeprowadzono dla:

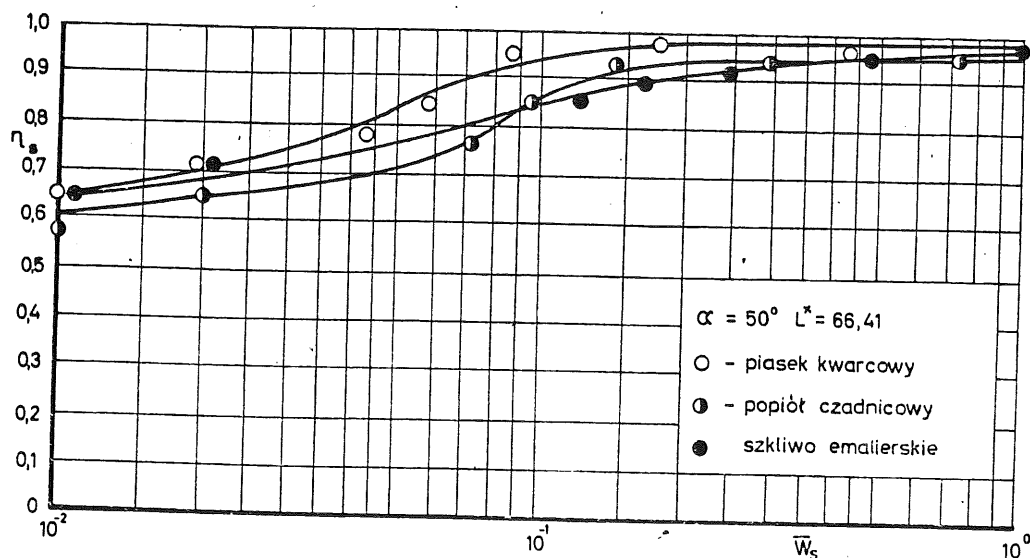
- trzech materiałów testowych: piasek kwarcowy, szkliwo emalierskie, popiół czadnicowy;
- kątów pochylenia 40, 50 i 60°;
- długość rury 1,13, 1,74 i 2,63 m;
- średnicy rury 26,2 mm;
- natężenia przepływu 2, 5, 10, 15, 20 l/h.

W oparciu o analizę sedymentacyjną materiałów testowych oraz wykonany rozkład RRS ustalono wykładnik n

oraz reprezentatywną średnicę cząstki dla pozostałości $W(d) = 50\%$:

- | | |
|-----------------------|---|
| — piasek kwarcowy | $d_z = 23 \cdot 10^{-6} \text{ m}$, $n = 1,88$ |
| | $\rho_z = 2,6356 \text{ g/cm}^3$ |
| — szkliwo emalierskie | $d_z = 39,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}$, $n = 2,15$ |
| | $\rho_z = 2,4767 \text{ g/cm}^3$ |
| — popiół czadnicowy | $d_z = 23 \cdot 10^{-6} \text{ m}$, $n_o = 2,5$ |
| | $\rho_z = 3,5582 \text{ g/cm}^3$ |

Wyniki badań opracowano w oparciu o równanie korelacyjne (17), stosując metodę najmniejszych kwadratów w ujęciu krakowianowym na *EMC Compucorp*. Uzyskano następujące równanie korelacyjne interpretujące proces sedymentacji polidispersyjnej zawiesiny w osadniku lamelowym:



Rys. 7. Wpływ rodzaju zawiesiny testowej na skuteczność sedymentacyjną

$$Mo = 3,2364 Ar^{-0,1447} \left(\frac{w_s}{w_o} \right)^{0,2408} \left(\frac{l}{h} \right)^{-0,0195} \left(\frac{l_s}{h} \right)^{-0,2022} \cdot \left(\frac{n}{n_o} \right)^{-0,6178} \quad (19)$$

Procentowy błąd korelacji wynosi $\pm 12,58\%$ a równanie wyznaczono w następującym przedziale zmienności liczb modułowych:

$$Ar = (0,18 \div 0,97); \left(\frac{w_s}{w_o} \right) = 0,072 \div 1,72; \left(\frac{l}{h} \right) = 43 \div 100, \\ \left(\frac{l_s}{h} \right) = 0,8 \div 1,7; \left(\frac{n}{n_o} \right) = 0,75 \div 1,0$$

Na rys. 7 przedstawiono wybraną serię badawczą ($\alpha = 50^\circ$, $l = 1,74$ m) dla trzech materiałów przedstawiającą położenie punktów pomiarowych i ich skorelowanie w stosunku do opracowanego równania modelowego (10). Wykres ten przedstawia zmianę skuteczności sedymentacyjnej wraz z wskaźnikiem prędkości $\bar{w}_s = w_s/w_o$.

Rozkład punktów pomiarowych potwierdza, że opracowany model matematyczny procesu sedymentacji w systemie lamelowym, posiada walory uniwersalne i może być praktycznie stosowany w projektowaniu osadników lamelowych.

Algorytm projektowy osadnika lamelowego:

Prowadzone badania, jak i sposób ich analitycznego opracowania pozwala sformułować następujący algorytm projektowy osadnika lamelowego:

1. Założenia projektowe:

- natężenie przepływu suspensji V [m^3/m]
- początkowa koncentracja suspensji c_p [kg/m^3]
- końcowa koncentracja suspensji c_k [kg/m^3]

2. Określenie skuteczności bilansowej

$$\eta_b = \frac{c_p - c_k}{c_p}$$

3. Obliczenie skuteczności procesowej

$$\eta_p = \eta_b$$

4. Minimalna wartość liczby Margulisa

Według zmodyfikowanego równania (18)

$$Mo_{min} = -\ln(1 - \eta_p)$$

5. Ustalenie własności fizycznych zawiesiny w oparciu o pomiary i dane tablicowe:

- gęstość ziaren ρ_z [kg/m^3];
- gęstość cieczy ρ_c [kg/m^3];
- średnica zastępcza ziarna d_z [m] — której odpowiada 50% udział masowy $W(d)$;
- wykładnik dystrybucji n wg rozkładu RRS;
- lepkość suspensji η_c [Pa.s];

6. Założenia konstrukcyjne:

- dobór kąta pochylenia α ;
- dobór długości płyt l [m];
- dobór odległości między płytami $h = var$ [m];

7. Obliczenia wielkości osadnika:

7.1 Obliczenie z równania korelacyjnego (19) prędkości przepływu zawiesiny przez osadnik

$$\left(\frac{w_s}{w_o} \right)^{0,2408} = \frac{Mo_{min}}{3,2364 Ar^{-0,1447} \left(\frac{l}{h} \right)^{-0,0195} \left(\frac{l_s}{h} \right)^{-0,2022} \left(\frac{n}{n_o} \right)^{-0,6178}} = A \\ w_o = \frac{w_s}{\exp \frac{\ln A}{0,2408}} \quad [m/s]$$

7.2 Obliczenie czynnego przekroju przepływu suspensji przez osadnik

$$F_o = \frac{V}{w_o} [m^2]$$

gdzie:

V [m^3/s] — objętościowe natężenie przepływu suspensji;

w_o [m/s] — prędkość przepływu suspensji.

7.3 Obliczenie liczby płyt

$$Z = 1 + \frac{F_o}{b(h - h_o)}$$

gdzie:

b [m] — konstrukcyjnie wybrana szerokość płyt osadnika;

h [m] — odległość międzypłytowa;

h_o [m] — grubość osadu na płycie.

7.4 Długość osadnika:

$$L = \frac{1}{\sin \alpha} \cdot h(z - 1) + g \cdot z$$

gdzie:

g [m] — grubość płyt.

Pozostałe wielkości konstrukcyjne osadnika ustala się w oparciu o rutynowe obliczenia inżynierskie.

Wnioski końcowe

Niezmiernie ważnym zagadnieniem z punktu widzenia zarówno przemysłu chemicznego, jak i ochrony środowiska jest proces oczyszczania wód i cieczy technologicznych. Poszukuje się wciąż nowych skuteczniejszych i bardziej ekonomicznych rozwiązań. Niewątpliwie, takim rozwiązaniem jest wysokosprawny lamelowy system sedymentacyjny.

W oparciu o przeprowadzone prace analityczne i badawcze można sformułować następujące wnioski:

1. Wykorzystując rachunek wyrównawczy potwierdzono możliwość analitycznego określenia skuteczności separacyjnej w oparciu o nowy model procesu sedymentacji.

2. Analityczna forma opracowanych wyników pozwoliła skonstruować algorytm osadnika lamelowego pracującego w reżimie przeciwpładowym.

3. Wykonane pomiary potwierdziły wysoką skuteczność przedmiotowego rozwiązania, która waha się w granicach $\eta_s = 0,7 \div 0,98$ przy obciążeniu przekroju przepływowego wynoszącym $(1 \div 10)$ kg/m^2s . W przypadku odстойników klasycznych wskaźnik ten wynosi $(0,1 \div 0,8)$ kg/m^2s . Zatem porównanie prędkości masowych wskazuje, że osadniki lamelowe umożliwiają znaczne ograniczenie rzutu budowlanego urządzenia. Ma to ostatecznie związek z osiągnięciem określonych oszczędności materiałowych jak i oszczędności w zakresie kosztów inwestycyjnych.

Oznaczenia

- V_1 — natężenie przepływu suspensji [m^3/s]
- V_2 — natężenie przepływu cieczy klarownej [m^3/s]
- V_z — natężenie przepływu wylewu (koncentratu) [m^3/s]
- c_1 — koncentracja suspensji [kg/m^3]
- c_2 — koncentracja cieczy klarownej [kg/m^3]
- c_z — koncentracja wylewu [kg/m^3]

$$L^* = \frac{L}{H}, \frac{L}{D} \text{ — względna długość elementu}$$

$$B^* = \frac{B}{H} \text{ — względna szerokość elementu}$$

H — odległość międzypłytowa [m]

D — średnica rury [m]

B — szerokość płyt [m]

L — długość elementu odsaczego [m]

α — kąt pochylenia płyt

$$\bar{w}_s = \frac{w_s}{w_o} \text{ — wskaźnik prędkości}$$

w_s — prędkość osiadania cząstek o średnicy d_z , odpowiadającej pozostałości w (d) = 50% [m/s]

w_o — średnia prędkość przepływu cieczy [m/s]

η_s — skuteczność sedymentacyjna

LITERATURA

1. H. J. Binder — „Sedimentation aus Ein- und Mehrkornsuspensionen in schrägstehenden, laminar durchströmten Kreis- und Rechteckrohren” TU Berlin 1980 r.
2. M. Schmidt, U. Wiesman — Sedimentation aus wässrigen Mehrkorn-Suspensionen in laminar durchströmten, schrägstehenden Plattenabscheidern”, Chem. Ing. Techn. 49, 51 (1977)
3. J. Hehlmann — „Model procesu sedymentacji zawiesin w osadnikach lamelowych”. Referat na sem. ICh i Bud. Aparatury Pol. Śl. 1988 r.
4. J. Juda — „Pomiary zapylenia i technika odpylenia”. WNT, Warszawa 1968 r.
5. M. W. Demura — „Projektowanie tonkosłojnych otsojnikow”. Wyd. „Budiwielnik”, Kijów 1987 r.