

KATEDRA SYSTEMÓW ENERGETYCZNYCH i URZĄDZEŃ OCHRONY ŚRODOWISKA

Maszyny i Urządzenia Energetyczne

LABORATORIUM

Charakterystyka złoża fluidalnego

Opracował:
dr inż. Jerzy Wojciechowski

**AGH WIMiR
KRAKÓW**

Charakterystyka złoża fluidalnego

1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest poznanie mechanizmów tworzenia warstwy fluidalnej i wyznaczenie jej podstawowych parametrów.

2. Podstawy teoretyczne

2.1. Fluidyzacja

Fluidyzacją nazywamy proces dwufazowy, w którym warstwa materiału sypkiego ułożona na ruszcie jest doprowadzana do stanu pseudopłynnego za pomocą strugi płynu. Płyn w postaci cieczy lub gazu jest podawany od dołu dna sitowego (dystrybutora). W pewnym zakresie prędkości strugi płynu, zależnym od rozmiarów cząstek i stosunku gęstości fazy rozproszonej i ciągłej, *złoże fluidalne* znajduje się w stanie quasi – stabilnym.

W zależności od rodzaju płynu rozróżnia się fluidyzację *gazową* i *cieczową*.

Zalety złoża fluidalnego:

- intensywna wymiana ciepła lub masy między płynem a cząstkami stałymi, między ścianami i powierzchniami zanurzonymi a złożem fluidalnym;
- stała temperatura w złożu (izotermiczność złoża fluidalnego),
- duża powierzchnia kontaktu między cząstkami stałymi a płynem,
- dobre wymieszanie materiału sypkiego z płynem.

Wady złoża fluidalnego

- niejednorodność fluidalnego złoża gazowego wskutek powstawania i i ruchu pęcherzy;
- ścieranie powierzchni cząstek;
- erozyjne działanie na powierzchnie ścian i ciał zanurzonych w złożu;
- wzrost zużycia energii na potrzeby własne (napęd pomp lub wentylatorów);
- aglomeracja cząstek w wysokich temperaturach.

2.2. Charakterystyka złoża fluidalnego

Analizie poddajemy zachowanie się *złoża fluidalnego* podczas stopniowo rosnącej *prędkości fluidyzacji* u_f , czyli prędkości przepływającej cieczy lub gazu w kolumnie fluidalnej przed dystrybutorem (rusztem). Chodzi o podstawową relację, jaką jest zależność spadku ciśnienia płynu w kolumnie od jego prędkości pozornej u (prędkości płynu wyznaczonej w odniesieniu do całego przekroju poprzecznego kolumny fluidalnej), tj. $\Delta p = f(u)$, czyli tzw. *krzywą fluidyzacji* (rys.1).

Różne stany złoża fluidalnego mają ustalone definicje i nomenklaturę.

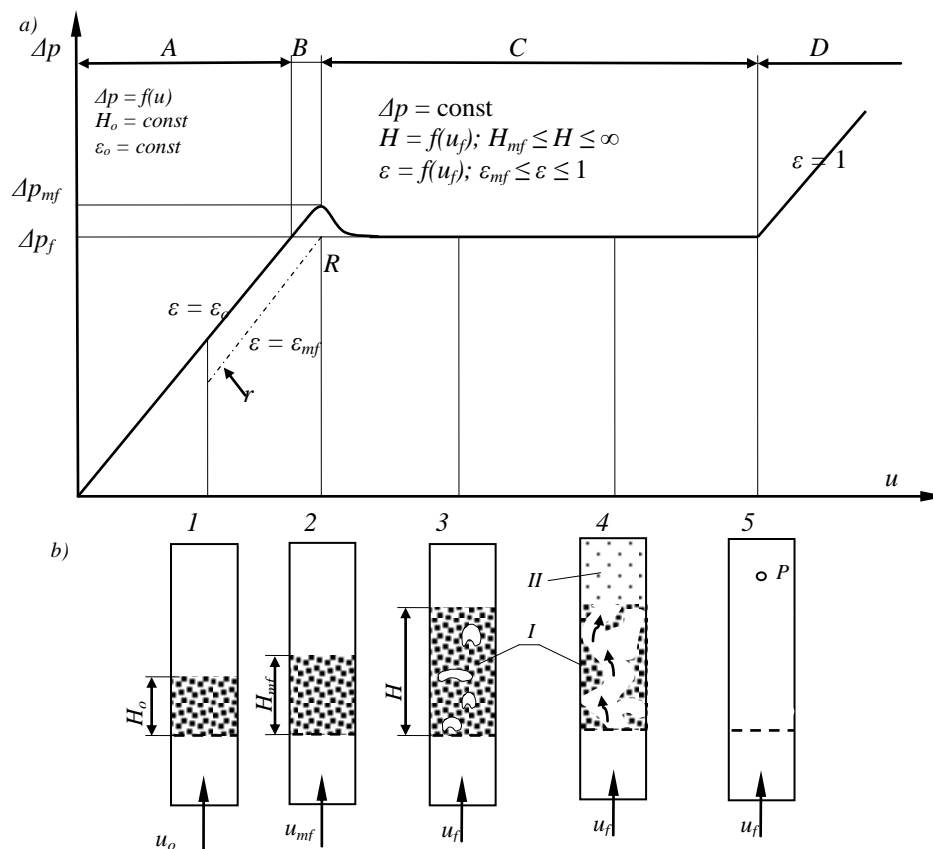
Stan nieruchomy złoża jest określony jako stan 1 (rys. 1b). Cząstki są wówczas nieruchome i podtrzymywane dzięki stykaniu się z innymi cząstkami. Spadek ciśnienia rośnie ze wzrostem prędkości pozornej $u = u_o$. Złoże ma minimalną porowatość ϵ_o i wysokość H_o , odpowiadającą tej porowatości. Jest to typowy przepływ płynu przez nieruchomą warstwę sypką lub porowatą.

Złoże ruchome odpowiada stanowi 2. Złoże to powstaje wskutek rozluźnienia złoża nieruchomego. W tym stanie cząstki pozostają w dalszym ciągu we wzajemnym kontakcie i, nie zmieniając wzajemnego położenia, przesuwają się względem ścian kolumny. Wykonują przy tym oscylacyjne ruchy z małymi amplitudami, tak jakby były zawieszony w strudze płynu. Rozluźnienie złoża następuje wtedy, gdy nadciśnienie płynu zrówna się z ciśnieniem wywieranym przez złoże. Ten stan oznacza *początek fluidyzacji* (minimum fluidyzacji – *mf*).

Linia przerywana r (rys. 1a) oznacza przebieg zmiany ciśnienia przy powolnym zmniejszaniu prędkości u , czemu towarzyszy powstawanie rozluźnionego złoża nieruchomego ze swobodnie usypanymi cząstkami o porowatości ϵ_{mf} . Punkt R jest to teoretyczny punkt przejścia złoża fluidalnego w złoże nieruchome przy powolnym zmniejszaniu prędkości fluidyzacji.

Złoże fluidalne odpowiada stanom 3 i 4, przy czym do rozważań przyjęto gazowe złoże fluidalne. Wysokość złoża H jest od kilkudziesięciu razy do wielu tysięcy razy większa niż średnica cząstek. Gdy zostanie przekroczona prędkość u_{mf} wówczas powstaje złoże fluidalne z *fazą gęstą I*,

która ma wyraźnie zaznaczoną górną granicę. Gdy prędkość gazu rośnie, wówczas złożo ekspanduje i staje się **fluidalnym złożem turbulentnym**, w którym zachodzi intensywne mieszanie cząstek w całym obszarze złoża.



Rys. 1. Jednofrakcyjne złożo fluidalne: a) wykres $\Delta p = f(u)$; b) różne stany złoża: A – złożo nieruchome, B – złożo ruchome, C – złożo fluidalne, D – pusta kolumna; u_f – prędkość fluidyzacji, u_{mf} – minimalna prędkość fluidyzacji, ε – porowatość, H – wysokość złoża, R – teoretyczny punkt przejścia złoża fluidalnego w złożo nieruchome, P – nieruchoma cząstka swobodna

Cechą charakterystyczną złoża fluidalnego jest prawie niezmienny spadek ciśnienia ($\Delta p_f \approx \text{const}$) mimo wzrostu prędkości $u = u_f$. Spadek ciśnienia ma nieco mniejszą wartość niż na początku fluidyzacji, a różnica ($\Delta p_{mf} - \Delta p_f$) jest spowodowana siłami wiążącymi, które występują między cząstkami. Pojawia się lokalne maksimum wywołane tymi siłami, przy czym w przypadku dużych cząstek siły te są małe, a maksimum nie występuje.

Gdy prędkość gazu dalej rośnie, złożo zwiększa swą wysokość oraz porowatość średnią. Drobne cząstki przemieszczają się do góry, tworząc tzw. **fazę rzadką II**, czyli zawiesinę o dużej porowatości, niemającą górnej powierzchni swobodnej. Pomiędzy fazą gęstą a rzadką utrzymuje się wyraźna granica, co ilustruje stan 4 na rys. 1b. Porowatość złoża zmienia się zatem w przedziale $\varepsilon_{mf} \leq \varepsilon \leq 1$.

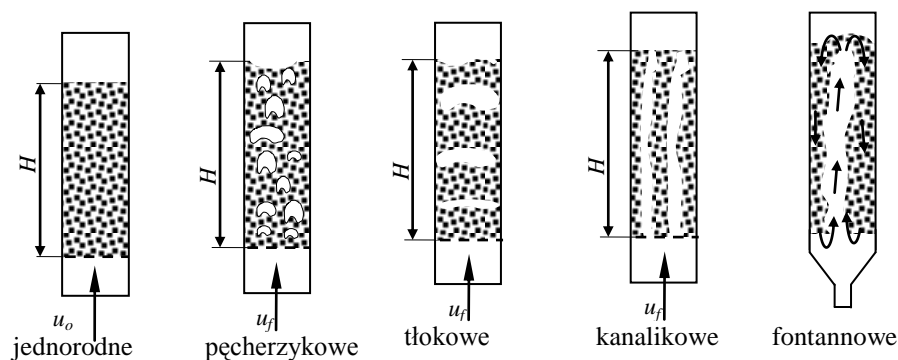
Gdy prędkość przepływu zrówna się z prędkością swobodnego opadania cząstek, powstanie stan graniczny $\varepsilon = 1$, w którym skończy się fluidyzacja. Stan graniczny, czyli stan 5 na rys. 1b, jest symbolizowany za pomocą nieruchomej cząstki swobodnej P . Odpowiednia prędkość fluidyzacji, zwana **prędkością zawisania** $u_f = u_t$ jest równa prędkości swobodnego opadania cząstki w gazie nieruchomym v_o , czyli $u_t = v_o$.

Jeżeli prędkość pozorna jest większa od prędkości swobodnego opadania cząstek, czyli $u > v_o$, to cząstki są wywiewane ze złoża i unoszone w strudze gazu, zaczyna się proces **transportu pneumatycznego**. Spadek ciśnienia Δp rośnie wtedy ze wzrostem prędkości u .

Rozmiary cząstek w złożu fluidalnym różnią się między sobą, a różnice te są często bardzo znaczne. Następuje segregacja cząstek, która prowadzi do **stratyfikacji** złoża fluidalnego. Cząstki

największe opadają na dno, a cząstki najmniejsze przemieszczają się do góry, a nawet są wydmuchiwane na zewnątrz. Aby do tego nie dopuścić, stosunek rozmiarów cząstek największych i najmniejszych nie powinien być większy od około 8.

Na rysunku 2 pokazano **rodzaje złożeń fluidalnych**. Złoże te dzieli się na **złoże jednorodne** i **złoże niejednorodne**. Złoże jednorodne charakteryzuje się jednakową porowatością we wszystkich punktach. Takim warunkom odpowiadają wszystkie złoże ciekowe, a ze złożeń gazowych tylko złoże o małej prędkości przepływu gazu. Złoże niejednorodne charakteryzują się zmianą porowatości w różnych miejscach. Do złożeń niejednorodnych należą złoże pęcherzykowe, tłokowe, kanalikowe i fontannowe.



Rys. 2. Złoże fluidalne

Złoże pęcherzykowe jest powszechnie występującym złożem gazowym. Charakteryzuje się tym, że duża część gazu płynie w postaci pęcherzy, co powoduje znaczne zróżnicowanie struktury złożeń.

Złoże tłokowe (nazywane również **złożem pulsującym**) charakteryzuje się wzrostem pęcherzy do rozmiarów równych średnicy kolumny, wskutek czego tworzą się warstwy gazu. Warstwy cząstek znajdujące się między nimi poruszają się ku górze podobnie jak tłoki. Pulsowanie występuje w kolumnach wysokich o małej średnicy oraz w przypadku dużych cząstek. Złoże płytke ($H < D$) nie tworzą tłoków.

Złoże kanalikowe charakteryzuje się obecnością pionowych kanałów, przez które przepływa znaczna, część gazu, nie wprawiając w ruch wszystkich cząstek. Kanalikowanie występuje podczas fluidyzacji cząstek o bardzo małych rozmiarach.

Złoże fontannowe charakteryzuje się tym, że cząstki są wynoszone do góry w obszarze dużej prędkości w rdzeniu kolumny, a opadają w obszarze małej prędkości w pobliżu ścian. W ten sposób złoże podlega tzw. cyrkulacji całkowitej. Profil prędkości w poprzecznym przekroju kolumny jest bardzo nierównomierny. Złoże fontannowe znajdują zastosowanie przy fluidyzacji grubych frakcji fazy stałej, szlamów, past itp.

2.3. Wybrane wielkości charakteryzujące złoże fluidalne

Porowatość ε – jest to względny udział objętości niezajętej przez fazę stałą, tj. stosunek objętości porów (objętości fazy ciągłej – płynu) do objętości mieszaniny dwufazowej (całkowitej objętości złożeń).

$$\varepsilon = \frac{V_G}{V_z} = \frac{V_z - V_s}{V_z} = \frac{A_G}{A_f} \quad (1)$$

V_G – objętość niezajęta przez fazę stałą (objętość porów),

V_z – całkowita objętość złożeń, $V_z = A_f H_z$

A_f – pole przekroju poprzecznego kolumny fluidyzacyjnej, $A_f = \pi D_f^2 / 4$,

H_z – wysokość złożeń,

V_s – całkowita objętość materiału sypkiego,

A_G – pole przekroju poprzecznego niezajętego przez fazę stałą.

Średnia gęstość mieszaniny dwufazowej ρ_z – jest wyznaczana w zależności od porowatości złoża ze wzoru:

$$\rho_z = \varepsilon \rho_G + (1 - \varepsilon) \rho_s \quad (2)$$

ε – porowatość złoża,
 ρ_s – gęstość materiału złoża,
 ρ_G – gęstość płynu.

Lepkość dynamiczna mieszaniny dwufazowej η_z – jest wyznaczana w zależności od udziału objętościowego fazy stałej ($\varphi_s = 1 - \varepsilon$) w złożu. W literaturze podawanych jest wiele wzorów, które są słuszne w odpowiednich przedziałach udziałów objętościowych fazy stałej.

Jeżeli udział objętościowy fazy stałej jest mniejszy od $\varphi_s < 0,04$ można lepkość dynamiczną mieszaniny dwufazowej wyznaczyć ze wzoru Einsteina:

$$\eta_z = \eta_G (1 + 2,5 \varphi_s) \quad (3a)$$

Dla tego samego zakresu udziału objętościowego fazy stałej ($\varphi_s < 0,04$) Hatschek podał wzór:

$$\eta_z = \eta_G (1 + 4,5 \varphi_s) \quad (3b)$$

Dla udziałów objętościowych fazy stałej $0,5 < \varphi_s < 0,9$ Hatschek podał wzór:

$$\eta_z = \eta_G \frac{1}{1 - \varphi_s^{1/3}} \quad (3c)$$

η_z – lepkość dynamiczna mieszaniny dwufazowej,
 η_G – lepkość dynamiczna płynu,
 φ_s – udziału objętościowego fazy stałej w złożu: $\varphi_s = 1 - \varepsilon$

Liczby kryterialne

Liczba Reynoldsa Re_f – określa stosunek sił bezwładności do sił lepkości

$$Re_f = \frac{u_f d_s}{\nu_G} = \frac{u_f d_s \rho_G}{\eta_G} \quad (4)$$

u_f – średnia prędkość (pozorna) gazu w kolumnie

$$u_f = \dot{V} / A_f \quad (a)$$

ν_G – lepkość kinematyczna płynu,
 η_G – lepkość dynamiczna płynu
 d_s – średnica cząstek fazy stałej.

Wartość liczby Reynoldsa określa rodzaj przepływu, jeżeli $Re_f < 20$ przepływ ma charakter laminarny, dla $Re_f > 1000$ przepływ jest turbulentny.

Liczba Archimedesesa Ar_f – określa stosunek sił wyporu do sił tarcia wewnętrznego wynikającego z lepkości płynu:

$$Ar_f = \frac{g \rho_G (\rho_s - \rho_G) d_s^3}{\eta_G^2} \quad (5)$$

Liczba Archimedesesa określa podobieństwo fizyczne zjawisk przepływowych pod względem wyporności i lepkości płynu. Stosowana jest do opisu przepływu cząstek stałych i pęcherzy gazowych w płynach.

Wartość liczby Archimedesesa charakteryzuje rodzaj ruchu opadającej w płynie cząstki:

- laminarny (Stokesa) – $1,80 \cdot 10^{-3} < Ar_f \leq 7,20$
- przejściowy (Allena) – $7,20 < Ar_f \leq 3,30 \cdot 10^5$
- burzliwy (Newtona) – $3,30 \cdot 10^5 < Ar_f < 8,25 \cdot 10^{10}$

Minimalna prędkość fluidyzacji

Minimalna prędkość fluidyzacji dla przepływu laminarnego ($Re_{mf} < 20$) jest określana z zależności:

$$u_{mf} = \frac{d_s^2}{150} \frac{g(\rho_s - \rho_G)}{\eta_G} \frac{\varepsilon_{mf}^3}{1 - \varepsilon_{mf}} \quad (6)$$

Minimalna prędkość fluidyzacji u_{mf} zależy od średnicy cząstek stałych d_s , nie zależy zaś od wysokości warstwy. Minimalna porowatość złoża fluidalnego najczęściej mieści się w przedziale $\varepsilon_{mf} = 0,35 \div 0,465$.

Jeżeli minimalna porowatość złoża fluidalnego ε_{mf} nie jest znana to minimalną prędkość fluidyzacji dla przepływu laminarnego można wyznaczyć z relacji:

$$u_{mf} = \frac{g(\rho_s - \rho_G)d_s^2}{1650\eta_G} \quad (6a)$$

Dla przepływu turbulentnego ($Re_{mf} > 1000$) minimalna prędkość fluidyzacji jest określona wzorem:

$$u_{mf} = 0,756 \sqrt{\frac{g(\rho_s - \rho_G)d_s}{\rho_G} \varepsilon_{mf}^3} \quad (7)$$

Jeżeli minimalna porowatość złoża fluidalnego ε_{mf} nie jest znana to minimalną prędkość fluidyzacji dla przepływu turbulentnego można wyznaczyć z relacji:

$$u_{mf} = 0,2 \sqrt{\frac{g(\rho_s - \rho_G)d_s}{\rho_G}} \quad (7a)$$

Prędkość zawisania

Prędkość zawisania jest określona jako prędkość pozorna płynu w złożu, która jest równa prędkości swobodnego opadania cząstki w płynie nieruchomym $u_f = u_z = u_r$. Prędkość zawisania u_z zależy od minimalnej prędkości fluidyzacji u_{mf} i liczby Archimedesesa Ar_f , czyli relacji między siłami wyporu i tarcia w płynie.

$$u_z = \frac{u_{mf}}{0,1175 - \frac{0,1046}{1 + 0,000373Ar_f^{0,6}}} \quad (8)$$

Prędkość pozorna płynu większa od prędkości swobodnego opadania cząstek w nieruchomym płynie oznacza przejście ze stanu fluidalnego do transportu płynowego. Zakres prędkości fluidyzacji $u_{mf} < u_f < u_z$ określa możliwości zmian prędkości – strumienia płynu – w warstwie fluidalnej.

Strata ciśnienia w złożu fluidalnym

Przy przepływie płynu przez złożo fluidalne występuje spadek ciśnienia płynu, który równoważy wielkość ciśnienia hydrostatycznego. Wartość straty ciśnienia wyznacza się z zależności:

$$\Delta p_z = H_z (\rho_s - \rho_G)(1 - \varepsilon)g \quad (9)$$

Przy fluidyzacji gazowej, w której $\rho_G \ll \rho_s$ zależność (9) można przepisać w postaci:

$$\Delta p_z = H_z \rho_s (1 - \varepsilon)g \quad (9a)$$

2.4. Wykorzystanie fluidyzacji

Zjawisko fluidyzacji znalazło zastosowanie w wielu procesach technologicznych i jest wykorzystywane w urządzeniach o bardzo różnym przeznaczeniu. Fluidyzacja znalazła zastosowanie między innymi w:

- chemii i inżynierii procesowej;
- przemyśle petrochemicznym;
- kotłach i piecach przemysłowych;
- zgazowaniu, odgazowaniu i upłynnianiu paliw stałych;

- suszarnictwie – suszarki fluidalne do suszenia i segregacji materiałów sypkich;
- odlewnictwie – przygotowanie materiałów formierskich;
- klimatyzacji;
- wymienniki ciepła.

3. Stanowisko pomiarowe. Pomiary

Schemat stanowiska pomiarowego jest pokazany na rysunku 3. Podstawowym elementem stanowiska jest kolumna fluidyzacyjna 1 z wykonanymi otworami impulsowymi do pomiaru wartości nadciśnienia w kanale. Całkowita wysokość kolumny wynosi około 1845 mm. Przepływ powietrza jest wymuszony za pomocą wentylatora promieniowego 2. Regulacja prędkości obrotowej pozwala na zmianę strumienia przepływającego powietrza w szerokim zakresie. Pomiar strumienia jest realizowany za pomocą kryzy 3 i pomiaru ciśnienia różnicowego za pomocą U – rurki 5. Podstawowe wymiary geometryczne stanowiska oraz sposób rozmieszczenia otworów impulsowych do pomiaru nadciśnienia w kolumnie pokazano na rysunku 3.

Wielkości geometryczne stanowiska pomiarowego:

Średnica kolumny fluidyzacyjnej $D_f = 185$ mm

Średnica rurociągu ssawnego $D = 150$ mm

Średnica otworu kryzy $d = 110,22$ mm

Całkowita wysokość kolumny $H = 1845$ mm

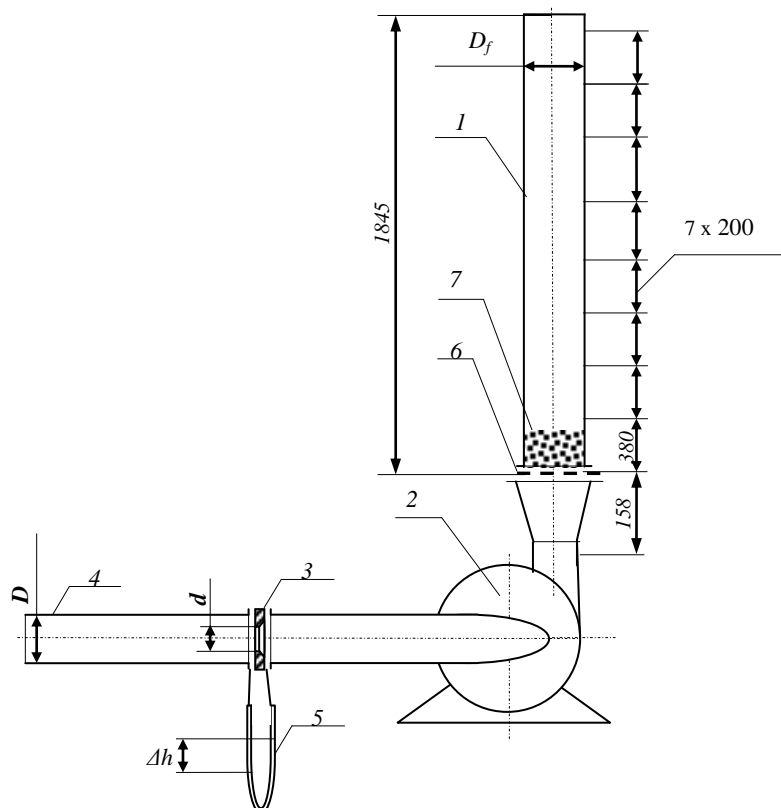
Średnica kulki materiału złoża $d_{s1} =$ mm

Masa kulki $M_{s1} =$ g

Liczba kulek w złożu $n_s =$

Wysokość nasypowa złoża w kolumnie fluidyzacyjnej $H_o =$

Gęstość materiału kulek $\rho_s =$ kg/m³



Rys. 3. Schemat stanowiska pomiarowego. 1 – kolumna fluidyzacyjna, 2 – wentylator, 3 – kryza, 4 – rurociąg ssawny, 5 – U – rurka, 6 – dno sitowe (ruszt), 7 – materiał sypki (kulki – materiał złoża fluidalnego).

Warunki otoczenia:

Ciśnienie otoczenie $p_{ot} =$
 Temperatura otoczenia $t_{ot} =$
 Wilgotność względna powietrza $\varphi_{ot} =$
 Lepkość dynamiczna powietrza $\eta_{ot} = \eta_G =$

Tabela 1. Wyniki pomiarów

Lp	Wysokość ciśnienia różnicowego	Wysokość złoża fluidalnego	Wysokość ciśnienia w kolumnie fluidyzacyjnej								
			0	1	2	3	4	5	6	7	8
			-158	380	580	780	980	1180	1380	1580	1780
	Δh	H_z	h_0	h_1	h_2	h_3	h_4	h_5	h_6	h_7	h_8
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
...											

Uwaga: współrzędna punktu 0: -158 mm oznacza, że punkt pomiarowy jest położony poniżej dna sitowego.

4. Obliczenia i opracowanie wyników pomiarów

4.1. Strumień objętości

$$\dot{V} = \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \varepsilon_1 \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho_1}} \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (10)$$

$C = 0,6021$ – liczba przepływu

$\varepsilon_1 = 0,9986$ – współczynnik ekspansji

$\beta = d/D$ – współczynnik przewężenia ($\beta = 0,7348$)

ρ_1 – gęstość powietrza w warunkach pomiaru

$$\rho_1 = \rho_n \frac{(p_{ot} - \varphi_{ot} p'') T_n}{p_n T_{ot}} + \varphi_{ot} \rho'' \quad (11)$$

ρ_n – gęstość powietrza suchego w warunkach normalnych; $\rho_n = 1,29 \text{ kg/m}^3$,

p_n – ciśnienie normalne; $p_n = 101325 \text{ Pa}$,

T_n – temperatura warunków normalnych; $T_n = 273 \text{ K}$,

p'' – ciśnienie nasycenia pary wodnej w temperaturze t_{ot} ,

ρ'' – gęstość nasyconej pary wodnej w temperaturze t_{ot} ,

Δp – różnica ciśnień zmierzona na kryzje; $\Delta p = \rho_{m1} g \Delta h$

ρ_{m1} – gęstość cieczy manometrycznej (alkohol); $\rho_{m1} = 792 \text{ kg/m}^3$,

p_i – ciśnienie w kolumnie fluidyzacyjnej; $p_i = \rho_{m2} g h_i$

ρ_{m2} – gęstość cieczy manometrycznej (alkohol); $\rho_{m2} = 792 \text{ kg/m}^3$,

4.2. Prędkość strumienia powietrza – prędkość pozorna strugi fluidyzacyjnej

Prędkość pozorną strumienia powietrza w kolumnie oblicza się przekształcając równanie określające strumień objętości.

$$u_f = \frac{\dot{V}}{A_f}$$

Pole przekrój poprzeczny kolumny fluidyzacyjnej:

$$A_f = \pi D_f^2 / 4$$

4.3. Ciśnienie w kolumnie fluidyzacyjnej

Zmierzone wysokości ciśnienia w kolumnie fluidyzacyjnej h_i należy przeliczyć na jednostki układu SI – paskale.

$$p_i = \rho_{m2} g h_i$$

p_i – ciśnienie w kolumnie fluidyzacyjnej;

ρ_{m2} – gęstość cieczy manometrycznej (alkohol); $\rho_{m2} = 792 \text{ kg/m}^3$,

Tabela 2. Wyniki obliczeń

Lp	Ciśnienie różnicowe	Strumień objętości	Prędkość strumienia powietrza	Wysokość złoża fluidalnego	Ciśnienie w kolumnie fluidyzacyjnej								
	Δp	\dot{V}	u_f	H_z	p0	p1	p2	p3	p4	p5	p6	p7	p8
	Pa	m ³ /s	m/s	m	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa

4.4. Graficzna interpretacja ciśnienia w kolumnie w zależności od wysokości.

Na wykresie $p = f(H)$ należy przedstawić rozkład ciśnienia w kolumnie fluidyzacyjnej w zależności od położenia punktu pomiarowego. Dodatkowym parametrem jest stały strumień powietrza \dot{V} i wysokość złoża fluidalnego H_z .

4.5. Porowatość złoża ε

Dla wszystkich wysokości złoża fluidalnego należy wyznaczyć porowatość złoża ε . Pierwszą obliczoną porowatością złoża będzie początkowa (nasykowa) porowatość złoża, którą określa się dla sytuacji braku przepływu powietrza przez kolumnę.

$$\varepsilon_o = \frac{V_{Go}}{V_{zo}} = \frac{V_{zo} - V_s}{V_{zo}} = \frac{A_{Go}}{A_f}$$

V_{Go} – początkowa objętość niezajęta przez fazę stałą (objętość porów),

V_{zo} – początkowa (nasykowa) całkowita objętość złoża, $V_{zo} = A_f H_o$

A_f – pole przekroju poprzecznego kolumny fluidyzacyjnej, $A_f = \pi D_f^2/4$,

H_{zo} – początkowa (nasykowa) wysokość złoża,

V_s – całkowita objętość materiału złoża, $V_s = n_s V_{s1}$

n_s – liczba kulek w złożu,

V_{s1} – objętość jednej kulki

A_{Go} – początkowe pole przekroju poprzecznego niezajętego przez fazę stałą.

Następnie należy wyznaczyć porowatość złoża dla każdej prędkości fluidyzacyjnej u_f powietrza.

$$\varepsilon_i = \frac{V_{Gi}}{V_{zi}} = \frac{V_{zi} - V_s}{V_{zi}} = \frac{A_{Gi}}{A_f}$$

V_{Gi} – i -ta objętość niezajęta przez fazę stałą (objętość porów),

V_{zi} – i -ta całkowita objętość złoża, $V_{zi} = A_f H_i$

A_f – pole przekroju poprzecznego kolumny fluidyzacyjnej, $A_f = \pi D_f^2/4$,

H_{zi} – i -ta wysokość złoża,

V_s – całkowita objętość materiału złoża, $V_s = n_s V_{s1}$

n_s – liczba kulek w złożu,

V_{s1} – objętość jednej kulki

A_{Gi} – i -te pole przekroju poprzecznego niezajętego przez fazę stałą.

4.6. Liczba Reynoldsa

Dla każdej prędkości złoża fluidalnego należy określić liczbę Reynoldsa

$$Re_f = \frac{u_f d_{s1}}{\nu_G} = \frac{u_f d_{s1} \rho_G}{\eta_G}$$

u_f – prędkość fluidyzacji

v_G – lepkość kinematyczna gazu,
 η_G – lepkość dynamiczna gazu $\eta_G =$
 $\rho_G = \rho_1$ – gęstość powietrza w warunkach pomiaru

4.7. Strata ciśnienia w złożu fluidalnym

Dla każdej wysokości warstwy określana jest strata ciśnienia płynu przy przepływie przez złożo fluidalne.

$$\Delta p_z = H_z(\rho_s - \rho_G)(1 - \varepsilon)g$$

Tabela 3. Porowatość złoża w zależności od prędkości fluidyzacji

	Symbol	Jednostka	Pomiar							
Wysokość złoża	H_z	m								
Prędkość fluidyzacji	u_f	m/s								
Porowatość	ε	--								
Liczba Reynoldsa	Re	--								
Strata ciśnienia	Δp_z	Pa								

Na wykresie $\varepsilon = f(u_f)$ należy przedstawić zmianę porowatości złoża w zależności od prędkości fluidyzacyjnej u_f .

4.8. Liczba Archimedesesa Ar_f

Określić liczbę Archimedesesa Ar_f dla analizowanej kolumny fluidyzacyjnej.

$$Ar_f = \frac{g\rho_G(\rho_s - \rho_G)d_{s1}^3}{\eta_G^2}$$

d_{s1} – średnica kulki materiału złoża, $d_{s1} =$
 ρ_s – gęstość materiału kulek, $\rho_s =$
 $\rho_G = \rho_1$ – gęstość powietrza w warunkach pomiaru
 η_G – lepkość dynamiczna gazu $\eta_G =$

4.9. Minimalna prędkość fluidyzacji

W zależności od rodzaju przepływu (wartości liczby Reynoldsa) obliczyć minimalną prędkość fluidyzacji. Do obliczenia minimalnej prędkości fluidyzacji należy skorzystać ze wzoru 6 lub 7.

4.10. Prędkość zawisania

Prędkość zwisania jest wyznaczana w zależności od minimalnej prędkości fluidyzacji u_{mf} i liczby Archimedesesa Ar_f :

$$u_z = \frac{u_{mf}}{0,1175 - \frac{0,1046}{1 + 0,000373Ar_f^{0,6}}}$$

5. Wnioski

Literatura

1. Laudyn D., Pawlik M., Strzelczyk F.: Elektrownie, WNT, Warszawa 2000, (3.16.3. Paleniska fluidalne s140)
2. Chmielniak T.: Technologie energetyczne. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2004.(3. Paleniska z paleniskiem fluidalnym s162)
3. Dziubiński M., Prywer J.: Mechanika płynów dwufazowych. WNT, Warszawa 2009, (18. Fluidyzacja s.225)
4. Miller A., Lewandowski J.: Układy gazowo – parowe na paliwo stałe. WNT, Warszawa 1993. (4, s84)
5. Orzechowski Z., Prywer J., Zarzycki R.: Mechanika płynów w inżynierii i ochronie środowiska. WNT, Warszawa 2009, (21. Fluidyzacja s.554).

Karta pomiarowa

Charakterystyka złoza fluidalnego

Materiał złoza

Średnica kulki $d_{sl} =$ mm

Masa kulki $M_{sl} =$ g

Objętość kulki $V_{sl} =$ m³

Liczba kulek $n_s =$

Tabela 2. Wyniki pomiarów

Lp	Wysokość ciśnienia różnicowego Δh mm	Wysokość złoza fluidalnego H_z mm	Wysokość ciśnienia w kolumnie fluidyzacyjnej								
			0	1	2	3	4	5	6	7	8
			-158	380	580	780	980	1180	1380	1580	1780
			h0	h1	h2	h3	h4	h5	h6	h7	h8
1											
2											
3											
4											
5											
6											
7											
8											
9											
10											
11											

Wielkości geometryczne stanowiska pomiarowego:

Średnica kolumny fluidyzacyjnej $D_f = 185$ mm

Średnica rurociągu ssawnego $D = 150$ mm

Średnica otworu kryzy $d = 110,22$ mm

Całkowita wysokość kolumny $H = 1845$ mm

Wysokość nasypowa złoza w kolumnie fluidyzacyjnej $H_o =$ mm.

Gęstość materiału kulek $\rho_s =$ kg/m³

Warunki otoczenia:

Ciśnienie otoczenie $p_{ot} =$ Pa

Temperatura otoczenia $t_{ot} =$ °C

Wilgotność względna powietrza $\varphi_{ot} =$ %

Ciśnienie nasycenia pary wodnej w temperaturze t_{ot} : $p'' =$ Pa

Gęstość nasyconej pary wodnej w temperaturze t_{ot} : $\rho'' =$ kg/m³

Lepkość dynamiczna powietrza $\eta_{ot} = \eta_G =$ Pas

Charakterystyka kryzy

Liczba przepływu: $C = 0,6021$

Współczynnik ekspansji $\varepsilon_l = 0,9986$

Współczynnik przewężenia $\beta = d/D$; $\beta = 0,7348$

$$\dot{V} = \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \varepsilon_l \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho_1}} \quad \rho_1 = \rho_n \frac{(p_{ot} - \varphi_{ot} p'') T_n}{p_n T_{ot}} + \varphi_{ot} \rho''$$

ρ_n – gęstość powietrza suchego w warunkach normalnych; $\rho_n = 1,29$ kg/m³,

p_n – ciśnienie normalne; $p_n = 101325 \text{ Pa}$,
 T_n – temperatura warunków normalnych; $T_n = 273 \text{ K}$,
 Δp – różnica ciśnień zmierzona na kryzie; $\Delta p = \rho_{m1} g \Delta h$
 ρ_{m1} – gęstość cieczy manometrycznej (woda); $\rho_{m1} = 1000 \text{ kg/m}^3$,
 p_i – ciśnienie w kolumnie fluidyzacyjnej; $p_i = \rho_{m2} g h_i$
 ρ_{m2} – gęstość cieczy manometrycznej (alkohol); $\rho_{m2} = 792 \text{ kg/m}^3$.