

SPIS TREŚCI

	str.
Przedmowa	5
Oznaczenia i jednostki typowych wielkości	6
<i>Ćwiczenie 0:</i> Zajęcia organizacyjne	9
<i>Ćwiczenie 1:</i> Wyznaczanie podstawowych właściwości fizycznych cieczy	17
<i>Ćwiczenie 2:</i> Właściwości reologiczne cieczy nieniutonowskich	31
<i>Ćwiczenie 3:</i> Badanie oporów przepływu płynów w przewodach	43
<i>Ćwiczenie 4:</i> Opory przepływu płynu w przestrzeni międzyrurowej wymiennika ciepła	51
<i>Ćwiczenie 5:</i> Hydraulika kolumny wypełnionej	61
<i>Ćwiczenie 6:</i> Określanie struktur przepływu układu dwufazowego gaz-ciecz	71
<i>Ćwiczenie 7:</i> Badanie procesu sedymentacji zawiesiny	81
<i>Ćwiczenie 8:</i> Badanie procesu filtracji zawiesiny	91
<i>Ćwiczenie 9:</i> Określanie stanów złoża fluidalnego	99
<i>Ćwiczenie 10:</i> Określanie sprawności odpylania filtru workowego	109
<i>Ćwiczenie 11:</i> Badanie przebiegu rozdziału zawiesiny metodą wirowania	119

PRZEDMOWA

Niniejszy skrypt stanowi zbiór instrukcji do ćwiczeń laboratoryjnych z zakresu jednostkowych operacji mechanicznych w inżynierii procesowej.

Pomyślany on został jednak jako pomoc dydaktyczna do realizacji zajęć laboratoryjnych w ramach różnych przedmiotów prowadzonych na dwóch kierunkach studiów: *Mechanika i Budowa Maszyn* oraz *Inżynieria Środowiska*. Specyfika tematów związanych z operacjami jednostkowymi w inżynierii procesowej, będących przedmiotem wykładów prowadzonych w ramach różnych przedmiotów dla studentów poszczególnych specjalności, przyczyniła się do takiego doboru tematyki zawartych w skrypcie ćwiczeń, ażeby mógł być on przydatny do prowadzenia zajęć laboratoryjnych z *Oczyszczania gazów, Procesów i aparatów przemysłowych* oraz *Inżynierii procesowej*. Takie podejście umożliwia prowadzącemu zajęcia pewną swobodę w dopasowaniu tematyki ćwiczeń do treści określonych wykładów, a studentom daje możliwość korzystania z tego samego skryptu w ramach różnych przedmiotów.

Każda z zawartych w skrypcie instrukcji składa się z kilku części w których podano zarówno teoretyczny opis zagadnienia będącego przedmiotem ćwiczenia, jak również opis budowy i działania stanowiska badawczego. Informacje te uzupełniono o metodykę prowadzenia pomiarów oraz wymagany do zamieszczenia w sprawozdaniu z ćwiczenia zakres opracowania wyników badań. Stosunkowo rozbudowane wprowadzenie teoretyczne do kolejnych ćwiczeń wraz z wykazem kilku pozycji literatury uzupełniającej oraz zestawem tematów kontrolnych, ma na celu wskazanie studentom na zagadnienia które powinni opanować w ramach przygotowywania się do zajęć. W instrukcji dotyczącej zajęć organizacyjnych podano regulamin zajęć prowadzonych w laboratorium Katedry Inżynierii Procesowej, wymagania i wytyczne odnośnie do opracowywanych przez studentów sprawozdań z przebiegu poszczególnych ćwiczeń oraz warunki uzyskania zaliczenia z przedmiotu.

Obecnie w przygotowaniu redakcyjnym znajduje się skrypt dotyczący ćwiczeń laboratoryjnych z zakresu operacji cieplno-dyfuzyjnych.

Korzystając z okazji, wyrażam serdeczne podziękowania wszystkim moim współpracownikom, którzy, udzielając cennych rad oraz służąc życzliwą pomocą, przyczynili się do opracowania niniejszego skryptu. Szczególne podziękowania należą się prof. dr hab. inż. Leonowi Troniewskiemu za jego merytoryczną ocenę treści skryptu oraz szereg cennych wskazówek, a także redaktorowi doc. dr inż. Antoniemu Guzikowi za pomoc redakcyjną w przygotowaniu pracy do druku.

Autor

OZNACZENIA I JEDNOSTKI TYPOWYCH WIELKOŚCI *)

Symbol	Wielkość	Jednostka
A	pole przekroju poprzecznego	m ²
C, K	stałe filtracji	zależy od postaci równania opisującego proces
C	koncentracja	kg/m ³ , (kmol/m ³)
F	powierzchnia	m ²
L	długość	m
M	moment siły	N·m
N	siła	N
P	ciśnienie	Pa, (mm H ₂ O)
R	opór właściwy przegrody filtracyjnej	1/m
T	temperatura	K
V	objętość	m ³
V	strumień objętości	m ³ /s
Z	wilgotność bezwzględna	kg H ₂ O/kg s.s.
a	przyśpieszenie	m/s ²
d	średnica	m
f	liczba oporu przepływu	-
g	przyśpieszenie ziemskie	m/s ²
g	gęstość strumienia masy	kg/(m ² ·s)
h	wysokość, głębokość zanurzenia	m
k	miara lepkości pozornej cieczy nieniutonowskiej	-
m	masa	kg
m	moduł kryzy pomiarowej	-
n	liczba obrotów	obr/min, (obr/s)
n	miara odchylenia właściwości cieczy od właściwości cieczy niutonowskiej	-
r	promień	m
t	temperatura	°C
u	udział masowy	-
w	prędkość przepływu	m/s
x,y,z	kierunki osi prostokątnego układu współrzędnych	-
Δ	różnica	-

Ψ	sferyczność cząstki	-
α	liczba przepływu dla kryzy	-
α	opór właściwy placka filtracyjnego	m/kg
φ	prędkość ścinania	1/s
γ	ciężar właściwy	N/m ³
ε	chropowatość względna powierzchni	-
ε	liczba ekspansji dla gazu	-
η	współczynnik dynamiczny lepkości	Pa·s, (P)
η	sprawność	-
λ	liczba oporu przepływu	-
ξ	liczba oporu miejscowego	-
ν	współczynnik kinematyczny lepkości	m ² /s, (mm ² /s)
ρ	gęstość	kg/m ³
σ	napięcie powierzchniowe	N/m
τ	naprężenie styczne	Pa
τ	czas	s
υ	objętość właściwa	m ³ /kg
ω	prędkość kątowa	1/s

Indeksy:

c	ciecz
cm	ciecz manometryczna
cw	ciecz wzorcowa
e	wartość ekwiwalentna
g	gaz
l	długość
m	określone miejsce na długości
m	wartość średnia
o	wielkość pozorna, liczona na pełny przekrój
obl	wartość obliczona
p	płyn
pow	powietrze
s	ciało stałe
T	wielkość całkowita (totalna)
wzgl	wartość względna
z	wartość zastępcza
zm	wartość zmierzona

*) Głównym celem prezentowanego zestawienia jest wskazanie studentom na sposób oznaczania wielkości w opracowywanych przez nich sprawozdaniach z ćwiczeń

Ćwiczenie 0:

ZAJĘCIA ORGANIZACYJNE

1. CEL ĆWICZENIA

Celem ćwiczenia jest zapoznanie studentów z planowaną tematyką ćwiczeń laboratoryjnych prowadzonych w ramach określonego przedmiotu w danym semestrze, a także regulaminem przebiegu zajęć. Regulamin ten obejmuje wymagania dotyczące: sposobu odbywania zajęć, zakresu przygotowania się studentów do poszczególnych ćwiczeń oraz zasady uzyskania zaliczenia z przedmiotu. W ramach zajęć organizacyjnych podane zostają również wytyczne dotyczące formy i zasad sporządzania sprawozdań z realizowanych ćwiczeń oraz ogólne zasady bezpieczeństwa pracy w laboratorium Katedry Inżynierii Procesowej.

2. TEMATYKA ZAJĘĆ

Tematykę oraz terminy kolejnych ćwiczeń osoba prowadząca zajęcia podaje na początku semestru w postaci ogólnie dostępnego grafiku (gablota Katedry Inżynierii Procesowej). Pozwala to m.in. na terminowe przygotowanie się studentów do zajęć. Ze względu na to, że niniejszy skrypt pomyślany został jako pomoc dydaktyczna dla studentów dwóch różnych kierunków studiów o specyficznych specjalnościach, tematyka ćwiczeń laboratoryjnych ustalana jest w zależności od tego w ramach jakiego przedmiotu i w jakim wymiarze zajęcia te będą realizowane. Wynika stąd, że nie wszystkie ćwiczenia opisane w skrypcie, aczkolwiek dotyczące typowych operacji mechanicznych w inżynierii procesowej, muszą być zrealizowane w ramach danych zajęć laboratoryjnych.

3. BEZPIECZEŃSTWO PRACY W LABORATORIUM

Poniżej podano kilka ogólnych zasad dotyczących bezpieczeństwa przebywania w laboratoriach Katedry Inżynierii Procesowej oraz obsługi będących na ich wyposażeniu stanowisk badawczych:

- studenci mogą przebywać w laboratorium jedynie pod nadzorem osoby prowadzącej zajęcia;

- odpowiedzialnym za bezpieczeństwo pracy w laboratorium oraz stan techniczny stanowisk badawczych jest osoba prowadząca zajęcia; nie zwalnia to jednak studentów od ich własnej oceny istniejących zagrożeń;
- przed przystąpieniem do realizacji ćwiczenia student powinien zapoznać się z budową i sposobem bezpiecznej obsługi stanowiska pomiarowego;
- szczególną uwagę należy zwrócić na pracę i obsługę urządzeń elektrycznych zasilanych napięciem sieciowym (grzałki, autotransformatory, pompy, dmuchawy, itp.);
- przy pracy z odczynnikami chemicznymi unikać ich kontaktu ze skórą oraz wdychania oparów;
- chronić się przed możliwością poparzenia wskutek kontaktu z elementami stanowisk badawczych w których badane są zjawiska ruchu ciepła;
- zachować ostrożność podczas obsługi butli i instalacji sprężonych gazów technicznych;
- wszystkie zauważone nieprawidłowości w pracy urządzeń zgłaszać natychmiast prowadzącemu zajęcia.

4. REGULAMIN ZAJĘĆ

Przedstawiony poniżej regulamin ma na celu zaznajomienie studentów z zasadami odbywania zajęć, ich przebiegiem oraz warunkami uzyskania zaliczenia z przedmiotu:

- uczestnictwo każdego studenta we wszystkich ćwiczeniach laboratoryjnych przewidzianych programem zajęć w danym semestrze jest obowiązkowe;
- grafik zajęć, obejmujący termin oraz tematykę kolejnych ćwiczeń, osoba prowadząca podaje w trakcie zajęć organizacyjnych;
- student powinien być przygotowany na bieżąco do odbycia każdego ćwiczenia laboratoryjnego. Zakres tego przygotowania powinien obejmować co najmniej treść odpowiednich instrukcji zawartych w niniejszym skrypcie;
- przed przystąpieniem do realizacji ćwiczenia, prowadzący zajęcia sprawdza stopień przygotowania się do nich poszczególnych osób; forma tego sprawdzianu (ustna lub pisemna) ustalona zostanie w odniesieniu do danej grupy laboratoryjnej w trakcie zajęć organizacyjnych;
- każdy ze studentów jest zobowiązany do opracowania indywidualnego sprawozdania z odrobionego ćwiczenia; formę i zakres tego sprawozdania podano w punkcie 5 niniejszej instrukcji;
- sprawozdania z kolejnych ćwiczeń podlegają indywidualnej ocenie przez osobę prowadzącą zajęcia;

- ocenę za dane ćwiczenie stanowi średnia arytmetyczna z ocen uzyskanych przez studenta za sprawdzian ze stopnia przygotowania się do zajęć oraz za opracowanie sprawozdanie z przebiegu badań;
- ocenę końcową (zaliczeniową) z przedmiotu stanowi średnia arytmetyczna ze wszystkich wymaganych do odrobienia ćwiczeń;
- przy obliczaniu średnich ocen stosuje się kryteria zawarte w poniższej tabeli

średnia	ocena
poniżej 2,76	nd
$2,76 \div 3,25$	dst
$3,26 \div 3,75$	+ dst
$3,76 \div 4,25$	db
$4,26 \div 4,75$	+ db
powyżej 4,75	bdb

- nie przewiduje się możliwości poprawiania ocen zaliczeniowych z kolejnych ćwiczeń i z całego przedmiotu;
- nieusprawiedliwiona nieobecność studenta na zajęciach laboratoryjnych powoduje, że otrzymuje on za dane ćwiczenie ocenę 0;
- termin złożenia sprawozdania z kolejnych ćwiczeń ustala osoba prowadząca zajęcia. Przekroczenie tego terminu może skutkować obniżeniem oceny za sprawozdanie;
- niezłożenie sprawozdania jest równoznaczne z otrzymaniem za nie oceny niedostatecznej;
- w przypadku nieobecności na zajęciach z przyczyn losowych (odpowiednio udokumentowanych), student jest zwolniony z ich odbycia, a ocena końcowa z przedmiotu wynika ze średniej ocen wyznaczonej z odpowiednio mniejszej liczby odrobionych ćwiczeń;
- w uzasadnionych przypadkach istnieje możliwość odrobienia ćwiczenia z inną niż własna, laboratoryjną grupą studentów.

5. WYTYCZNE SPORZĄDZANIA SPRAWOZDAŃ

Sprawozdanie, stanowiące indywidualny raport studenta z przeprowadzonych badań powinno zawierać następujące punkty:

- Nagłówek informacyjny - pozwoli on na identyfikację osoby składającej sprawozdanie. Przykład nagłówka podano w formie tabeli 1.
- Cel ćwiczenia -

w punkcie tym należy podać krótką informację dotyczącą przedmiotu, zakresu i metody pomiarów wraz z określeniem przewidywanych efektów prowadzenia badań.

- Opis stanowiska doświadczalnego - zawierający schemat budowy oraz ogólny opis działania stanowiska.

Tabela 1

Przykład tabeli nagłówkowej w sprawozdaniu z zajęć

Laboratorium Katedry Inżynierii Procesowej POLITECHNIKA OPOLSKA	<i>Imię i Nazwisko studenta</i> <i>Rok i kierunek studiów</i> <i>Grupa laboratoryjna</i> <i>Rok akademicki/semestr</i>	
Laboratorium z (w tym miejscu wpisać nazwę przedmiotu) Ćwiczenie nr		
Temat: (w tym miejscu wpisać temat ćwiczenia)		
Ćwiczenie odrobiono dnia:	Sprawozdanie złożono dnia:	Ocena:

- Opis metodyki prowadzenia pomiarów - w punkcie tym należy zamieścić informacje stanowiące odpowiedzi na następujące pytania: jakie wielkości mierzono ?; jakimi przyrządami ?; w jakim zakresie i z jakim krokiem zmieniono parametry pracy stanowiska ?; jakie czynniki robocze (gazy, ciecze, ciała stałe) wykorzystano w ćwiczeniu i dlaczego ?
- Zestawienie uzyskanych wyników pomiarów - wzory tabel pomiarowych do poszczególnych ćwiczeń zawierają kolejne instrukcje w niniejszym skrypcie. Tabela pomiarowa powinna być przygotowana przez studenta przed zajęciami, wypełniona i potwierdzona przez prowadzącego w trakcie zajęć i w niezmienionej formie załączona do sprawozdania.
- Opracowanie i analiza uzyskanych wyników - zakres oraz formę opracowania wyników pomiarów podano indywidualnie dla każdego ćwiczenia w kolejnych instrukcjach niniejszego skryptu. W celu prowadzenia analiz zaleca się korzystanie z literatury dotyczącej matematycznego opracowania wyników pomiarów, np. prace [1,2,3]. Ogólne wskazówki dotyczące sposobów poprawnej prezentacji wyników przedstawiono poniżej.

Zasady sporządzania tabel:

- ⇒ Zmienna niezależna powinna być prostą wielkością fizyczną (np. temperatura, ciśnienie, strumień płynu, itp.).
- ⇒ Odstęp pomiędzy możliwie okrągłymi wartościami zmiennej niezależnej powinien być możliwie stały i wynosić:

$$\Delta x = x_i - x_{i-1} = (1, 2 \text{ lub } 5) \cdot 10^{\pm n}$$

lub

$$\Delta x = \frac{x_i}{x_{i-1}} = (1, 2 \text{ lub } 5) \cdot 10^{\pm n}$$

gdzie: i - kolejne wartości zmiennej niezależnej,
 n - liczba naturalna.

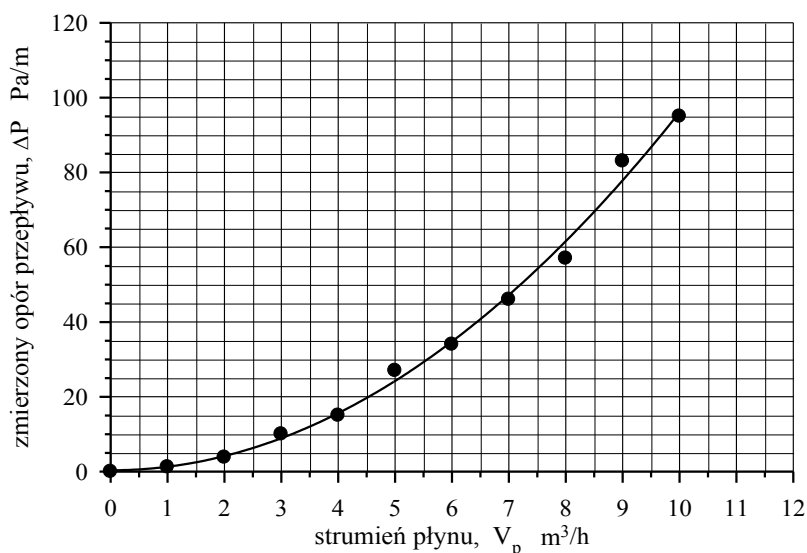
- ⇒ W przypadku tabeli będącej wynikiem obliczeń matematycznych dokładność podawanych wartości liczbowych zależy zasadniczo od decyzji prowadzącego. Natomiast dane empiryczne pochodzące z pomiarów podaje się z dokładnością określoną przez błędy pomiaru.
- ⇒ W zależności od potrzeb, stosowane mogą być:
- tablice jakościowe, zestawiające pewne jakościowe cechy;
 - tablice statystyczne, podające zależność między dwiema grupami danych, z których jedna, będąca najczęściej zmienną niezależną ujęta jest jakościowo, a pozostałe ilościowo;
 - tablice funkcyjne, podające w formie dwu wzajemnie odpowiadających sobie ciągów wartości liczbowych odpowiednią zależność funkcyjną $y = f(x)$.

Zasady sporządzania wykresów:

- ⇒ Wybór rodzaju układu współrzędnych (liniowy, półlogarytmiczny lub logarytmiczny) powinien być przemyślany i uzasadniony.
- ⇒ Zmienną niezależną należy odkładać na osi poziomej.
- ⇒ Osie układu współrzędnych muszą być jednoznacznie opisane.
- ⇒ Skok wartości na osiach należy dobrać w taki sposób, ażeby współrzędne każdego punktu mogły być łatwo odczytane. W tym celu należy stosować odległości między podziałkami osi jako równe: $1 \cdot 10^{\pm n}$, $2 \cdot 10^{\pm n}$, $4 \cdot 10^{\pm n}$, $5 \cdot 10^{\pm n}$.
- ⇒ Skale osi liczbowych nie muszą zaczynać się od zera, a ich graniczne wartości dobierać należy odpowiednio do zakresu zmiennych prezentowanych na wykresie.

- ⇒ Skok zmiennych należy wybrać w ten sposób, aby nachylenie krzywej w jej najbardziej interesującym nas obszarze zbliżone było do 1.
- ⇒ Punkty na wykresie zaznacza się tylko wówczas, gdy dane liczbowe pochodzą z pomiarów; gdy dane pochodzą z obliczeń, punktów na wykresie nie zaznacza się.
- ⇒ Krzywa ilustrująca na wykresie związek funkcyjny pomiędzy zmiennymi powinna być możliwie gładka bez niewyjaśnionych załamań, nieciągłości lub innych osobliwości.
- ⇒ Dla danych liczbowych pochodzących z pomiarów, krzywe ilustrujące tendencję w rozkładzie ich zmienności powinny przebiegać w pobliżu wszystkich punktów, lecz nie muszą przechodzić przez wszystkie punkty. Dotyczy to w szczególności punktów granicznych, które przeważnie odpowiadają granicy możliwości metody lub przyrządu pomiarowego i skutkiem tego otrzymywane są mniejszą dokładnością.

Przykład wykresu spełniającego powyższe zasady przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Przykład graficznej prezentacji wyników pomiarów

Zasady poszukiwania równań opisujących zbiory danych:

- ⇒ Przy doborze równania empirycznego należy kierować się dwoma postulatami: równanie powinno najlepiej przedstawić zależność pomiędzy zmiennymi oraz powinno zawierać najmniejszą liczbę stałych.

⇒ Poszukując postaci takiego równania, najpierw przedstawia się zbiór danych w postaci wykresu punktowego.

⇒ Jeżeli punkty te układają się w przybliżeniu według jakiejś typowej krzywej (bez załamań i nieciągłości), wówczas można próbować dopasować do nich określoną zależność funkcyjną. W odniesieniu do funkcji jednej zmiennej, zwykle wykorzystuje się ogólne równania typu:

$$y = a + b x$$

$$y = a x^b$$

$$y = a + \frac{b}{x}$$

$$y = a e^{bx}$$

$$y = a b^x$$

$$y = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \dots + a_n x^n$$

⇒ Dla ustalenia wartości stałych w przyjętym równaniu należy stosować określone (opracowane w tym celu) metody matematyczne. Najbardziej rozpowszechnioną jest metoda najmniejszych kwadratów.

⇒ Dla ustalenia czy opracowany wzór empiryczny wyraża badaną zależność zmiennych z określoną dokładnością, należy dokonać statystycznej oceny zgodności uzyskiwanych na jego podstawie wartości z wartościami eksperymentalnymi. Metody prowadzenia tej oceny podaje szeroko literatura, np. [1,2,3].

- Podsumowanie i wnioski.

W tym punkcie sprawozdania należy podać wnioski wynikające z przeprowadzonej analizy danych oraz dokonać ogólnego podsumowania przebiegu badań i uzyskanych na ich podstawie wyników (w formie krótkich podpunktów).

Sprawozdanie z ćwiczenia powinno być wykonane na kartkach papieru formatu A4 (jedno- lub dwustronnie) spiętych w jedną całość. Tekst, rysunki i wykresy mogą być wykonane odręcznie lub przy wykorzystaniu techniki komputerowej. Ręczne sporządzanie wykresów wymaga stosowania papieru milimetrowego odpowiedniego formatu. Przy wykorzystaniu techniki komputerowej należy natomiast zwrócić uwagę na możliwości stosowanego programu edycyjnego, tak ażeby efekt pracy był zgodny z zamierzeniami autora oraz ogólnie przyjętymi zasadami pisowni (np. poprawność opisu osi na wykresach, poprawne pisanie równań i indeksów, poprawność czcionki, itp.).

Sprawdzanie powinno być efektem samodzielnej pracy jego autora, a zatem nie może (w całości lub też w pewnej części) stanowić powielenia swej zawartości w stosunku do sprawozdań innych osób.

6. LITERATURA UZUPEŁNIAJĄCA

- [1] STRZAŁKOWSKI A., ŚLIŻYŃSKI A.: Matematyczne opracowanie wyników pomiarów, WNT W-wa 1978
- [2] VOLK W.; Statystyka stosowana dla inżynierów, WNT W-wa 1973
- [3] CZERMIŃSKI J. i inni; Metody statystyczne w doświadczałnictwie chemicznym, PWN, W-wa 1974

7. TEMATYKA ZAGADNIENI SPRAWDZAJĄCYCH

1. Zasady bezpieczeństwa pracy w laboratorium.
2. Regulamin przebiegu zajęć.
3. Wytyczne sporządzania sprawozdań z ćwiczeń.
4. Sposoby prezentacji wyników i zasady ich opracowywania.
5. Metoda najmniejszych kwadratów.
6. Statystyczna ocena wyników doświadczeń.

Ćwiczenie 1:

WYZNACZANIE PODSTAWOWYCH WŁAŚCIWOŚCI FIZYCZNYCH CIECZY

1. CEL ĆWICZENIA

Celem ćwiczenia jest określenie zmian gęstości, lepkości i napięcia powierzchniowego cieczy w funkcji temperatury.

2. WIADOMOŚCI WPROWADZAJĄCE

2.1. GĘSTOŚĆ

Ciała z różnych materiałów, pomimo tej samej objętości, różnią się między sobą swoją masą.

W przypadku cieczy jednorodnej w stanie ustalonym, charakteryzującej się tym, że gęstość w każdym jej punkcie ma taką samą wartość (nie jest funkcją współrzędnych), można napisać

$$\rho = \frac{m}{V}, \quad (1)$$

$$\gamma = \frac{m \mathfrak{g}}{V}. \quad (2)$$

gdzie: ρ - gęstość cieczy, kg/m^3 ;

m - masa cieczy, kg ;

V - objętość cieczy, m^3 ;

γ - ciężar właściwy cieczy, N/m^3 ;

\mathfrak{g} - przyspieszenie ziemskie, m/s^2 .

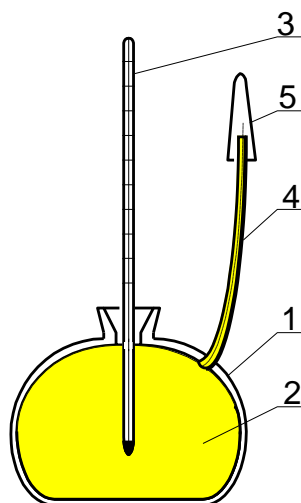
Przyrządy do pomiaru gęstości cieczy, w zależności od metody pomiaru, można podzielić na:

- wagowe - wykorzystujące pomiar masy określonej objętości cieczy badanej;
- pływakowe - wykorzystujące pomiar głębokości zanurzenia w cieczy badanej przyrządu pomiarowego o określonej masie i geometrii;

- hydrostatyczne - wykorzystujące pomiar siły parcia słupa cieczy badanej o określonej wysokości;
- ultradźwiękowe i izotopowe - wykorzystujące pomiar stopnia pochłaniania ultradźwięków lub promieniowania izotopowego przez ciecz badaną w porównaniu do cieczy wzorcowej.

Poniżej opisano dwie metody pomiaru gęstości cieczy wykorzystywane w opisywanym ćwiczeniu.

Metoda wagowa pomiaru gęstości polega na ważeniu cieczy w piknometrze (rys. 1), czyli szklanej kolbce o określonej objętości V_p (zwykle 100 cm^3). Włot kolby zamykany jest szczelnie doszlifowanym termometrem-korkiem. Z boku naczynia wyprowadzona jest cienka rurka kapilarna zamykana doszlifowanym kapturem. Kapilarą odprowadzany jest z kolbki nadmiar cieczy, a kapturek zabezpiecza przed nadmiernym parowaniem cieczy o dużej lotności. Pomiar za pomocą piknomtru pozwala na określenie gęstości względnej. Jako ciecz wzorcowa stosowana jest zwykle woda destylowana.



Rys. 1. Piknometr

1 - naczynie szklane, 2 - ciecz badana, 3 - termometr, 4 - rurka kapilarna, 5 - kapturek

Dla wyznaczenia gęstości względnej ρ_{wzgl} cieczy, należy zważyć kolejno:

- pusty piknometr (m_p);
- piknometr wypełniony cieczą wzorcową w danej temperaturze ($m_{p,cw}$);
- piknometr wypełniony cieczą badaną w tej samej co ciecz wzorcowa temperaturze ($m_{p,c}$).

Z tak przeprowadzonych pomiarów można wyznaczyć masę cieczy wzorcowej

$$m_{cw} = m_{p,cw} - m_p \quad (3)$$

oraz masę cieczy badanej

$$m_c = m_{p,c} - m_p \quad (4)$$

Zgodnie z (1)

$$\rho_{cw} = \frac{m_{cw}}{V_{cw}} = \frac{m_{p,cw} - m_p}{V_p}, \quad (5)$$

$$\rho_c = \frac{m_c}{V_c} = \frac{m_{p,c} - m_p}{V_p}. \quad (6)$$

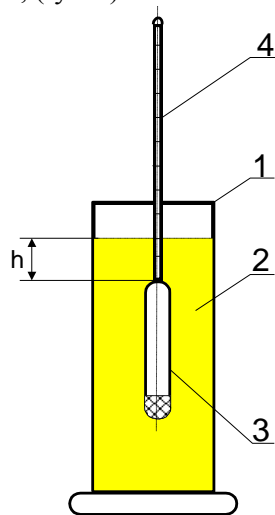
Gęstość względna to stosunek gęstości bezwzględnej danej cieczy do gęstości bezwzględnej innej cieczy, określanej jako wzorcowa. Tak więc

$$\rho_{wzgl} = \frac{\rho_c}{\rho_{cw}} = \frac{m_{p,c} - m_p}{m_{p,cw} - m_p}, \quad (7)$$

Dla określenia gęstości bezwzględnej cieczy badanej, odczytuje się w tablicach (np. [1]), wartość gęstości cieczy wzorcowej w temperaturze pomiaru i wylicza się

$$\rho_c = \rho_{cw} \frac{m_{p,c} - m_p}{m_{p,cw} - m_p}. \quad (8)$$

Metoda pływakowa polega na określaniu gęstości cieczy w danej temperaturze za pomocą areometru, (rys. 2).



Rys. 2. Pomiar gęstości cieczy areometrem

1- menzurka, 2 - ciecz badana, 3 - areometr, 4 - trzpień ze skalą
 Areometr jest pływakim częściowo zanurzonym w cieczy. Głębokość zanurzenia, odczytywana na skali trzpienia areometru jest funkcją gęstości cieczy. Wykorzystując prawo wyporu można napisać

$$m \mathcal{g} = (v_0 + A h) \rho_c \mathcal{g} \quad (9)$$

gdzie: v_0 - objętość bańki areometru, m^3 ;

A - pole przekroju poprzecznego trzpienia, m^2 ;

h - głębokość zanurzenia, m ;

m - masa całkowita areometru, kg ;

ρ_c - gęstość cieczy, kg/m^3 ;

\mathcal{g} - przyspieszenie ziemskie, m/s^2 ;

skąd

$$\rho_c = \frac{m}{v_0 + A h} \quad (10)$$

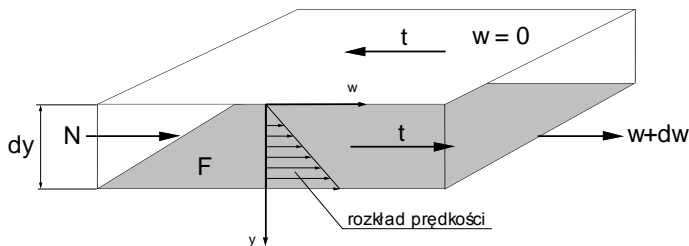
Oznaczając stałą przyrządu jako $v_0/A = h_0$ otrzymuje się równanie

$$\rho_c = \frac{m}{A(h + h_0)}, \quad (11)$$

a zatem zależność (nieliniową) pomiędzy gęstością cieczy a głębokością zanurzenia pływaka, $\rho_c = f(h)$. Fakt ten pozwala na bezpośrednie wyskalowanie trzpienia przyrządu w jednostkach gęstości. W praktyce operuje się kompletem areometrów o różnych zakresach pomiarowych.

2.2. LEPKOŚĆ

Do wyjaśnienia pojęcia lepkości służy model przedstawiony na rys. 3.



Rys. 3. Schemat objaśniający pojęcie lepkości

Płyn w ruchu uwarstwionym, zawarty jest między dwiema nieskończonymi, równoległymi płaszczyznami. Jeżeli jedna płaszczyzna przesuwa się względem

drugiej ze stałą prędkością, to ustala się pewien profil rozkładu prędkości w warstwie płynu.

Dla płynów newtonowskich naprężenie τ , a więc siła przyłożona na jednostkę powierzchni potrzebna do utrzymania stałej jej prędkości, jest określone równaniem

$$\tau = \frac{N}{F} = \eta \frac{dw}{dy} , \quad (12)$$

Wielkość η w powyższym równaniu nosi nazwę współczynnika dynamicznego lepkości.

Występowanie lepkości tłumaczy się tarciem wewnętrznym płynu. Płyn pozbawiony tego tarcia (płyn idealny) wykazywałby współczynnik lepkości równy zeru. Ciało stałe, aż do granicy płynności, charakteryzuje się lepkością nieskończenie wielką.

Jednostką współczynnika dynamicznego lepkości w układzie SI jest Pa·s, czyli kg/(m·s). W układzie CGS jednostka ta wyrażona jest jako cm/(g·s) i nosi nazwę puaza (symbol P). Woda w temperaturze 20 °C wykazuje lepkość 1 cP, (centypuaz). Iloraz $\eta/\rho = \nu$ nosi nazwę współczynnika kinematycznego lepkości. Jego wymiarem w układzie SI jest m²/s, w układzie CGS - stokes St.

Metody pomiaru lepkości klasyfikuje się według różnych kryteriów. Jednym z nich jest podział wg wykorzystywanej zasady pomiarowej. Z tego też względu można wyróżnić przyrządy w których:

- strumień objętości cieczy jest ciągniony (przez: płytki ślizgowe, opadające ciało lub obracające się współosiowo powierzchnie np. cylindry, stożki);
- strumień objętości cieczy wypływa pod ciśnieniem przez kapilarę lub szczelinę;
- strumień objętości cieczy jest wydłużany lub ściskany;
- obserwowane są tłumienia drgań w badanej cieczy.

Poniżej opisano dwa klasyczne przyrządy do pomiaru lepkości, wykorzystywane w omawianym ćwiczeniu.

Lepkościomierz Englera (rys. 3), służy do pomiaru względnej lepkości cieczy wyrażanej w stopniach Englera (°E). Lepkość względną określa stosunek czasu wypływu 200 cm³ badanej cieczy z określonej wymiarowo kapilary (w danej temperaturze) do czasu wypływu z tej samej kapilary, tej samej objętości wody destylowanej o temperaturze 20 °C.

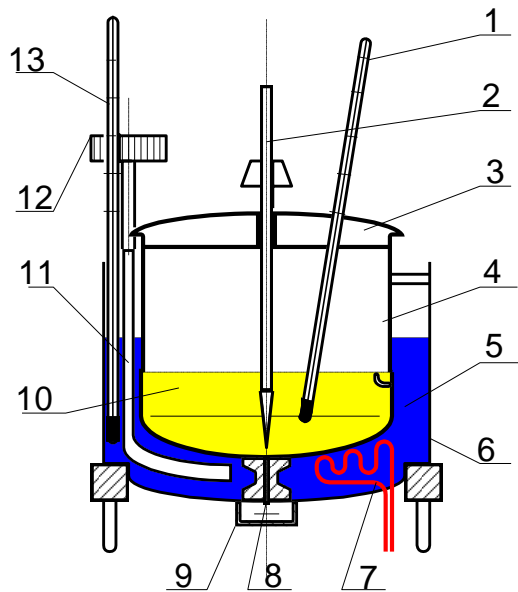
$$^{\circ}E = \frac{\tau_c}{\tau_{cw,20^{\circ}C}} . \quad (13)$$

Stopnie Englera (°E) zamienić można na jednostki układu SI korzystając z zależności

$$v = \left(7,319 \text{ } ^\circ\text{E} - \frac{6,3126}{^\circ\text{E}} \right) \cdot 10^{-6} , \quad (14)$$

$$\eta = v \rho . \quad (15)$$

Lepkościomierz Englera przedstawiono na rys. 3. Składa się on ze zbiornika (4), wewnątrz połączanego i polerowanego, do którego wlewana jest badana ciecz (10). Zbiornik (4) umieszczony jest w łaźni wodnej (6), zaopatrzonej w mieszalnik skrzydełkowy (11), poruszany za pomocą gałki (12). W środku dna zbiornika znajduje się kapilara platynowa (8), zamykana zatyczką drewnianą (2). Temperatura wody w łaźni sprawdzana jest za pomocą termometru (13), natomiast za pomocą termometru (1) kontrolowana jest temperatura badanej cieczy.

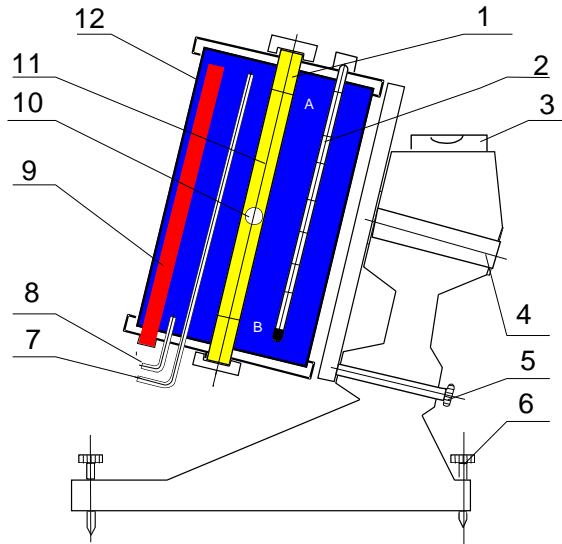


Rys. 3. Schemat lepkościomierza Englera

1 - termometr, 2 - zatyczka, 3 - pokrywa, 4 - zbiornik pomiarowy, 5 - ciecz termostatyczna, 6 - zbiornik grzewczy, 7 - grzałka, 8 - kapilara, 9 - korek spustowy, 10 - ciecz badana, 11 - mieszadło, 12 - gałka mieszadła, 13 - termometr

W lepkościomierzu Höpplera do pomiaru lepkości zostało wykorzystane prawo Stokes'a, wskazujące na proporcjonalność pomiędzy siłą lepkości i prędkością ruchu warstwek cieczy. Konstrukcję lepkościomierza Höpplera przedstawia rys. 4. Umieszczona centralnie, wewnątrz szlifowana rurka szklana (1) jest otoczona kąpielą wodną, której temperaturę mierzy termometr

(2). Kąpiel ta może być połączona z ultratermostatem poprzez króćce (7) i (8). Na rurce (1) zaznaczone są dwie kreski A i B. Kulki o różnej średnicy i gęstości dobierane są odpowiednio do spodziewanych wartości współczynnika lepkości cieczy.



Rys. 4. Schemat lepkościomierza Höpplera

1 - rurka szklana, 2 - termometr, 3 - libella, 4 - sworzeń obrotowy, 5 - śruba blokująca, 6 - śruba poziomująca, 7 i 8 - wlot i wylot cieczy termostatycznej, 9 - grzałka, 10 - kulka, 11 - ciecz badana, 12 - płaszcz z cieczą grzewczą.

Do prawidłowego poziomego ustawienia przyrządu służy libella (3) i śruba (6). Rurka zamykana jest dwoma korkami. Płaszcz kąpeli wodnej (12) wraz z rurką pomiarową umieszczone są w odpowiedniej oprawie, która może obracać się wraz z osią o kąt 180° . Śruba (5) służy do pionowego ustawienia układu pomiarowego. Pomiar lepkości polega na określeniu czasu opadania w kalibrowanej rurce szklanej wypełnionej badaną cieczą, kulki szklanej lub metalowej o średnicy rzędu $(10 \div 20)$ mm. Dla uniknięcia zakłóceń ruchu kulki, rurka jest odchylona od pionu o kąt $\alpha \cong 10^\circ$.

Wykorzystując lepkościomierz Höpplera, lepkość cieczy badanej wyznacza się z zależności

$$\eta_c = K(\rho_k - \rho_c) \tau, \quad (16)$$

w której: ρ_k - gęstość kulki, kg/m^3 ;

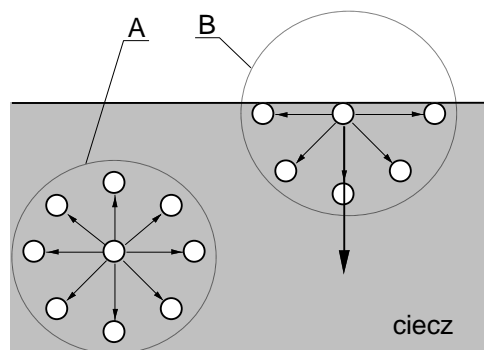
ρ_c - gęstość cieczy badanej w danej temperaturze, kg/m^3 ;

τ - czas opadania kulki w rurce pomiędzy kreskami A i B, s;

K - stała przyrządu dla danego układu kulka-rurka, wyznaczona przy wykorzystaniu cieczy wzorcowej o znanej lepkości, m^2/s^2 .

2.3. NAPIĘCIE POWIERZCHNIOWE

Jak przedstawiono na rys. 5, siły oddziaływań pomiędzy cząsteczkami wewnątrz cieczy znoszą się wzajemnie, nie mogą więc wykazać swego istnienia. Inaczej jest na powierzchni cieczy. Tutaj cząsteczki poddawane są działaniu nierównoważonych sił międzycząsteczkowych skierowanych w głąb cieczy. Wypadkowa tych sił (nazywana siłą napięcia powierzchniowego) jest prostopadła do powierzchni i sprawia, że warstwa powierzchniowa wywiera na



Rys. 5. Oddziaływania międzycząsteczkowe w cieczy.

A - w głębi cieczy, B - przy powierzchni cieczy

resztę cieczy ciśnienie molekularne. Siły napięcia powierzchniowego dążą zatem do zmniejszenia powierzchni cieczy.

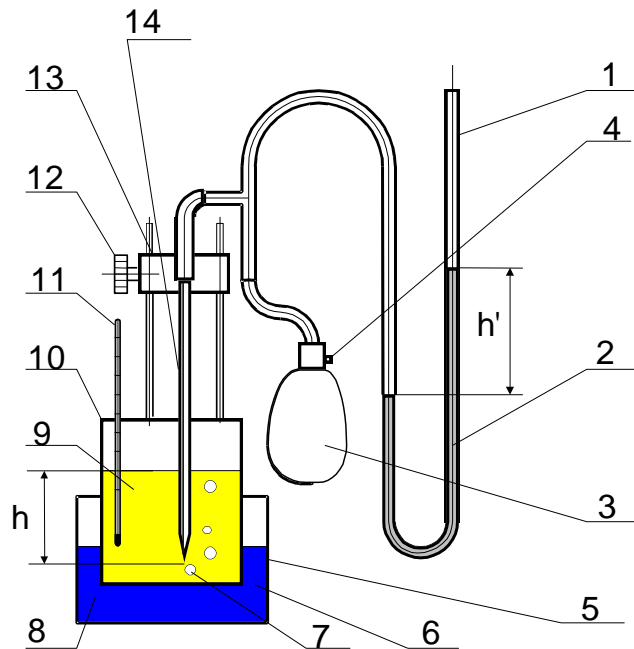
Współczynnik napięcia powierzchniowego można określić jako siłę styczną do powierzchni cieczy i działającą na jednostkę długości linii rozdziału. Jednostką określonego w ten sposób współczynnika napięcia powierzchniowego jest w układzie SI N/m.

Napięcie powierzchniowe zależy od rodzaju cieczy (dla każdej cieczy jest ono inne, gdyż różne cząstki działają na siebie z różnymi siłami), także od temperatury, gdyż przy zwiększaniu ruchów termicznych cząstek cieczy, siły międzycząsteczkowe maleją i w związku z tym maleje również napięcie powierzchniowe.

Wyznaczanie napięcia powierzchniowego cieczy, przeprowadzane jest głównie trzema sposobami:

- poprzez rozrywanie błonki powierzchniowej przy jej rozciąganiu,
- poprzez pomiar wzniesienia słupa cieczy w rurkach włoskowatych,
- na podstawie analizy wypływu kropeł cieczy przez kapilarę.

Innym, ciekawym sposobem pomiaru napięcia powierzchniowego cieczy jest metoda pęcherzykowa, polegająca na pomiarze ciśnienia potrzebnego do przepchnięcia pęcherzyka powietrza przez kapilarę zanurzoną w badanej cieczy. Schemat przyrządu pomiarowego działającego na tej zasadzie, a wykorzystywanego w niniejszym ćwiczeniu, przedstawiono na rys. 6. Kapilarę (14) o średnicy wewnętrznej 0,348 mm, zanurza się w cieczy badanej (9) na głębokość h . Obserwując wskazania U-rurki, pompką (3) zwiększa się ciśnienie powietrza wewnątrz przyrządu do chwili gdy z kapilary zostanie wypchnięty pęcherzyk powietrza. Umieszczenie zbiorniczka pomiarowego (10) w termostacie (5) wypełnionym cieczą grzejną (8), pozwala na regulację temperatury cieczy badanej. Temperaturę kontroluje termometr (11).



Rys. 6. Przyrząd do pomiaru napięcia powierzchniowego cieczy metodą pęcherzykową

1 - manometr cieczowy, 2 - ciecz manometryczna, 3 - pompka ręczna, 4 - zawór spustowy, 5 - termostat, 6 - ciecz termostatyczna, 7 - pęcherzyki powietrza, 8 - ciecz grzejna, 9 - ciecz badana, 10 - naczynie, 11 - termometr, 12 - pokrętko regulacyjne, 13 - ruchomy statyw, 14 - kapilara

Zmierzone nadciśnienie powietrza przy znajomości średnicy kapilary i głębokości jej zanurzenia w cieczy badanej o znanej gęstości, pozwala na wyznaczenie napięcia powierzchniowego wg równania

$$\sigma_c = \frac{r g}{2} (\rho_{cm} h' - \rho_c h) \quad \text{N/m} \quad (17)$$

w którym: r - promień kapilary, m;

g - przyspieszenie ziemskie, m/s^2 ;

ρ_{cm} - gęstość cieczy manometrycznej, kg/m^3 ;

ρ_c - gęstość cieczy badanej, kg/m^3 ;

h' - różnica poziomów cieczy manometrycznej, m;

h - głębokość zanurzenia kapilary w cieczy badanej, m.

3. PRZEBIEG ĆWICZENIA

Do przeprowadzenia pomiarów podstawowych właściwości fizycznych cieczy należy wykorzystać wodny roztwór o zawartości 25 % obj. czystej gliceryny. Ponieważ gliceryna dostępna w handlu nie jest chemicznie czystą substancją, a wodnym roztworem o określonym stężeniu (w różny sposób wyrażanym), w trakcie przygotowania roztworu poddawanego badaniom należy dokonać stosownych przeliczeń stężeń korzystając z przeliczników stężeń zawartych np. w [1].

3.1. POMIAR GĘSTOŚCI

Pomiar piknometrem

Kolejność czynności podczas pomiaru gęstości przy użyciu piknometru jest następująca:

- a) wymyć piknometr wodą a następnie alkoholem, wysuszyć piknometr;
- b) zważyć pusty piknometr wraz z termometrem i kapturkiem kapilary;
- c) wypełnić piknometr wodą destylowaną o temperaturze 20°C ,
- d) założyć termometr;
- e) osuszyć nadmiar wody która wypłynęła kapilarą;
- f) założyć kapturek na kapilarę;
- g) zważyć piknometr, notując jego masę i temperaturę wody destylowanej;
- h) zdjąć kapturek z kapilary i w łaźni wodnej zwiększyć temperaturę wody destylowanej wg przyjętego kroku;
- i) powtórzyć czynności wymienione w pkt. e)÷h) do chwili osiągnięcia założonej temperatury końcowej;
- j) powtórzyć czynności wymienione w pkt. a) ÷ i) dla przygotowanego uprzednio roztworu gliceryny;

- k) wyniki pomiarów i odpowiednie obliczenia (prowadzone na podstawie równania (8)), notować w poniższej tabeli.

Pomiar gęstości cieczy piknometrem				
Ciecz badana:				
Ciecz wzorcowa:				
Masa pustego piknomietru, m_p : g				
Temperatura	$m_{p,cw}$	$m_{p,c}$	ρ_{cw}	ρ_c
°C	g	g	kg/m ³	kg/m ³
20				
22				
24				
...				

Pomiar areometrem

Kolejność czynności podczas pomiaru gęstości przy użyciu areometrów jest następująca:

- oczyścić menzurkę i areometry w wodzie i alkoholu;
- ogrzać ciecz badaną do odpowiedniej temperatury, (ok. 50 °C);
- wlać ciecz do menzurki i zanurzyć w niej termometr oraz areometr o odpowiednim zakresie pomiarowym;
- w miarę ochładzania się cieczy, np. co 2°C, notować w tabeli temperaturę oraz gęstość wskazywaną na skali areometru.
- w razie potrzeby wymienić areometr dostosowując jego zakres pomiarowy do aktualnej gęstości cieczy.

Pomiar gęstości cieczy areometrem		
Ciecz badana:		
Temperatura	Zakres pomiarowy areometru	ρ_c
°C	kg/m ³	kg/m ³
50		
48		
46		
...		

3.2. POMIAR LEPKOŚCI

Pomiar lepkościomierzem Englera

Kolejność czynności podczas pomiaru lepkości przy użyciu lepkościomierza Englera jest następująca:

- wymyć przyrząd wodą i alkoholem, a następnie wysuszyć go;
- wlać do zbiornika lepkościomierza 200cm³ wody destylowanej;
- włączyć grzałkę i ogrzać ciecz termostatyczną do temperatury pomiaru;
- gdy woda destylowana osiągnie założoną temperaturę pomiaru (20 °C) wyciągnąć zatyczkę kapilary i uruchomić stoper;
- zmierzyć czas wypływu do zbiornika miarowego 200cm³ wody destylowanej;
- powtórzyć wielokrotnie czynności wymienione w pkt. a)÷e) w odniesieniu do cieczy badanej zwiększając każdorazowo jej temperaturę wg przyjętego kroku;
- wyniki pomiarów i obliczeń wg równań (13÷15) notować w tabeli.

Pomiar lepkości cieczy lepkościomierzem Englera					
Ciecz badana:					
Ciecz wzorcowa:					
Czas wypływu cieczy wzorcowej przy 20 °C: s					
Temperatura	Czas wypływu cieczy badanej	Lepkość cieczy badanej			
		°C	s	°E	m ² /s
20					
22					
24					
...					

Pomiar lepkościomierzem Höpplera

Kolejność czynności podczas pomiaru lepkości przy użyciu lepkościomierza Höpplera jest następująca:

- wymyć rurkę pomiarową wodą i alkoholem;
- naląć badanej cieczy do rurki;
- umieścić w rurce odpowiednio dobraną kulkę;
- usunąć pęcherzyki powietrza z cieczy i zatkać wylot korkiem;
- podgrzać ciecz termostatyczną za pomocą grzałki w lepkościomierzu lub za pomocą oddzielnego termostatu;
- ustawić odpowiednio przyrząd za pomocą libelli i śruby poziomującej;
- obrócić przyrząd o kąt 180°, a po opadnięciu kulki ustawić go w położeniu pierwotnym i zabezpieczyć śrubą blokującą;
- zmierzyć czas opadania kulki pomiędzy kreskami zaznaczonymi na rurce;

- i) pomiar powtórzyć kilkakrotnie, aż do uzyskania zbliżonych wyników, co oznacza, że temperatura cieczy badanej zrównała się z temperaturą cieczy ogrzewającej;
- j) powtórzyć pomiary dla różnych wartości temperatury cieczy;
- k) wyniki pomiarów i obliczeń wg równania (16) notować w tabeli.

Pomiar lepkości cieczy lepkościomierzem Höpplera							
Ciecz badana:							
Temperatura	Stałe przyrządu		Czas opadania kulki	Gęstość cieczy badanej	Lepkość cieczy badanej		
	°C	K			ρ_k	s	kg/m ³
20							
22							
...							

Wartości stałej przyrządu i gęstość kulek pomiarowych

Rodzaj kulki	Średnica kulki	Gęstość kulki	Stała K
	mm	kg/m ³	m ² /s ²
Szklana - niebieska	14,7	2495	$2,3817 \cdot 10^{-8}$
Szklana - bezbarwna	15,6	2510	$6,3900 \cdot 10^{-8}$
Metalowa	14,9	7754	$2,0640 \cdot 10^{-6}$

3.3. POMIAR NAPIĘCIA POWIERZCHNIOWEGO

Kolejność czynności podczas pomiaru napięcia powierzchniowego, przy użyciu przyrządu przedstawionego na rys.6, jest następująca:

- oczyścić kapilarę;
- nalać cieczy badanej do zbiorniczka;
- zanurzyć kapilarę w cieczy na głębokość (3÷4) cm;
- ogrzać ciecz do założonej temperatury pomiaru;
- zakręcić zawór spustowy w pompce;
- pompując, zwiększać ciśnienie aż do momentu wypływu pierwszej bańki powietrza, jednocześnie obserwować i zanotować wskazanie U-rurki;
- otworzyć zawór spustowy w pompce;

- h) pomiar powtórzyć aż do uzyskania powtarzających się wyników, tzn. aż do momentu gdy temperatura kapilary i powietrza w niej zrówna się z temperaturą badanej cieczy;
- i) pomiary powtórzyć dla różnych wartości temperatury cieczy;
- j) wyniki pomiarów i obliczeń prowadzonych wg równania (17) notować w tabeli.

Pomiar napięcia powierzchniowego cieczy				
Ciecz badana:				
Średnica kapilary: 0,348 mm				
Gęstość cieczy manometrycznej:				
Temperatura	Głębokość zanurzenia kapilary	Wskazanie U-rurki	Gęstość cieczy badanej	Napięcie powierzchniowe cieczy badanej
°C	mm	mm	kg/m ³	N/m
20				
22				
24				
...				

4. ZAKRES OPRACOWANIA WYNIKÓW

- Wykreślić charakterystyki zmian gęstości, lepkości i napięcia powierzchniowego badanych cieczy w funkcji temperatury ($y=f(t)$), a następnie, wykorzystując metodę najmniejszych kwadratów, znaleźć równania funkcji opisujących te przebiegi.
- Wykorzystując podane w literaturze, np. [1], dane dotyczące właściwości fizycznych cieczy, porównać dokładność charakterystyk uzyskanych wg pkt. 1. W tym celu wyznaczyć średni błąd względny pomiędzy wartościami tablicowymi a uzyskiwanymi na podstawie opracowanych równań $y = f(t)$.
- Podać wnioski z przeprowadzonego ćwiczenia.

5. LITERATURA UZUPEŁNIAJĄCA

- [1] TRONIEWSKI L. i inni: Tablice do obliczeń procesowych, Skrypt PO nr 178, Opole 1996
- [2] PN-77/C-04014: Oznaczanie lepkości wiskozymetrem Englera
- [3] PN-78/C-04019: Oznaczanie lepkości dynamicznej lepkościomierzem Höpplera

6. TEMATYKA ZAGADNIENÍ KONTROLNYCH

1. Definicje i jednostki gęstości, lepkości i napięcia powierzchniowego.
2. Metody pomiaru gęstości cieczy.
2. Metody pomiaru lepkości cieczy.
3. Metody pomiaru napięcia powierzchniowego cieczy.
5. Wpływ temperatury na gęstość, lepkość i napięcie powierzchniowe cieczy.

Ćwiczenie 2:

WŁAŚCIWOŚCI REOLOGICZNE CIECZY NIENIUTONOWSKICH

1. CEL ĆWICZENIA

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z budową i działaniem wiskozymetru rotacyjnego oraz wyznaczenie krzywych płynięcia wybranych cieczy nieniutonowskich.

2. WIADOMOŚCI WPROWADZAJĄCE

Właściwości reologiczne płynu określają jego zachowanie się w czasie przepływu. Głównym parametrem decydującym o zjawiskach zachodzących w płynie w trakcie jego ruchu jest lepkość. Ze względu na charakter zmian siły lepkości w płynach, można je podzielić na płyny niutonowskie i płyny nieniutonowskie.

Płynami niutonowskimi nazywa się takie gazy i ciecze, które w warunkach odkształcenia uwarstwowanego (np. ścinanie proste pomiędzy równoległymi płytami), stosują się do prawa Newtona, czyli wykazują prostą proporcjonalność pomiędzy naprężeniem stycznym a gradientem prędkości, co można przedstawić w postaci równania

$$\tau = \eta \frac{dw}{dy} = \eta \dot{\gamma} \quad (1)$$

w którym: τ - naprężenie styczne (ścinające), Pa;
 w - prędkość, m/s;
 y - współrzędna odległości, m,
 η - dynamiczny współczynnik lepkości, Pa·s;
 $\dot{\gamma}$ - prędkość ścinania, 1/s.

Prawo Newtona jest spełniane przez wszystkie gazy oraz ciecze i roztwory o małej masie cząsteczkowej, czyli przez wszystkie płyny w których rozproszenie energii następuje w wyniku zderzeń stosunkowo małych cząstek. W praktyce często występuje ruch różnego rodzaju past, syropów, szlamów, zawiesin,

roztworów lub stopów polimerów dla których prawo Newtona nie jest spełnione. Tę właśnie grupę płynów określa się mianem nieniutonowskich.

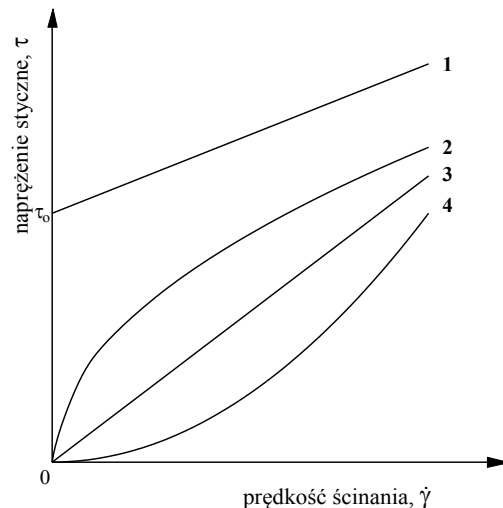
Graficzna zależność naprężenia stycznego od gradientu prędkości (tzw. prędkości ścinania) nosi nazwę krzywej płynięcia. Krzywa płynięcia płynu niutonowskiego jest linią prostą przechodzącą przez początek układu współrzędnych. Nachylenie tej linii, czyli tangens kąta jaki tworzy ona z osią odciętych, równe jest współczynnikowi lepkości dynamicznej płynu. Wszystkie ciecze, których krzywe płynięcia nie są liniami prostymi, zalicza się do cieczy nieniutonowskich. Lepkość cieczy nieniutonowskich, w określonych warunkach ciśnienia i temperatury, nie jest więc wartością stałą lecz zmienia się w zależności od wielu czynników np. od szybkości ścinania, od kształtu naczynia lub aparatu w którym ciecz jest zawarta, albo też od rodzaju procesu jakiemu uprzednio ją poddawano. Ciecze nieniutonowskie można podzielić na trzy podstawowe typy:

Typ I. Ciecze, dla których w dowolnym punkcie szybkość ścinania jest funkcją wyłącznie naprężenia stycznego panującego w danym punkcie.

Typ II. Ciecze, dla których zależność pomiędzy naprężeniem stycznym i szybkością ścinania zależy również od czasu lub też sposobu ścinania cieczy.

Typ III. Układy przejawiające pewne cechy charakterystyczne zarówno dla ciał stałych jak i dla cieczy, wykazujące częściowy powrót sprężysty po odkształceniu. Są to tzw. ciecze lepkosprężyste.

Ciecze zaliczane do **typu I**, można podzielić na trzy podgrupy: ciecze binghamowskie (liniowo plastyczne), ciecze pseudoplastyczne oraz ciecze wykazujące dilatancję. Ich krzywe płynięcia przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Krzywe płynięcia cieczy niutonowskiej i cieczy typu I.

1 - ciecz binghamowska, 2 - ciecz pseudoplastyczna, 3 - ciecz niutonowska, 4 - ciecz wykazująca dilatancję. τ_0 - granica płynięcia cieczy binghamowskiej (plastycznej)

Ciecz binghamowska (plastyczna)

Krzywa płynięcia cieczy binghamowskiej ma postać linii prostej, która przecina oś naprężenia stycznego w punkcie τ_0 . Minimalna wartość naprężenia stycznego powyżej której następuje płynięcie ciała, nosi nazwę granicy płynięcia. Równanie reologiczne cieczy plastycznej jest następujące

$$\tau - \tau_0 = \eta_p \dot{\gamma}; \quad \tau > \tau_0 \quad (2)$$

gdzie: τ - naprężenie styczne, Pa;

τ_0 - granica płynięcia, Pa;

η_p - lepkość plastyczna (współczynnik sztywności), Pa·s;

$\dot{\gamma}$ - prędkość ścinania, 1/s.

Hipoteza wyjaśniająca własności ciał plastycznych zakłada, że w stanie spoczynku mają one strukturę trójwymiarową, której sprężystość jest dostatecznie duża, by oprzeć się każdemu naprężeniu stycznemu, mniejszemu od granicy płynięcia τ_0 . Jeśli granica płynięcia zostanie przekroczona, struktura ta ulega zniszczeniu i układ przybiera cechy cieczy niutonowskiej, na którą działa naprężenie $\tau - \tau_0$. Z chwilą, gdy naprężenie styczne jest mniejsze od granicy płynięcia, struktura zostaje ponownie odbudowana.

Typowymi przykładami cieczy binghamowskiej (plastycznej) są zawiesiny, szlamy, farby olejne, pasta do zębów, osady odstożnikowe, itp.

Ciecz pseudoplastyczna

Ciecze pseudoplastyczne nie mają granicy płynięcia, a stosunek naprężenia stycznego do szybkości ścinania zmniejsza się w ich przypadku, w miarę zwiększania się szybkości ścinania. Krzywa płynięcia staje się linią prostą dopiero przy bardzo dużej szybkości ścinania. Logarytmiczny wykres zależności naprężenia stycznego i szybkości ścinania dla cieczy pseudoplastycznej jest często linią prostą o nachyleniu zawierającym się w zakresie od 0 do 1 i dlatego najprostszym matematycznym modelem reologicznym stosowanym do opisu krzywej płynięcia tych cieczy jest tzw. model potęgowy Ostwalda - de Waele

$$\tau = k \dot{\gamma}^n \quad (3)$$

gdzie: τ - naprężenie ścinające,

$\dot{\gamma}$ - prędkość ścinania,

k - miara lepkości pozornej,

n - miara odchylenia cieczy od cieczy niutonowskiej.

Hipoteza wyjaśniająca zachowanie się cieczy pseudoplastycznej zakłada, że w miarę zwiększania szybkości ścinania, asymetryczne cząsteczki podlegają stopniowemu uporządkowaniu. Tak więc zamiast stanu bezładnego ułożenia istniejącego w nieruchomej cieczy, ustalenie przepływu powoduje układanie się dłuższych osi cząsteczek wzdłuż linii płynięcia. Lepkość pozorna zaczyna więc maleć w miarę zwiększania szybkości ścinania, aż do momentu, gdy ściślejsze ułożenie cząsteczek wzdłuż linii przepływu stanie się niemożliwe; krzywa płynięcia przechodzi wówczas w linię prostą. Zmniejszenie lepkości cieczy pseudoplastycznych pod wpływem zwiększenia prędkości ścinania jest przyczyną określania ich również jako tzw. cieczy rozrzedzanych ścinaniem.

Takie właściwości wykazują zawiesiny o cząsteczkach niesymetrycznych lub roztwory polimerów, np. pochodnych celulozy.

Ciecz wykazująca dilatację

Podobnie jak ciecze pseudoplastyczne, również ciecze przejawiające dilatację nie wykazują granicy płynięcia, jednakże ich lepkość pozorna zwiększa się ze zwiększaniem szybkości ścinania. Z tego względu ciecze wykazujące dilatację określane są również mianem cieczy zagęszczanych ścinaniem. Ciecze te zazwyczaj spełniają prawo potęgowe, przy czym n jest większy od jedności. Typową dilatację wykazują zawiesiny o dużym stężeniu ciała stałego. Zjawisko to tłumaczone jest tym, że w stanie spoczynku ciecz zawarta w zawieszynie wystarcza by wypełnić wszystkie pory i podczas ścinania w zakresie małej szybkości spełnia ona rolę smaru zmniejszającego tarcie pomiędzy cząstkami stałymi. W miarę zwiększania szybkości ścinania, ciasne upakowanie cząstek ulega zniszczeniu, co powoduje pewne rozszerzenie (dilatację) zawiesiny, a ciecz nie jest już w stanie spełniać roli smaru, a tym samym naprężenie niezbędne dla utrzymania ruchu cieczy zwiększa się.

W procesach przemysłowych ciecze przejawiające dilatację spotyka się rzadziej niż ciecze pseudoplastyczne. W przypadkach gdy ciecz taka spełnia prawo potęgowe interpretacja właściwości obu typów cieczy jest zbliżona.

Ciecze nieniutonowskie zaliczane do **typu II**, można z kolei podzielić na: ciecze tiksotropowe oraz ciecze wykazujące reopeksję.

Ciecz tiksotropowa

Lepkość pozorna cieczy tiksotropowych uzależniona jest zarówno od szybkości ścinania jak i czasu trwania tego ścinania. Jeśli poddać ścinaniu ciecz tiksotropową, będącą dłuższy czas w spoczynku, jej lepkość pozorna ulega zmniejszeniu z upływem czasu na skutek stopniowego niszczenia struktury. Szybkość rozpadania się struktury zależy od ilości wiązań, które mogą ulec zniszczeniu. Szybkość momentalnej odbudowy struktury natomiast zwiększa się z czasem. W końcu osiągnięty zostaje stan równowagi dynamicznej, w

którym szybkość odbudowy struktury zrówna się z szybkością jej rozpadu, a lepkość cieczy tiksotropowej jest już wielkością stałą niezależną od czasu trwania ścinania. Tiksotropia jest procesem odwracalnym i w bezruchu struktura cieczy stopniowo odbudowuje się.

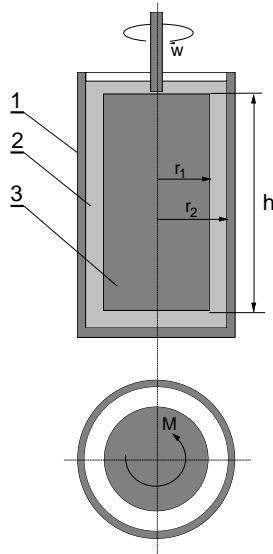
Ciecz wykazująca reopeksję

W przypadku tej grupy cieczy nieniutonowskich, przy niewielkiej prędkości ścinania następuje budowa struktury wewnętrznej cieczy. Im czas trwania ścinania jest dłuższy tym struktura jest bardziej rozbudowana, a zatem lepkość cieczy wykazującej reopeksję zwiększa się wraz z upływem czasu. Przy dużej prędkości ścinania, struktura wewnętrzna ulega jednak zniszczeniu i lepkość przyjmuje wartość stałą. W praktyce ciecze należące do tej grupy występują bardzo rzadko.

Ciecze **typu III** wykazują pewną sprężystość postaci a jednocześnie są bardzo lepką cieczą. Typowy przykład stanowią tutaj może smoła, spełniająca pod względem lepkości prawo Newtona, a ze względu na sprężystość - prawo Hooke'a.

Pomiary właściwości reologicznych płynów nieniutonowskich sprowadzają się do wyznaczenia ich krzywych płynięcia w danych warunkach. Przyrządy, które umożliwiają wyznaczenie przebiegu funkcji $\tau = f(\dot{\gamma})$ noszą nazwę wiskozymetrów; przy czym można je podzielić na: rotacyjne i kapilarne.

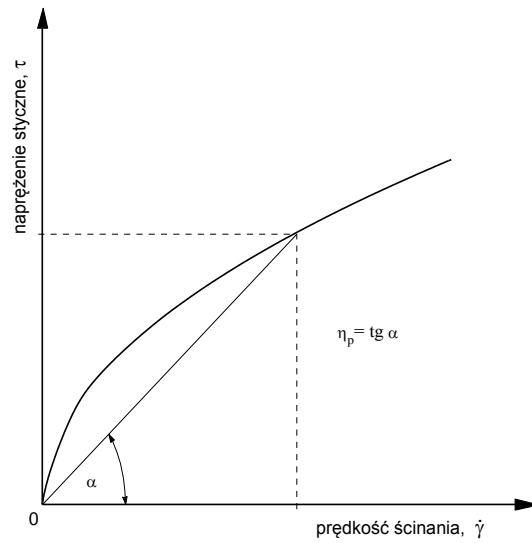
Poniżej opisano zasadę działania wiskozymetru rotacyjnego o cylindrach współosiowych, wykorzystanego do prowadzenia pomiarów będących przedmiotem niniejszego ćwiczenia. W przypadku tego przyrządu (rys. 2),



Rys. 2. Zasada działania wiskozymetru o cylindrach współosiowych

1 - cylinder nieruchomy, 2 - ciecz badana, 3 - cylinder obrotowy
 badana próbka cieczy znajduje się pomiędzy ścianami długich współosiowych cylindrów, z których jeden można obracać z dowolną prędkością kątową i mierzyć moment siły oporowej przenoszonej na cylinder nieruchomy. Zmiany momentu oporowego M , wynikające ze zmian prędkości kątowej ω , pozwalają określić zależność pomiędzy szybkością ścinania, a naprężeniem stycznym. Wiskozymetr ten jest zwykle zanurzony w łaźni o stałej temperaturze, co pozwala na wyznaczenie krzywych płynięcia dla różnych wartości temperatury.

Lepkość pozorna cieczy nieniutonowskiej, jest określana dla naprężenia stycznego równego co do wartości liczbowej średniej arytmetycznej naprężeń działających na ściankach cylindrów. Na tej podstawie wykreśla się krzywą płynięcia cieczy w sposób przedstawiony na rys.3.



Rys.3. Wykreślanie krzywej płynięcia cieczy nieniutonowskiej i sposób określenia jej współczynnika lepkości pozornej

Średnie wartości prędkości i naprężenia ścinające wyrażają równania

$$\varphi = \frac{2 r_1 r_2 \omega}{r_2^2 - r_1^2}, \quad (4)$$

$$\tau = \frac{M}{2 \pi r_1 r_2 h}, \quad (5)$$

skąd

$$\frac{\tau}{\varphi} = \eta_p = \frac{(r_2^2 - r_1^2) M}{4 \pi r_1^2 r_2^2 h \omega}, \quad (6)$$

gdzie (zgodnie z oznaczeniami na rys. 2):

r_1, r_2 - promienie cylindra obracającego się i nieruchomego, m;

h - wysokość warstwy cieczy pomiędzy cylindrami, m;

ω - prędkość kątowa cylindra ruchomego, 1/s;

M - moment oporowy przenoszony na cylinder nieruchomy, N-m;

η_p - współczynnik lepkości pozornej, Pa·s.

Ponieważ dla cylindrów o określonych wymiarach, równania (4), (5) i (6) można zapisać jako

$$\varphi = C_1 \omega, \quad (7)$$

$$\tau = C_2 M, \quad (8)$$

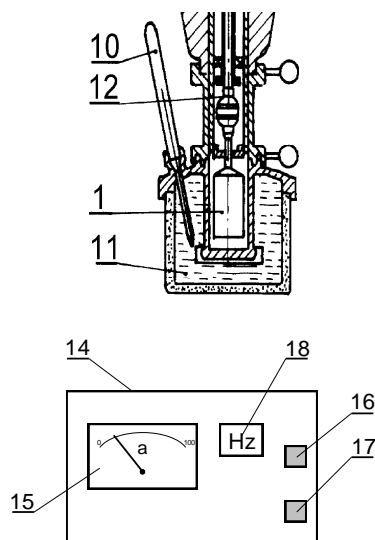
$$\eta_p = C_3 \frac{M}{\omega}, \quad (9)$$

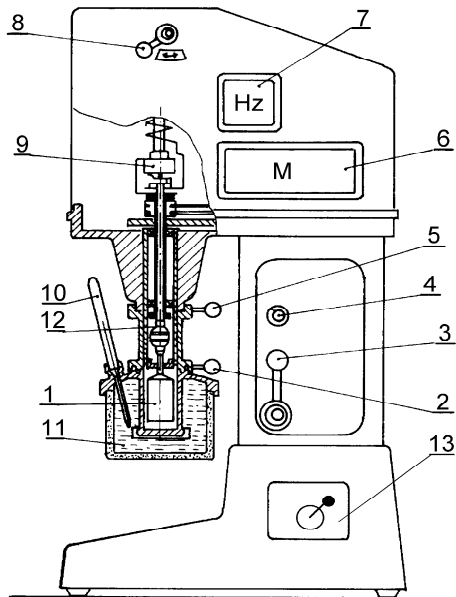
gdzie: C_1, C_2, C_3 - stałe przyrządu,

pomiary sprowadzają się do odczytu wskazań dynamometru skrętnego, przy ściśle określonej (zależnej od wybranego przełożenia układu napędowego) prędkości ścinania.

3. OPIS STANOWISKA LABORATORYJNEGO

Stanowisko pomiarowe stanowi wiskozymetr rotacyjny Rheotest 2 o wirujących współosiowych cylindrach. Schemat budowy przyrządu przedstawiono na rys. 4. W jego skład wchodzi układ dwóch cylindrów, z których jeden (1) jest połączony sprzęgłem (12) z układem napędowym i może się obracać, natomiast drugi jest połączony mechanizmem (5) z korpusem wiskozymetru. Na zewnątrz nieruchomego cylindra zewnętrznego montowana jest mechanizm (2) łaźnia termostatyczna wypełniona cyrkulującą cieczą (11). Obrotowy cylinder wewnętrzny napędzany jest synchronicznym silnikiem elektrycznym za pośrednictwem dwustopniowej przekładni głównej i dwunastostopniowej przekładni pomocniczej. Przełożenie przekładni głównej można zmieniać dźwignią (13) (zakres a i b), przełożenie przekładni pomocniczej dźwignią (3), przy czym numer wybranego położenia odczytywany jest na wskaźniku (4). Moment oporowy, który w trakcie pomiaru działa na obracający się cylinder, mierzony jest dynamometrem skrętnym (9) o dwóch zakresach pomiarowych zmienianych dźwignią (8) (zakres I i II), przy czym sygnał mechaniczny zmieniany jest na elektryczny w układzie pomiarowym (6). Wartość uzyskiwanego sygnału można odczytać na mierniku (15), wyskalowanym w bezwymiarowych jednostkach (od 0 do 100 działek).





Rys. 4 . Schemat budowy wiskozymetru Rheotest 2

1 - obrotowy cylinder wewnętrzny, 2 - dźwignia mechanizmu łączenia termostatu, 3 - dźwignia przekładni wielostopniowej, 4 - wskaźnik bieżącego położenia, 5 - dźwignia mechanizmu łączenia zewnętrznego cylindra nieruchomego, 6 - układ pomiaru momentu oporowego, 7 - silnik elektryczny synchroniczny, 8 - dźwignia zmiany zakresu pomiarowego, 9 - dynamometr skrętny, 10 - termometr, 11 - ciecz termostatyczna, 12 - sprzęgło cylindra obrotowego, 13 - dźwignia położenia przekładni głównej, 14 - panel sterowania, 15 - skala pomiarowa, 16 - włącznik napędu cylindra wewnętrznego, 17 - włącznik pomiaru momentu oporowego, 18 - miernik częstotliwości prądu zasilającego.

Miernik ten zamontowany jest na panelu sterowania (14), stanowiącym odrębną część przyrządu. Na panelu tym znajduje się również miernik częstotliwości prądu elektrycznego (18) oraz wyłączniki elektryczne silnika (16) i układu pomiarowego momentu oporowego (17). Wiskozymetr wyposażony jest w zestaw wymiennych cylindrów oznaczonych jako: N, S1, S2, S3, H dla wewnętrznych cylindrów obrotowych oraz S i H dla zewnętrznych cylindrów nieruchomych. Powyższe oznaczenia są wybite na powierzchni tych elementów. Pomiar z zastosowaniem danego układu cylindrów mogą być prowadzone przy 24 prędkościach obrotowych cylindra wewnętrznego, przy czym wartość prędkości ścinania, w zależności od rodzaju cylindra i wybranego przełożenia, określa się na podstawie danych zawartych w tabeli 1.

Tabela 1

Wartości prędkości ścinania w zależności od wybranego przełożenia przekładni głównej i pomocniczej oraz rodzaju cylindra obrotowego

Wybrane przełożenie przekładni głównej (a ÷ b) i pomocniczej (1 ÷ 12)		Prędkość ścinania, v /s, przy stosowaniu cylindra		
zakres - a	zakres - b	S1, N	S2	S3, H
	1	1,5	0,5	0,1667
	2	2,7	0,9	0,3
1		3,0	1,0	0,3333
	3	4,5	1,5	0,5
2		5,4	1,8	0,6
	4	8,1	2,7	0,9
3		9,0	3,0	1,0
	5	13,5	4,5	1,5
4		16,2	5,4	1,8
	6	24,3	8,1	2,7
5		27,0	9,0	3,0
	7	40,5	13,5	4,5
6		48,6	16,2	5,4
	8	72,9	24,3	8,1
7		81,0	27,0	9,0
	9	121,5	40,5	13,5
8		145,8	48,6	16,2
	10	218,7	72,9	24,3
9		243,0	81,0	27,0
	11	364,5	121,5	40,5
10		437,4	145,8	48,6
	12	656,0	218,7	72,9
11		729,0	243,0	81,0
12		1312,0	437,4	145,8

W tabeli 2 podano natomiast wartości stałych dynamometru w zależności od wybranego układu cylindrów oraz stosowanego zakresu pomiarowego dynamometru.

Naprężenia ścinające wyznaczać należy z równania

$$\tau = z \alpha \quad (10)$$

w którym: z - stała dynamometru wg tabeli 2,
 α - wskazanie miernika wychyłowego przyrządu (15), rys. 4.

Tabela 2

Wartości stałej dynamometru skrętnego

Wybrany układ cylindrów wiskozymetru	Stała z N/(m ² -działka), dla wybranego zakresu pomiarowego dynamometru	
	I	II
N / N	0,315	3,08
S / S1	0,569	5,55
S / S2	0,577	5,67
S / S3	0,750	7,49
H / H	2,760	27,53

Lepkość badanej próbki cieczy jest natomiast wyznaczana na podstawie zależności

$$\eta_p = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = \frac{z\alpha}{\dot{\gamma}} 10^{-3} \quad \text{Pa}\cdot\text{s} \quad (11)$$

gdzie: z , α - jak w równaniu (10);
 $\dot{\gamma}$ - prędkość ścinania wg tabeli 1.

4. METODYKA PROWADZENIA POMIARÓW

W celu przeprowadzenia pomiarów właściwości reologicznych próbki cieczy za pomocą wiskozymetru Rheotest 2 należy:

- w zależności od spodziewanej lepkości badanej cieczy, dobrać układ cylindrów pomiarowych;
- zamontować cylinder obrotowy na wrzecionie wiskozymetru, wykorzystując w tym celu sprzęgło (12);
- napełnić wnętrze cylindra nieruchomego próbką badanej cieczy (ok. 100ml), a następnie przy użyciu dźwigni (5) zamontować go na korpusie przyrządu;
- dźwignią (8) wybrać zakres pomiarowy dynamometru, a dźwignią (13) przełożenie przekładni głównej;
- mechanizmem (2) zamontować łaźnię wodną, włączyć termostat zewnętrzny i kontrolując wskazania termometru (10) ustalić temperaturę pomiaru;

- f) przyciskiem (16) na panelu sterowania włączyć napęd cylindra obrotowego, a przyciskiem (17) wskaźnik wychyłowy dynamometru;
- g) zmieniając dźwignią 3 (bez wyłączania przycisków (16) i (17)) prędkość obrotową cylindra wewnętrznego, dokonać odczytów wskazań wskaźnika wychyłowego przy różnych wartościach prędkości ścinania próbki cieczy;
- h) po zakończeniu pomiarów wyłączyć przyciski (16) i (17), zdemontować łąźnię wodną i cylindry oraz oczyścić je;
- i) wyniki pomiarów każdorazowo notować w tabeli.

Parametry reologiczne cieczy nieniutonowskich				
Rodzaj cieczy:				
Symbol cylindra wewnętrznego:				
Symbol cylindra zewnętrznego:				
Temperatura pomiaru:				
Zakres pomiarowy dynamometru I lub II	Stała dynamometru z	Przełożenie przekładni napędowej a,b / 1÷12	Prędkość ścinania $\dot{\gamma}$	Wskazanie miernika α
-	N/(m ² ·dz)	-	1/s	dz

5. ZAKRES OPRACOWANIA WYNIKÓW

1. Korzystając z równań (10) i (11) wyznaczyć naprężenie ścinające i lepkość cieczy przy różnych wartościach prędkości ścinania.
2. Wykreślić krzywą płynięcia dla badanej cieczy.
3. Wykreślić zależność $\eta_p = f(\dot{\gamma})$.
4. Wyznaczyć metodą najmniejszych kwadratów wartość stałej i wykładnika w potęgowym modelu płynu (równanie (3)) dla badanej cieczy.
5. Podać wnioski z przeprowadzonego ćwiczenia.

6. LITERATURA UZUPEŁNIAJĄCA

- [1] WILKINSON W. L.: Ciecze nieniutonowskie, WNT, W-wa 1963
 [2] KOCH R., NOWORYTA A.: Procesy mechaniczne w inżynierii chemicznej, WNT, W-wa 1992

[3] KEMBŁOWSKI Z.: Reometria płynów nienewtonowskich, WNT,
W-wa 1973

7. TEMATYKA ZAGADNIENÍ KONTROLNYCH

1. Rodzaje cieczy nieniutonowskich.
2. Krzywe płynięcia cieczy nieniutonowskich.
3. Matematyczne modele reologiczne cieczy.
4. Parametry reologiczne cieczy.
5. Budowa i zasada działania wiskozymetrów.

Ćwiczenie 3:

BADANIE OPORÓW PRZEPŁYWU PŁYNÓW W PRZEWODACH

1. CEL ĆWICZENIA

Celem ćwiczenia jest wyznaczenie wartości liniowych i miejscowych oporów przepływu w rurze w zależności od wielkości strumienia przepływającego powietrza oraz określenie współczynników miejscowych oporów przepływu dla różnych elementów armatury i ich długości zastępczych.

2. WIADOMOŚCI WPROWADZAJĄCE

Podczas transportu płynów rurociągami występują zawsze straty ciśnienia płynu. Wartość tych strat rzutuje na zapotrzebowanie energii zużywanej na transport płynów, a tym samym wpływa na wartość kosztów eksploatacyjnych całej instalacji przesyłowej. Na wartość całkowitej straty ciśnienia płynu jednofazowego w przewodzie o stałym przekroju poprzecznym mają wpływ:

- straty ciśnienia związane z liniowymi oporami przepływu, ΔP_l ;
- straty ciśnienia związane z miejscowymi oporami przepływu, ΔP_m ;
- straty ciśnienia związane z różnicą poziomów pomiędzy położeniem wlotu i wylotu płynu z rurociągu, ΔP_h .

Sumaryczną stratę ciśnienia można zatem przedstawić w postaci

$$\Delta P = \Delta P_l + \Delta P_m \pm \Delta P_h \quad (1)$$

2.1. LINIOWE OPORY PRZEPŁYWU ΔP_l

W odniesieniu do płynów nieściśliwych (cieczy), liniowe opory ich przepływu przez rurociąg można wyznaczyć na podstawie równania Darcy-Weisbacha

$$\Delta P_l = \lambda \frac{w^2 \rho}{2} \frac{L}{d}, \quad (2)$$

w którym poszczególne symbole oznaczają:

λ - liczba oporu przepływu;
 w - średnia prędkość przepływu płynu, m/s;
 ρ - gęstość płynu, kg/m³;
 L - długość przewodu, m;
 d - średnica przewodu, m.

W przypadku płynów ściśliwych (gazów), przy stosunkowo małym oporze ich przepływu, równanie (1) przyjmuje postać

$$\Delta P_1 = \lambda \frac{g_T^2}{2} v_m \frac{L}{d} \quad (3)$$

gdzie: g_T - gęstość strumienia masy płynu ściśliwego, kg/(m²· s);
 v_m - objętość właściwa płynu przy średnim ciśnieniu w przewodzie, m³/kg.

W praktyce, przy stosowaniu równań (2) lub (3), najbardziej złożonym zagadnieniem jest wyznaczenie wartości liczby oporu przepływu.

W przypadku przepływu laminarnego ($Re < 2100$) wartość liczby oporu przepływu obliczać należy z równania

$$\lambda = \frac{a}{Re} \quad (4)$$

w którym stała a jest zależna od kształtu przewodu i wynosi dla przekroju:

- kołowego $\rightarrow 64$
- kwadratowego $\rightarrow 57$
- pierścieniowego $\rightarrow 95$
- prostokątnego, przy $h/b = 0,2$ $\rightarrow 76$, przy $h/b = 0,5$ $\rightarrow 62$

Liczba Reynoldsa w równaniu (4) definiowana jest jako

$$Re = \frac{w d_e \rho}{\eta} = \frac{g_T d_e}{\eta} \quad (5)$$

przy czym: η - współczynnik dynamiczny lepkości płynu, Pa·s
 d_e - ekwiwalentna średnica przewodu, m.

W przypadku przepływu turbulentnego, przez rury gładkie, liczbę oporu przepływu można wyznaczyć na podstawie różnych wzorów empirycznych podawanych w literaturze, np. [1].

Najbardziej rozpowszechnione z nich są:

- w zakresie zmian $Re = (2,3 \cdot 10^3 \div 10^5)$ - równanie Blasiusa

$$\lambda = \frac{0,3164}{Re^{0,25}}, \quad (6)$$

- w zakresie $Re > 10^5$ - równanie Nikuradsego

$$\lambda = 0,0032 + \frac{0,221}{\text{Re}^{0,237}} \quad (7)$$

W przypadku turbulentnego przepływu płynu przez przewód o szorstkich ściankach, liczba oporu przepływu zależy także od szorstkości względnej ścian kanału

$$\varepsilon = \frac{k}{d}, \quad (8)$$

gdzie k oznacza średnią wysokość nierówności powierzchni. Wartości liczbowe k można znaleźć w literaturze, np. [2]. W przypadku rur szorstkich liczba oporu przepływu może być wyznaczona np. w oparciu o równanie Colebrooka-White'a

$$\frac{1}{\lambda} = -2 \lg \left(\frac{2,51 \sqrt{\lambda}}{\lambda \text{Re}} + \frac{k}{3,71d} \right) \sqrt{\lambda} \quad (9)$$

lub też na podstawie wykresu znanego szeroko w literaturze, np. [2]

W przypadku przepływu płynu przez rurociąg o przekroju niekołowym lub niepełnym przekrojem kołowym, w miejsce średnicy w równaniach (1), (2) i (5) należy podstawić średnicę ekwiwalentną (tzw. hydrauliczną) przewodu

$$d_e = \frac{4F}{O} \quad (10)$$

gdzie: F - pole przekroju poprzecznego strumienia płynu, m^2 ;
 O - obwód przewodu zwilżany przez płyn, m .

Średnica ekwiwalentna dla przewodów o różnym kształcie przekroju poprzecznego jest równa:

- dla przekroju kołowego o średnicy d $\rightarrow d_e = d$;
- dla przekroju kwadratowego o boku a $\rightarrow d_e = a$;
- dla przekroju prostokątnego o bokach h i b $\rightarrow d_e = \frac{2hb}{h+b}$;
- dla przekroju pierścieniowego o średnicach D i d $\rightarrow d_e = D-d$.

2.2. MIEJSCOWE OPORY PRZEPIYU ΔP_m

Straty energii płynu, wywołane jego ekspansją lub kontrakcją oraz zawirowaniami związanymi ze zmianą przekroju i kierunku przepływu, noszą nazwę miejscowych oporów przepływu.

Opory te występują głównie w miejscach zmiany średnicy przewodu, na kolanach rurociągów i łukach wężownic oraz różnych elementach armatury np. zaworach, zasuwach, kurkach, rozgałęzieniach itp. Wartość miejscowych oporów przepływu można wyznaczyć na podstawie zależności

$$\Delta P_m = \xi \frac{w^2 \rho}{2}, \quad (11)$$

w której ξ określane jest mianem liczby oporu miejscowego.

Wartości liczby oporu miejscowego (wyznaczanej eksperymentalnie) są funkcją kształtu danego elementu rurociągu. Niekiedy wartość ξ uzależniona jest również od charakteru przepływu płynu przez dany element. Charakter ten określany jest na podstawie wartości liczby Reynoldsa. Wartości liczby oporu przepływu dla różnego rodzaju elementów armatury szeroko podaje literatura, np. [2], przy czym należy zwrócić uwagę na sposób określania prędkości występującej w równaniach (5) i (11).

Niekiedy, w celu upodobnienia oporów miejscowych do liniowych, wprowadza się pojęcie zastępczej długości rury dla oporu miejscowego. Wielkość ta oznacza taką długość poziomej rury prostoosiowej w której przepływający płyn wywołuje opory liniowe równe co do wartości oporom miejscowym w rozpatrywanym elemencie rurociągu.

Porównując zależności (2) i (11) otrzymuje się

$$\xi = \lambda \frac{L}{d}, \quad (12)$$

a zatem można zdefiniować zastępczą długość rury dla oporu miejscowego jako

$$L_z = \frac{\xi}{\lambda} d. \quad (13)$$

Wartości L_z podaje literatura, np. [2], a przy wykorzystaniu tej wielkości, sumę oporów liniowych i miejscowych dla danego rurociągu można zapisać w postaci

$$\Delta P_{l+m} = \lambda \frac{w^2 \rho}{2} \frac{L + \sum L_z}{d}. \quad (14)$$

2.3. STRATY CIŚNIENIA ZWIĄZANE Z RÓŻNICĄ POŁOŻENIA WŁOTU I WYŁOTU RUROCIĄGU ΔP_h

W przypadku rurociągu którego wlot i wylot różnią się poziomem położenia, różnica ciśnienia płynu na obu jego końcach jest związana również z jego ciśnieniem hydrostatycznym. Można zatem napisać

$$\Delta P_h = \rho \mathcal{G} h, \quad (15)$$

gdzie: ρ - gęstość płynu, kg/m^3 ;

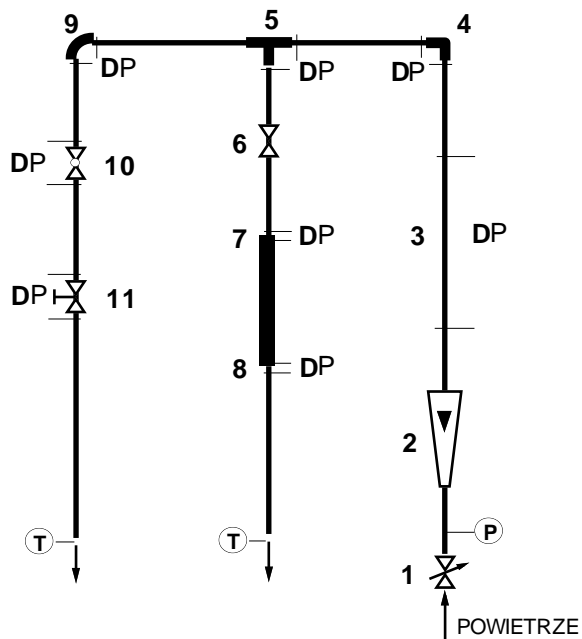
\mathcal{G} - przyspieszenie ziemskie, m/s^2 ;

h - różnica poziomów między wlotem a wylotem z przewodu, m.

O ile wartość ΔP_h jest istotna w przypadku przepływu cieczy, o tyle przy transporcie gazów zwykle jest pomijana jako mała w stosunku do sumy liniowych i miejscowych strat ciśnienia.

3. OPIS STANOWISKA LABORATORYJNEGO

W omawianym ćwiczeniu, pomiary liniowych i miejscowych oporów przepływu powietrza prowadzone są na stanowisku przedstawionym schematycznie na rys. 1.



Rys. 1. Schemat stanowiska pomiarowego.

1 - zawór regulacyjny, 2 - rotametr, 3 - prostoosiowy odcinek pomiarowy, 4 - kolano ostrokątne 90°, 5 - trójnik, 6 - zawór odcinający, 7 - skokowe zwiększenie przekroju rury, 8 - skokowe zmniejszenie przekroju rury, 9 - kolano łukowe 90°, 10 - zawór kulowy, 11 - zawór grzybkowy, T - termometr termo-elektryczny, P - manometr sprężynowy

Stanowisko wykonano ze stalowej ocynkowanej rury o średnicy wewnętrznej 22 mm, na której zamontowano różne elementy wywołujące miejscowe opory przepływu. Czynnikiem przepływającym przez instalację jest powietrze którego strumień, po przejściu przez zawór regulacyjny (1) jest mierzony rotametrem (2). Po przejściu przez rotametr powietrze przepływa

przez poszczególne elementy instalacji, na których za pomocą manometrów U - rurkowych wypełnionych wodą, mierzone są opory przepływu.

Poszczególne miejsca pomiarowe stanowią:

- prostoosiowy odcinek rury o długości 1m, (3);
- kolano ostrokątne 90°, (4);
- trójkąt, (5);
- skokowe zwiększenie przekroju rury, (7);
- skokowe zmniejszenie przekroju rury, (8);
- kolano łukowe 90°, (9);
- zawór kulowy, (10);
- zawór grzybkowy, (11).

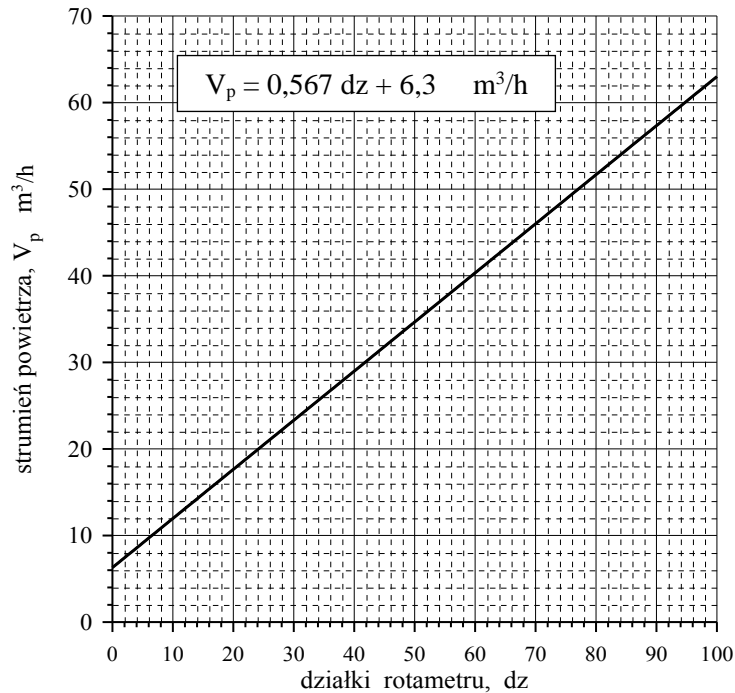
Przepływ przez elementy (3), (4), (5), (7) i (8), realizowany jest przy zamkniętym zaworze (10), a przez elementy (9), (10) i (11) przy zamkniętym zaworze (6). Temperatura powietrza mierzona jest termometrem termoelektrycznym T na wypływie gazu z instalacji. Manometr sprężynowy P umożliwia pomiar nadciśnienia powietrza na wlocie do instalacji. Średnie ciśnienie gazu równe jest w przybliżeniu

$$P_{\text{śr}} = P_{\text{ot}} + \frac{P}{2}, \quad (16)$$

gdzie: P_{ot} - ciśnienie atmosferyczne wskazywane przez barometr, Pa;

P - nadciśnienie wskazywane przez manometr sprężynowy, Pa.

Charakterystykę rotametu powietrza przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Charakterystyka rotametru powietrza

4. METODYKA PROWADZENIA POMIARÓW

W celu przeprowadzenia pomiarów oporów przepływu należy:

- otworzyć zawór odcinający dopływ powietrza z instalacji sprężonego powietrza;
- zamknąć zawór kulowy (10) i otworzyć zawór odcinający (6);
- za pomocą zaworu regulacyjnego (1) ustalić określony strumień powietrza mierzony rotametrem (2);
- odczytać wskazania manometrów U-rurkowych podłączonych do elementów (3), (4), (5), (7) i (8);
- powtarzać czynności wymienione w pkt. c) i d) zmieniając strumień powietrza wg założonego kroku do osiągnięcia jego wartości końcowej;
- zamknąć zawór odcinający (6) i częściowo otworzyć zawór kulowy (10);
- zmieniając strumień powietrza wg ustalonego kroku dokonywać odczytów oporów przepływu występujących na elementach (9), (10) i (11);
- wyniki każdorazowo notować w tabeli.

Badanie oporów przepływu płynu przez rurociąg

Temperatura powietrza: °C									
Średnica przewodu: 3/4 ”									
Strumień powietrza		Opór przepływu mierzony na elemencie							
działki rotametry	nadciśnienie na zasilaniu	(3)	(4)	(5)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
-	kPa	mm H ₂ O	mm H ₂ O	mm H ₂ O	mm H ₂ O	mm H ₂ O	mm H ₂ O	mm H ₂ O	mm H ₂ O
10									
20									
...									

5. ZAKRES OPRACOWANIA WYNIKÓW POMIARÓW

- Wykreślić charakterystyki oporów przepływu w funkcji strumienia powietrza dla wszystkich mierzonych elementów.
- Traktując rurę jako hydraulicznie gładką ($k \approx 0$) wykreślić dla jej prostoosiowego odcinka pomiarowego funkcję $\lambda_{zm} = f(Re)$ i porównać jej przebieg z przebiegiem linii opisanej przy wykorzystaniu równań (4), (6) lub (7). Wartość λ_{zm} wynika z prostego przekształcenia równania (2)

$$\lambda_{zm} = \frac{2 \Delta P_{zm} d}{g_T^2 v_m L}$$

- Wykorzystując przekształcone równanie (11), wykreślić charakterystyki $\xi_{zm} = f(Re)$ dla elementów instalacji wywołujących miejscowe opory przepływu

$$\xi_{zm} = \frac{2 \Delta P_{zm}}{w^2 \rho}$$

Prędkość w powyższym równaniu należy liczyć dla średnicy 22mm.

- Wykorzystując zależność

$$L_z = \frac{\Delta P_{zm,(i)}}{\Delta P_{zm,(3)}}$$

gdzie: $i = 4 \div 11$ - poszczególne elementy instalacji wywołujące opory miejscowe

wyznaczyć zastępcze długości odcinków prostoosiowych dla poszczególnych elementów armatury; uśredniając otrzymane wyniki.

- Podać wnioski z przeprowadzonego ćwiczenia.

6. LITERATURA UZUPEŁNIAJĄCA

- [1] KOCH R., NOWORYTA A.: Procesy mechaniczne w inżynierii chemicznej, WNT W-wa 1992
- [2] TRONIEWSKI L. i inni: Tablice do obliczeń procesowych, Skrypt PO nr 189, Opole 1996

7. TEMATYKA ZAGADNIENÍ KONTROLNYCH

1. Przyczyny występowania strat ciśnienia płynu podczas przepływu.
2. Wielkości od których zależy wartość liniowych oporów przepływu.
3. Wielkości od których zależy wartość miejscowych oporów przepływu.
4. Zastępcza długość rurociągu dla oporów miejscowych.
5. Wpływ właściwości fizycznych płynów na ich opory przepływu.

Ćwiczenie 4:

OPORY PRZEPŁYWU PŁYNU W PRZESTRZENI MIĘDZYRUROWEJ WYMIENNIKA CIEPŁA

1. CEL ĆWICZENIA

Celem ćwiczenia jest eksperymentalne wyznaczenie oporów przepływu gazu przez przestrzeń międzyrurową płaszczowo-rurowego wymiennika ciepła z przegrodami segmentowymi.

2. WIADOMOŚCI WPROWADZAJĄCE

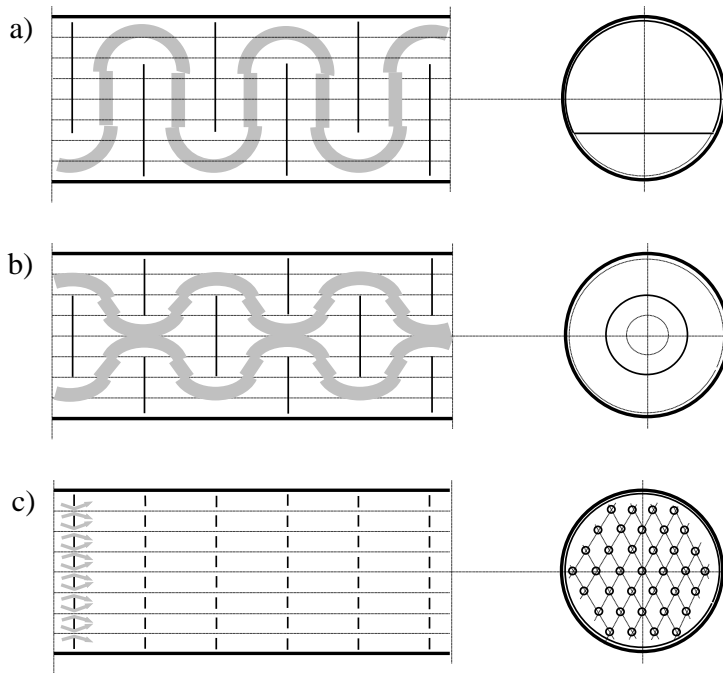
Jednym ze sposobów intensyfikacji wnikania ciepła w płaszczowo-rurowych rekuperatorach jest montaż przegród w przestrzeni międzyrurowej. Rozwiązanie takie jest celowe głównie wtedy, gdy współczynnik wnikania ciepła po stronie płynu przepływającego przez przestrzeń międzyrurową jest zdecydowanie mniejszy od współczynnika wnikania ciepła wewnątrz samych rurek, którymi przepływa drugi z płynów wymieniających ciepło. Istota działania przegród, ustawionych prostopadle do osi wzdłużnej wymiennika ciepła, polega z jednej strony na zmianie kierunku przepływu płynu względem rurek, z drugiej zaś na zmniejszeniu pola wolnego przekroju dla jego przepływu, a tym samym zwiększeniu jego prędkości, czyli burzliwości przepływu. Zwiększenie burzliwości strugi przepływającego płynu wpływa bowiem korzystnie na wymianę ciepła na drodze wnikania.

Przegrody wykonuje się z cienkiej blachy i umieszcza prostopadle do kierunku przepływu płynu. Montuje się je zwykle na ściągach łączących przeciwległe ściany sitowe. Na ściągi te (pręty stalowe) nakładane są tuleje dystansowe, pomiędzy którymi w odpowiedniej odległości od siebie, umiejscawia się przegrody. Inną metodą montażu przegród jest ich punktowe spawanie z rurami.

Jako typowe rozwiązania konstrukcyjne przegród należy wymienić:

- Przegrody segmentowe. W przypadku ich stosowania, przepływ płynu odbywa się w przestrzeniach pomiędzy kolejnymi przegrodami oraz w przestrzeni pomiędzy przegrodą a płaszczem aparatu, rys.1 a).

- Przegrody współśrodkowe. W przypadku tych przegród płyn przepływa kolejno przez otwory w przegrodach i przestrzeń pomiędzy przegrodą a płaszczem aparatu rys.1 b);
- Przegrody sitowe. Przy tym rozwiązaniu konstrukcyjnym płyn przepływa przez szczeliny pomiędzy rurkami a krawędziami otworów wykonanych w przegrodzie, rys.1 c).



Rys. 1. Rozwiązania konstrukcyjne przegród

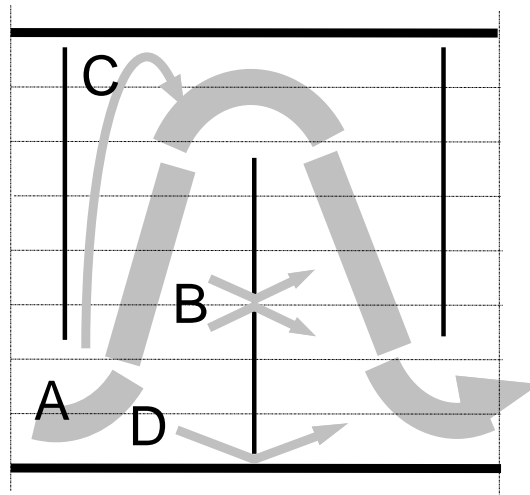
a) przegrody segmentowe, b) przegrody współśrodkowe, c) przegrody sitowe

Przegrodami najczęściej stosowanymi w praktyce są przegrody segmentowe, co wynika między innymi z małych kosztów ich wykonania i montażu. Podstawową funkcją przegród segmentowych jest wywołanie przepływu krzyżowego (prostopadłego do rur). Montaż i konserwacja wymiennika ciepła wymaga jednak obecności luzów i nieszczelności. Płyn przepływający przez owe szczeliny zmienia swoją prędkość oraz częściowo omija powierzchnię wymiany ciepła. Zjawiska powyższe znacznie komplikują przepływ w przestrzeni międzyrurkowej.

Wyróżnia się trzy rodzaje nieszczelności w wymiennikach płaszczowo-rurowych, związanych z zastosowaniem przegród segmentowych:

- nieszczelność między rurą a otworem w przegrodzie,
- nieszczelność między wiązką rur a płaszczem,
- nieszczelność między przegrodą a płaszczem.

Całkowity strumień płynu przepływającego w przestrzeni międzyrurowej można zatem podzielić na pewną liczbę odrębnych strumieni częściowych, rys.2.



Rys.2. Rozdział strumienia płynu w przestrzeni wymiennika ciepła z przegrodami segmentowymi

W szczególności wyróżnić można:

- Strumień A - opływa krzyżowo wiązkę rur między kolejnymi oknami przegród i jest uważany jako w pełni efektywny w przenoszeniu ciepła.
- Strumień B - przepływa przez pierścieniowe prześwitki między rurami i otworami w przegrodach.
- Strumień C - opływa wiązkę rur przez pierścieniowe przestrzenie między rurami leżącymi na obwodzie całej wiązki i płaszczem, a następnie przepływa przez kolejne okna przegród.
- Strumień D - przepływa przez prześwitki między krawędzią przegrody i płaszczem. Jest najmniej efektywny dla wymiany ciepła.

Dla poprawy efektywności działania przegród należy dążyć do minimalizacji wielkości strumieni B, C i D, m.in. poprzez stosowanie odpowiednich uszczelnień.

Aczkolwiek stosowanie przegród zwiększa intensywność wymiany ciepła w wymienniku, a tym samym zmniejsza jego powierzchnię, czyli gabaryty, to jednak wprowadzenie przegród wywołuje zwiększenie oporów przepływu

pływu przez przestrzeń międzyrurową. To zwiększenie oporów wpływa na zwiększenie zapotrzebowania mocy urządzeń przetłaczających płyn. Można zatem stwierdzić, że stosowanie przegród zmniejsza koszty budowy aparatu, zwiększa natomiast koszty energii zużywanej do tłoczenia jednego z płynów. Ocena kosztów eksploatacyjnych wymaga dysponowania sposobem obliczania oporów przepływu przez przestrzeń międzyrurową wymiennika z przegrodami.

W przypadku wymienników bez przegród, w których przepływ odbywa się równoległe do rurek, do wyznaczenia oporów przepływu można z pewnym przybliżeniem zastosować równanie Darcy-Weisbacha

$$\Delta P = \lambda \frac{w^2 \rho L}{2 d_e} \quad (1)$$

w którym: λ - liczba oporu przepływu, -;
 w - prędkość przepływu czynnika, m/s;
 ρ - gęstość czynnika, kg/m³;
 L - długość wymiennika, m;
 d_e - średnica ekwiwalentna, m

Sposób określania poszczególnych wielkości występujących w równaniu (1) opisano w instrukcji do ćwiczenia nr 3, (str. 43). Wypada jedynie podać, że ekwiwalentną średnicę kanału (przestrzeni międzyrurowej) wyznaczyć należy w tym przypadku z równania

$$d_e = \frac{D^2 - n d^2}{D + n d} \quad (2)$$

w którym: D - wewnętrzna średnica płaszcza wymiennika, m;
 d - zewnętrzna średnica rurek, m;
 n - liczba rurek, szt.

Metoda obliczania oporów przepływu z wykorzystaniem równania (1) obowiązuje jednak jedynie dla przepływów izotermicznych i nie uwzględnia oporów miejscowych związanych z wlotem i wylotem płynu z aparatu. Miejscowe opory przepływu płynu można oszacować przyjmując, że w miejscach ich występowania następuje gwałtowna zmiana pola przekroju i kierunku przepływu. Wartości liczby oporu miejscowego dla takich przypadków, podaje literatura, np. [1].

Dla wyznaczania oporów przepływu w przestrzeni międzyrurowej z zamontowanymi przegrodami, literatura podaje wiele zależności. Jedną z prostszych jest metoda Kerna, według której całkowity opór izotermicznego przepływu płynu w przestrzeni międzyrurowej wymiennika zaopatrzonego w przegrody segmentowe określony jest równaniem

$$\Delta P = \lambda(N + 1) \frac{w_h^2 \rho D}{2 d_e}, \quad (3)$$

w którym: N - liczba przegród, szt.;
 ρ - gęstość czynnika, kg/m³;
 D - wewnętrzna średnica płaszczki wymiennika, m;
 d_e - średnica ekwiwalentna liczona wg (2), m;
 λ - liczba oporu przepływu, - ;
 w_h - prędkość płynu między przegrodami, m/s.

Liczba oporu przepływu w równaniu (3) jest funkcją liczby Reynoldsa zdefiniowanej jako

$$Re = \frac{g_o d_e}{\eta}, \quad (4)$$

gdzie: g_o - pozorna gęstość strumienia masy płynu, liczona tak jak gdyby przegród nie było, kg/(m²·s);
 d_e - średnica ekwiwalentna wg (2), m;
 η - współczynnik dynamiczny lepkości, Pa·s.

Wartości funkcji $\lambda=f(Re)$ dla tego przypadku podano w tabeli 1.

Tabela 1

Wartość liczby oporu przepływu w równaniu (3)

Re	λ	Re	λ	Re	λ
10	6,18	$5 \cdot 10^2$	0,532	$3 \cdot 10^4$	0,242
20	3,02	10^3	0,475	$5 \cdot 10^4$	0,230
30	2,16	$2 \cdot 10^3$	0,427	10^5	0,201
50	1,58	$3 \cdot 10^3$	0,388	$2 \cdot 10^5$	0,173
10^2	0,862	$5 \cdot 10^3$	0,345	$3 \cdot 10^5$	0,158
$2 \cdot 10^2$	0,677	10^4	0,316	$5 \cdot 10^5$	0,144
$3 \cdot 10^2$	0,603	$2 \cdot 10^4$	0,259	10^6	0,130

Prędkość płynu między przegrodami dla potrzeb wykorzystania równania (3) powinna być liczona dla przekroju pomiędzy rurkami na średnicy wymiennika, czyli dla powierzchni tego przekroju

$$F_h = h (D - n_o d), \quad (5)$$

gdzie: h - odległość między sąsiednimi przegrodami, m;
 D - wewnętrzna średnica wymiennika, m;
 n_o - liczba rur w rzędzie na średnicy wymiennika, szt.;
 d - średnica zewnętrzna rurek, m;

a zatem prędkość

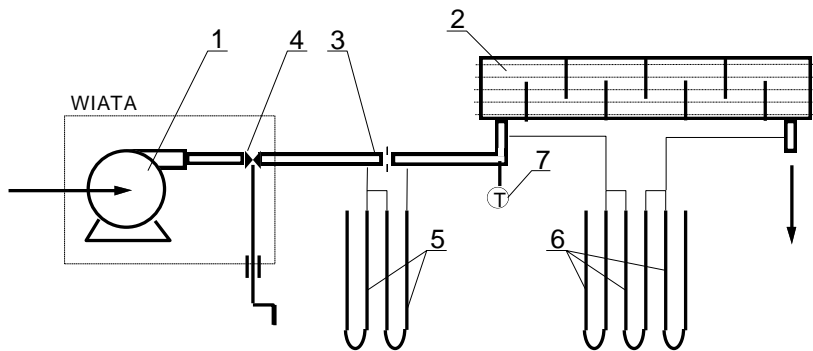
$$w_h = \frac{V}{F_h}, \quad (6)$$

gdzie: V - strumień płynu w przestrzeni międzyrurowej, m^3/s .

Korelacja (3) została ustalona dla przegród segmentowych mających wycięcia o strzałce $H=0,25 D$ (tzw. przegrody 25 procentowe).

3. OPIS STANOWISKA POMIAROWEGO

Schemat stanowiska do badań oporów przepływu w przestrzeni międzyrurowej wymiennika ciepła przedstawiono na rys. 3. Instalacja badawcza składa się z trzech zasadniczych elementów: wentylatora (1), wymiennika ciepła (2) oraz układu pomiarowego strumienia powietrza (odcinek rurociągu) (3).



Rys.3. Schemat stanowiska pomiarowego

1- wentylator, 2-badany wymiennik ciepła, 3- rurociąg z kryzą ISA, 4 - zasuwę regulacyjną, 5, 6 - manometry U-rurkowe, 7- termometr.

W celu uniknięcia nadmiernego hałasu w hali laboratoryjnej, tłoczony powietrze wentylator (1) został ustawiony w przylegającej do niej wiacie. Do regulacji strumienia gazu wykonano zasuwę (4), umieszczoną na wylocie powietrza z wentylatora. Płynna zmiana strumienia możliwa jest dzięki drążkowi sterującemu, którego zakończenie znajduje się w hali laboratoryjnej. Tłoczone powietrze przechodzi przez rurociąg (3), wykonany z rury o średnicy 80 mm, a następnie przez gumowy rękaw trafia do wymiennika (2). Do pomiaru strumienia gazu służy kryza pomiarowa ISA. Nadciśnienie powietrza przed kryzą oraz strata ciśnienia na kryzie mierzone są dwuramiennymi manometrami różnicowymi (tzw. U-rurkami) (5). Także strata ciśnienia płynu

w wymienniku ciepła mierzona jest przy wykorzystaniu manometrów 6 tego samego typu. Termometr (7) pozwala zmierzyć temperaturę powietrza w rurociągu.

Umieszczony na stojaku wymiennik ciepła składa się z czterosegmentowego płaszczu o średnicy $D = 252$ mm oraz wymiennych wkładów rurowych. Długość aparatu może być regulowana poprzez zestawienie odpowiednich segmentów, których długości wynoszą: dwa segmenty skrajne o długości $L=2D$ każdy, dwa segmenty wewnętrzne, jeden o długości $L=2D$ oraz drugi o długości $L=3D$.

Dysponując wymienionymi segmentami można uzyskać następujące długości aparatu:

- 4 $D \approx 1$ m (z segmentami skrajnymi),
- 6 $D \approx 1,5$ m (z krótszym segmentem środkowym),
- 7 $D \approx 1,75$ m (z dłuższym segmentem środkowym),
- 9 $D \approx 2,25$ m (z wszystkimi segmentami).

W skrajnych segmentach umieszczono trzy pary króćców o średnicy wewnętrznej 80, 100, 120 mm, rozmieszczone na obwodzie co 120° . Połączenie poszczególnych segmentów za pomocą złączy kołnierzo-śrubowych umożliwia dowolne ustawianie względem siebie króćców: wlotowego i wylotowego. Odległość osi króćców dla poszczególnych długości wymiennika wynosi odpowiednio: 760, 1260, 1510, 2010 mm. Króćce nie biorące udziału w pomiarze zaślepione są pokrywami i wypełnione drewnianymi tłokami o odpowiednio ukształtowanych powierzchniach czołowych, co zapewnia wyrównanie powierzchni wewnętrznej płaszczu. Wymiennik wyposażono w trzy wymienne wkłady rurowe o różnej liczbie i średnicy rurek rozmieszczonych z różną podziałką, (tabela 2).

Tabela 2

Charakterystyka wkładów rurowych

Wkład rurowy	Liczba rurek szt.	Średnica rurek mm	Podziałka mm
I	61	20	26
II	37	25	32
III	19	38	48

Długość każdego z wkładów wynosi 2368 mm, a wyposażone są one w przegrody segmentowe 25% - owe. Ustalenie położenia przegród odbywa się za pomocą obejm i zacisków mocujących o specjalnej konstrukcji. Budowa wymiennika umożliwia jego demontaż, co jest konieczne dla wymiany przegród oraz zmiany długości aparatu. Rurki z jednej strony zostały połączone z dnem sitowym w sposób nierozłączny a z drugiej umocowano je w podwójnym dnie

sitowym w sposób rozłączny. Szczelność tego połączenia zapewnia gumowa tarcza z otworami na rurki.

Powietrze do przestrzeni międzyrurowej wymiennika ciepła tłoczone jest za pomocą wentylatora promieniowego. Strumień powietrza mierzony jest przy wykorzystaniu kryzy pomiarowej ISA zamontowanej na rurociągu tłoczonym. Stanowisko wyposażone jest w zestaw czterech kryz, których charakterystykę przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3

Charakterystyka kryz pomiarowych ISA

Nr kryzy	Moduł kryzy	Średnica otworu przepływowego, mm
1	0,30	43,8
2	0,23	38,4
3	0,18	34,0
4	0,10	25,3

Strumień objętości powietrza przepływającego przez kryzę wyznacza się na podstawie zależności

$$V_p = \alpha \varepsilon \frac{\pi d_k^2}{4} \sqrt{\frac{2 \Delta P_k}{\rho}} \quad (7)$$

gdzie: α - liczba przepływu dla kryzy = $f(m, Re_k)$
 ε - liczba ekspansji gazu = $f(\kappa, m)$
 d_k - średnica otworu przepływowego kryzy, m;
 ΔP_k - ciśnienie różnicowe mierzone na kryzie, Pa;
 ρ - gęstość gazu przed kryzą, kg/m^3 .
 m - moduł kryzy, -;
 κ - wykładnik adiabaty, dla powietrza $\kappa = 1,4$;
 Re_k - liczba Reynoldsa dla powietrza w otworze przepływowym kryzy, -.

Wartości α i ε podawane są w literaturze, np. [1], zwykle w postaci wykresów.

4. METODYKA PROWADZENIA POMIARÓW

W celu przeprowadzenia badań oporów przepływu powietrza przez przestrzeń międzyrurową wymiennika ciepła zaopatrzonego w przegrody segmentowe należy:

- ustalić liczbę segmentów wymiennika, rodzaj zamontowanego wkładu rurowego, liczbę i rozmieszczenie przegród segmentowych oraz numer kryzy pomiarowej;

- b) w razie potrzeby dokonać wymiany elementów wymienionych w pkt. a) i sprawdzić jakość uszczelnień;
- c) sprawdzić poziom cieczy w rurkach manometrycznych i ewentualnie dokonać ich uzupełnienia;
- d) włączyć wentylator przyciskiem na szafce sterującej;
- e) korbą zasuwę regulacyjnej ustalić strumień powietrza przepływającego przez wymiennik;
- f) dokonać odczytu i zanotować wartości ciśnienia wskazywane przez U-rurki, oraz temperaturę powietrza;
- g) powtórzyć czynności wg punktów e) i f) dla innych strumieni powietrza;
- h) wyniki pomiarów notować w tabeli;
- i) po zakończeniu pomiarów wyłączyć wentylator przyciskiem na szafce sterującej.

Opory przepływu powietrza w przestrzeni międzyrurowej wymiennika ciepła						
Średnica płaszczu wymiennika : $D=252$ mm						
Długość wkładu rurowego : $L = \dots\dots\dots$ m						
Średnica zewnętrzna rurek : $d = \dots\dots\dots$ mm						
Liczba rur : $n = \dots\dots$ szt						
Liczba rur na średnicy wymiennika : $n_0 = \dots\dots$ szt						
Rodzaj przegród : segmentowe 25%-owe						
Liczba przegród : $N = \dots\dots$ szt						
Odległość między przegrodami : $h = \dots\dots\dots$ m						
Odległość między króćcami : $L_1 = \dots\dots\dots$ m						
Średnica króćców : $D_k = \dots\dots$ m						
Usytuowanie króćców względem siebie: $\dots\dots\dots$ °						
Numer kryzy pomiarowej: $\dots\dots\dots$						
Ciśnienie powietrza przed kryzą mm H ₂ O	Różnica ciśnienia na kryzie mm H ₂ O	Temp. powietrza °C	Strumień powietrza m ³ /s	Ciśnienie powietrza w króćcach		Spadek ciśnienia w wymienniku mm H ₂ O
				wlot mm H ₂ O	wylot mm H ₂ O	

5. ZAKRES OPRACOWANIA WYNIKÓW

1. Sporządzić charakterystykę zmian zmierzonych oporów przepływu w zależności od wartości strumienia powietrza.
2. Obliczyć wartości oporów przepływu wg równania (3) dla wymiennika z przegrodami.

3. Obliczyć wartości oporów przepływu wg równania (1) czyli przy założeniu braku przegród w wymienniku.
4. Sporządzić wykres obrazujący zmianę stosunku wartości oporów przepływu wyznaczonych wg pkt. 2 i 3 w zależności od wielkości strumienia powietrza.
5. Na podstawie wykresu zbudowanego wg punktu 4 dokonać oceny wpływu przegród na opory przepływu powietrza przez przestrzeń międzyrurową.
6. Podać wnioski z przeprowadzonego ćwiczenia.

6. LITERATURA UZUPEŁNIAJĄCA

- [1] TRONIEWSKI L. i inni: Tablice do obliczeń procesowych, skrypt PO nr 189, Opole 1996
- [2] HOBLER T.: Ruch ciepła i wymienniki, WNT W-wa 1986

7. TEMATYKA ZAGADNIEŃ KONTROLNYCH

1. Rozwiązania konstrukcyjne rekuperatorów.
2. Sposoby intensyfikacji przepływu ciepła w rekuperatorach płaszczowo-rurowych.
3. Rodzaje przegród w rekuperatorach płaszczowo-rurowych i ich zadanie.
4. Liniowe i miejscowe opory przepływu.
5. Sposoby pomiaru wartości strumienia płynu.

Ćwiczenie 5:

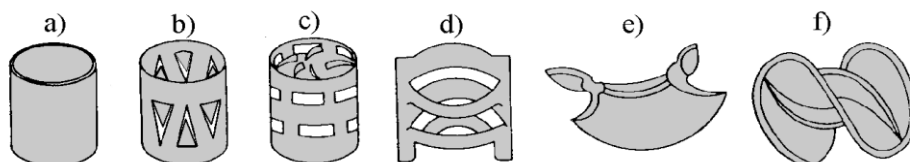
HYDRAULIKA KOLUMNY WYPEŁNIONEJ

1. CEL ĆWICZENIA

Celem ćwiczenia jest wyznaczenie oporów przepływu gazu przez wypełnienie zraszane cieczą oraz określenie granicy zachłystywania aparatu wypełnionego.

2. WIADOMOŚCI TEORETYCZNE

Wiele aparatów służących w procesach technologicznych do wymiany masy, zawiera w swoim wnętrzu elementy rozwijające powierzchnię kontaktu pomiędzy fazami. Elementy te potocznie nazywane są wypełnieniem. Istnieje bardzo duża różnorodność wypełnień stosowanych w aparatach. Na rys. 1. przedstawiono najpopularniejsze z nich, a fotografia 1 pokazuje, że różnią się one nie tylko kształtem, ale również wielkością i materiałem z których można je wykonywać.

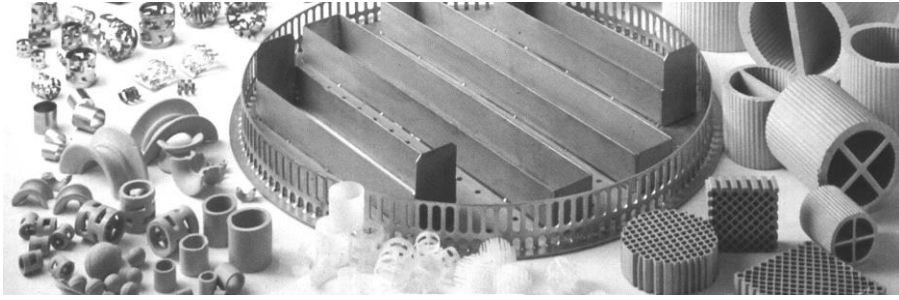


Rys. 1. Popularne wypełnienia stosowane w kolumnach:

- a) pierścień Raschiga, b) pierścień Białeckiego, c) pierścień Palla,
d) Interpack, e) siodełko Intalox, f) siodełko Berla

Na hydraulikę przepływu, tak gazu jak i cieczy, przez warstwę wypełnienia, bezpośredni wpływ mają dwie wielkości związane z kształtem i wymiarami elementów stanowiących warstwę. Są to:

- wolna objętość (tzw. porowatość) wypełnienia, definiowana jako stosunek objętości wolnych przestrzeni w warstwie do objętości całej warstwy. Zwykle wielkość ta oznaczana jest symbolem ϵ , jej jednostka to m^3/m^3 .



Fot. 1. Przykładowe kształty i wielkość wypełnień stosowanych w aparatach kolumnowych

- powierzchnia jednostkowa wypełnienia, definiowana jako wielkość rozwiniętej powierzchni reprezentowanej przez 1m^3 danego wypełnienia. Zwykle oznaczana jest symbolem a . Jej jednostka to m^2/m^3 .

Z parametrami ε i a związana jest jeszcze jedna wielkość charakteryzująca wymiary wypełnienia. Ze względu na złożony i różnorodny kształt tych elementów, koniecznym jest określenie zastępczego parametru umożliwiającego ich porównanie pod względem wielkości. W tym celu wprowadza się pojęcie średnicy zastępczej, definiowanej zwykle jako

$$d_e = \frac{4 \varepsilon}{a} . \quad (1)$$

W literaturze, oprócz definicji średnicy zastępczej wg równania (1), można spotkać inne definicje tej wielkości. Dotyczy to w szczególności równań opisujących przebieg procesów wymiany masy realizowanych właśnie w kolumnach wypełnionych. Autorzy tych równań jako średnicę zastępczą elementów wypełnienia przyjmują niekiedy wyrażenia

$$d_e = \frac{\varepsilon}{a} ; \quad d_e = \frac{1}{a} ; \quad d_e = \sqrt{\frac{F_w}{\pi}} ; \quad d_e = \sqrt[3]{\frac{6 V_w}{\pi}} , \quad (2)$$

w których: F_w - powierzchnia elementu wypełnienia, m^2 ;
 V_w - objętość elementu wypełnienia, m^3 .

W praktyce, posługując się średnicą zastępczą (ekwiwalentną), zawsze należy zwrócić szczególną uwagę na sposób jej definiowania.

Kryteria którym powinny odpowiadać kształtki stanowiące wypełnienie aparatu w którym ma być realizowany określony proces to ich:

- możliwie duża powierzchnia jednostkowa;
- możliwie duża porowatość;

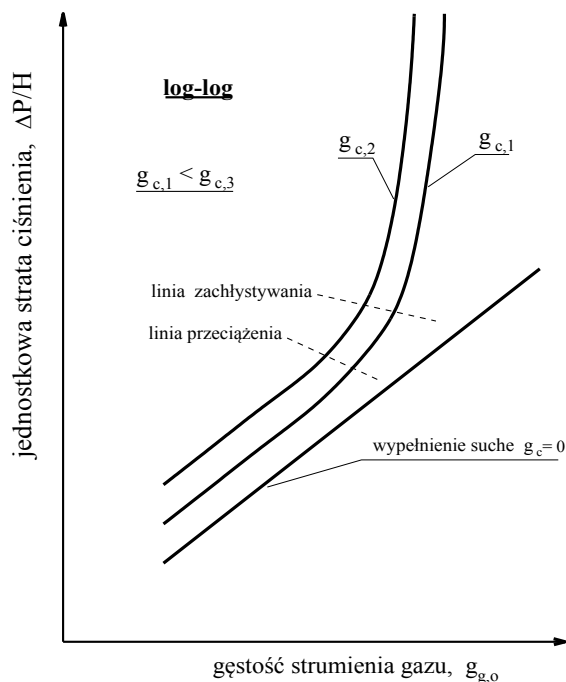
- dobra zwilżalność powierzchni przez ciecz zraszającą;
- duża sztywność w temperaturze pracy;
- mały ciężar;
- stosunkowo niska cena, itp.

W praktyce, jednoczesne spełnienie tych wszystkich wymogów jest niemożliwe, dlatego dobierając rodzaj wypełnienia dokonywać należy pewnego kompromisu pomiędzy wymogami którym powinno to wypełnienie odpowiadać.

Małe elementy wypełnienia usypuje się w aparatach bezpośrednio na tzw. rusztach, większe układa symetrycznie względem siebie. W obu przypadkach są to jednak tzw. wypełnienia usypowe. Osobną grupę stanowią wypełnienia konstrukcyjne, które tworzą całe zespoły elementów montowane poza aparatem i dopiero w takiej postaci instalowane w kolumnie.

Z hydrauliką aparatów wypełnionych wiążą się głównie trzy zjawiska: opór przepływu gazu przez wypełnienie zraszane, granica zachłystywania aparatu związana z dopuszczalnym obciążeniem fazą ciekłą i gazową oraz ilość cieczy zatrzymana na wypełnieniu tzw. hold up..

Na rys. 2 przedstawiono w układzie podwójnie logarytmicznym charakter



Rys. 2. Wpływ gęstości strumienia gazu i cieczy na wartość jednostkowego oporu przepływu gazu przez wypełnienie zraszane zmian oporów przepływu gazu przez warstwę wypełnienia w zależności od gęstości strumienia masy gazu i gęstości strumienia masy cieczy zraszającej. Linia dolna odpowiada przepływowi gazu przez wypełnienie suche (nie zraszane). Prostoliniowość tej zależności w przyjętym układzie współrzędnych wynika stąd, że warstwa wypełnienia nieruchomego stanowi w tym przypadku jedynie stałą lokalną przeszkodę dla przepływu gazu (tak jak zwykły zawór czy kolanko). Równanie opisujące opór przepływu ma zatem postać analogiczną jak w przypadku przepływu przez rurociąg

$$\Delta P_{g,s} = \xi \frac{w^2 \rho}{2} = \frac{\xi \rho}{2} w^2 = C w^2, \quad (3)$$

gdzie: $\Delta P_{g,s}$ - opór przepływu gazu przez przeszkodę którą stanowi warstwa wypełnienia suchego, Pa;

ξ - liczba oporu miejscowego dla warstwy o określonej geometrii, -;

ρ - gęstość gazu (stała w danych warunkach procesowych), kg/m^3 ;

Po obustronnym logarytmowaniu zależności (3) otrzymuje się

$$\log \Delta P_{g,s} = \log C + 2 \log w, \quad (4)$$

a zatem równanie liniowe typu

$$Y = a X + b. \quad (5)$$

Pozostałe linie na rys. 2 odpowiadają określonym wartościom gęstości zraszania wypełnienia cieczą. Nie są to już jednak zależności prostoliniowe. Na krzywych tych można wyróżnić charakterystyczne punkty które tworzą linię przecięcia **P** oraz linię zachłystywania **Z**. Poniżej linii przecięcia, ilość zawieszona na wypełnieniu cieczy zwiększa się wraz ze zwiększaniem gęstości zraszania, jest jednak niezależna od prędkości gazu. Dalsze zwiększanie prędkości gazu utrudnia sływ cieczy i następuje silne zwiększenie jej zatrzymania na elementach wypełnienia, co prowadzi w konsekwencji do osiągnięcia pewnego punktu granicznego, tzw. zachłystywania się aparatu. Działanie hamujące gazu jest wówczas tak duże, że cały aparat wypełnia się cieczą i jego działanie przypomina pracę kolumny barbotażowej; która dodatkowo zawiera nie spełniającą swojej roli warstwę wypełnienia. Stan taki ogranicza zdolność aparatu do funkcjonowania i możliwość jego wystąpienia musi być przedmiotem obliczeń sprawdzających w trakcie projektowania aparatu. Zwykle punkt pracy kolumny z wypełnieniem leży nieco powyżej punktu przecięcia lecz zawsze poniżej punktu zachłystywania.

Literatura podaje wiele równań umożliwiających wyznaczenie wartości oporów przepływu gazu przez wypełnienie zraszane. Jednym z nich jest równanie Żaworonkowa

$$\Delta P_{g,z} = \Delta P_{g,s} A_z, \quad (6)$$

w którym: $\Delta P_{g,z}$ - opór przepływu gazu przez wypełnienie zraszane, Pa;
 $\Delta P_{g,s}$ - opór przepływu gazu przez wypełnienie suche, Pa;
 A_z - poprawka zraszania, -.

Opór przepływu gazu przez wypełnienie suche (nie zraszane) należy wyznaczyć w tym przypadku z równania

$$\Delta P_{g,s} = \frac{2f}{\varepsilon^2} \frac{g_{g,o}^2}{\rho_g} \frac{H}{d_e} \quad (7)$$

w którym: H - wysokość warstwy wypełnienia, m;
 d_e - średnica ekwiwalentna liczona wg (1), m;
 $g_{g,o}$ - gęstość strumienia masy gazu liczona na pustym aparacie, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$;
 ρ_g - gęstość gazu, kg/m^3 ;
 ε - porowatość warstwy wypełnienia, -.

Wielkość f stanowi liczbę oporu przepływu i jest funkcją liczby Reynoldsa gazu, liczonej jako

$$\text{Re}_g = \frac{4 g_{g,o}}{a \eta_g} \quad (8)$$

gdzie: $g_{g,o}$ - gęstość strumienia masy gazu liczona na pustym aparacie, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$;
 η_g - współczynnik dynamiczny lepkości gazu, $\text{Pa} \cdot \text{s}$;
 a - powierzchnia jednostkowa wypełnienia, m^2/m^3 .

Dla wypełnienia usypanego z pierścieni Raschiga i w zależności od wartości liczby Re_g , wartość f wyznaczyć można wg równań

$$\text{Re}_g < 50 \quad \rightarrow \quad f = \frac{100}{\text{Re}_g} \quad (9)$$

$$50 < \text{Re}_g < 7000 \quad \rightarrow \quad f = \frac{3,8}{\text{Re}_g^{0,2}} \quad (10)$$

$$\text{Re}_g > 7000 \quad \rightarrow \quad f \approx 0,65 \quad (11)$$

Poprawkę zraszania A_z należy natomiast obliczać wg zależności

$$A_z = 10^{\beta} g_{c,o} \quad (12)$$

gdzie: $g_{c,o}$ - gęstość strumienia masy cieczy liczona na pustym aparacie, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,

β - współczynnik eksperymentalny, zależny od rodzaju wypełnienia, -.

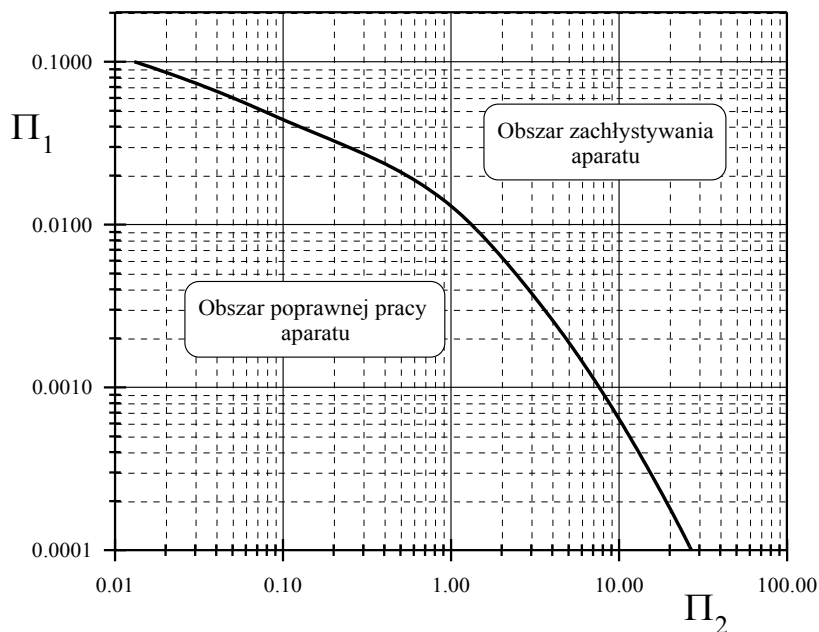
Wartość współczynnika β (wyznaczonego eksperymentalnie) dla różnego rodzaju wypełnień szeroko podaje literatura, np. [1]. W tabeli 1 podano wartości tego współczynnika dla ceramicznych pierścieni Raschiga.

Tabela 1

Wartości współczynnika β dla usypanych ceramicznych pierścieni Raschiga

wymiar nominalny	3/8"	1/2"	5/8"	3/4"	1"	5/4"	3/2"	2"
β	0,084	0,084	0,0533	0,0533	0,0512	0,0471	0,0471	0,0348

Jedną z metod sprawdzenia aparatu ze względu na możliwość jego zachłystywania jest skorzystanie z wykresu przedstawionego na rys. 3.



Rys. 3. Możliwość zachłystywania aparatów wypełnionych

$$\Pi_1 = f \frac{w_0^2 a \rho_g}{2 g \varepsilon^3 \rho_c} \eta_{wzg}^{0,2} \quad \Pi_2 = \frac{g_c}{g_g} \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_c}}$$

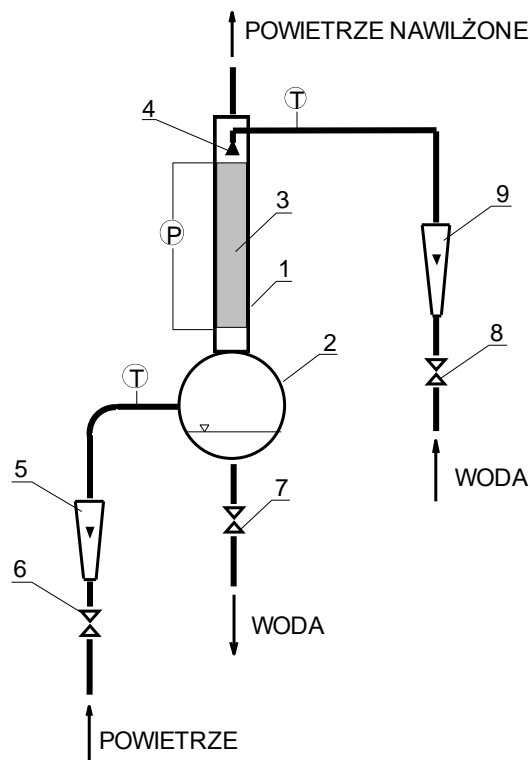
W celu określenia punktu pracy aparatu, należy wyznaczyć wartość parametrów Π_1 i Π_2 , a następnie nanieść tak wyznaczony punkt na wykres. Jeżeli punkt ten znajdzie się pod krzywą graniczną, to aparat winien pracować poprawnie.

Obszar ponad krzywą odpowiada zakresowi w którym kolumna może się zachłystywać. Występująca w równaniu opisującym Π_1 wielkość η_{wzg} jest stosunkiem lepkości cieczy zraszającej do lepkości wody w danej temperaturze.

Warto jeszcze zaznaczyć, że sposoby obliczania oporów przepływu na drodze rachunkowej, jak również metody przewidywania możliwości zachłysnięcia się aparatu, powstają na podstawie badań eksperymentalnych. Z tego też powodu, uzyskiwane metody obliczeniowe, zwłaszcza dla wypełnień nie uwzględnionych w badaniach eksperymentalnych, mogą niekiedy dawać nieścisłe wyniki. W praktyce zatem, producenci zamieszczają w katalogach swoich produktów charakterystyki poszczególnych rodzajów wypełnień (w formie wykresów jak na rys. 2). Przykłady takich charakterystyk dla zwykłych pierścieni Raschiga zawiera np. praca [1].

3. OPIS STANOWISKA LABORATORYJNEGO

Schemat stanowiska pomiarowego przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. Schemat stanowiska pomiarowego.

1 - kolumna szklana, 2 - zbiornik kulisty, 3 - warstwa wypełnienia, 4 - zraszacz sitkowy, 5 - rotametr powietrza, 6 - zawór regulacyjny dla powietrza, 7 - zawór upustowy, 8 - zawór regulacyjny dla wody, 9 - rotametr wody, (T) - pomiar temperatury, (P) - pomiar różnicy ciśnienia

Składa się ono z pionowej szklanej rury o średnicy 100 mm (1) zamkniętej od dołu kulistym zbiornikiem (2). Wewnątrz rury na ruszcie usypana jest warstwa wypełnienia z ceramicznych pierścieni Raschig'a o wymiarze $5/8$ ". Wysokość warstwy wynosi 0,45m. Strumień gazu, pobieranego z instalacji sprężonego powietrza, regulowany jest zaworem (6), a mierzony rotametrem (5). Powietrze to wprowadzane jest od dołu kolumny i płynie ku górze przez warstwę wypełnienia zraszanego wodą. Woda doprowadzana jest poprzez zraszacz sitkowy (4) i spływa w dół po wypełnieniu, a jej poziom w zbiorniku kulistym (2) utrzymywany jest za pomocą zaworu upustowego (7). Woda na dnie zbiornika kulistego stanowi zamknięcie hydrauliczne dla powietrza, które winno przepływać jedynie przez warstwę wypełnienia. Pomiar i regulacja strumienia wody prowadzona jest zaworem (8) i rotametrem (9). Do pomiaru straty ciśnienia gazu na wypełnieniu zastosowano manometr U-rurkowy (P), a temperatura płynów mierzona jest termometrami (T). Rotametr powietrza wyskalowany jest bezpośrednio w m^3/h powietrza, a rotametr wody w l/h. Powietrze po nawilżeniu opuszcza aparat wypływając do otoczenia.

4. METODYKA PROWADZENIA POMIARÓW

W celu zbadania hydrauliki przepływu powietrza przez warstwę zraszanego wodą wypełnienia, w kolomnie przedstawionej na rys. 4, należy:

- a) zamknąć zawór upustowy (7);
- b) otworzyć zawór odcinający dopływ powietrza do instalacji;
- c) zmieniając, z przyjętym krokiem, strumień powietrza (zawór (6) i rotametr (5)) dokonać każdorazowo odczytu na U-rurce straty ciśnienia powietrza na wypełnieniu suchym;
- d) wyniki zanotować w tabeli;
- e) otworzyć częściowo zawór upustowy (7);
- f) otworzyć zawór odcinający dopływ wody do instalacji;
- g) zaworem (8) ustawić na rotametrze (9) pierwszy stały strumień wody;
- h) odczekać do chwili w której woda pokryje elementy wypełnienia oraz utworzy zamknięcie hydrauliczne dla gazu na dnie zbiornika kulistego;
- i) dokonując regulacji, jak w pkt. c), strumienia powietrza, przeprowadzić pomiary straty ciśnienia gazu na wypełnieniu zraszanym stałym strumieniem wody, obserwując jednocześnie czy nie została przekroczona granica zachłystywania aparatu;

- j) powtórzyć pomiary wg pkt. i) dla dwóch innych stałych strumieni wody zraszającej;
 k) wyniki każdorazowo notować w tabeli;
 l) po zakończeniu pomiarów zamknąć zawory odcinające dopływ wody i powietrza do instalacji oraz spuścić wodę ze zbiornika kulistego.

Hydraulika kolumny wypełnionej			
Rodzaj wypełnienia: zwykle pierścienie Raschig'a 5/8" (15x15x3 mm)			
Średnica aparatu: 100 mm			
Wysokość warstwy wypełnienia: 0,45 m			
Rodzaj gazu: powietrze, temperatura °C,			
Rodzaj cieczy: woda, temperatura °C.			
Strumień powietrza	Strumień wody	Opór przepływu	Zachłystywanie aparatu
m ³ /h	l/h	mm H ₂ O	TAK / NIE
10			
20			
...			
10			
20	100		
...			
10			
20	300		
...			
10			
20	500		
...			

5. ZAKRES OPRACOWANIA WYNIKÓW

- Opracować charakterystykę badanego wypełnienia w postaci wykresu jak na rys. 2; pamiętając o przyjęciu podwójnie logarytmicznego układu współrzędnych.
- Nanieść na wykres granicy zachłystywania (rys. 3), punkty pracy kolumny uzyskane w badaniach własnych, odpowiadające wartościom obliczonych modułów Π_1 i Π_2 .
- Porównać zgodność informacji otrzymanych na podstawie wykresu opracowanego wg pkt. 2 z własnymi obserwacjami co do poprawności pracy kolumny.

4. Na podstawie otrzymanych wyników pomiarów oporów przepływu, określić średnią wartość współczynnika β dla badanego wypełnienia. W tym celu należy wykorzystać przekształcone odpowiednio zależności (6) i (12), tj.

$$A_z = \frac{\Delta P_{z,zm}}{\Delta P_{s,zm}} = 10^{\beta g_{c,o}}$$

czyli

$$\beta = \frac{\lg \frac{\Delta P_z}{\Delta P_s}}{g_{o,c}}$$

4. Podać wnioski z przeprowadzonego ćwiczenia.

6. LITERATURA UZUPEŁNIAJĄCA

- [1] TRONIEWSKI L. i inni: Tablice do obliczeń procesowych, Skrypt PO nr 189, Opole 1996.
 [2] KOCH R., NOWORYTA A.: Procesy mechaniczne w inżynierii chemicznej, WNT W-wa 1992.

7. TEMATYKA ZAGADNIEŃ KONTROLNYCH

1. Rodzaje wypełnień i ich rola w aparatach do wymiany masy.
2. Parametry określające geometrię wypełnień.
3. Wymogi stawiane wypełnieniom.
4. Opór przepływu gazu przez wypełnienie suche i zraszane.
5. Zjawisko zachłystywania aparatów wypełnionych.

Ćwiczenie 6:

OKREŚLANIE STRUKTUR PRZEPŁYWU UKŁADU DWUFAZOWEGO GAZ-CIECZ

1. CEL ĆWICZENIA

Celem ćwiczenia jest identyfikacja struktur przepływu układu dwufazowego woda-powietrze w rurach pionowych i poziomych oraz sprawdzenie zgodności zakresów ich występowania z zakresami podawanymi na mapach przepływu mieszaniny dwufazowej.

2. WIADOMOŚCI TEORETYCZNE

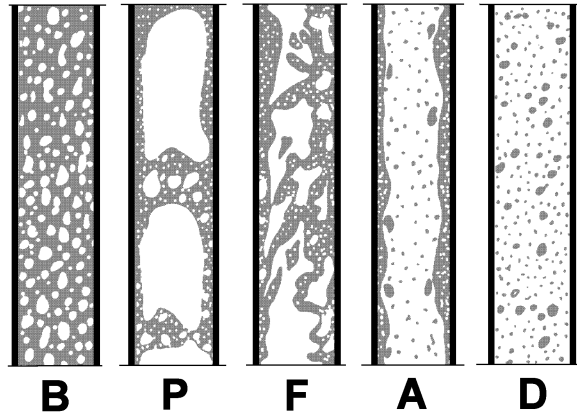
Wiele procesów technologicznych, prowadzonych na skalę przemysłową, zachodzi w układach dwufazowych gaz-ciecz. Układy te niejednokrotnie są przesyłane przez rurociągi łączące poszczególne elementy instalacji produkcyjnej. Wtedy gdy gaz i ciecz płyną jednocześnie przez kanał występuje przepływ mieszaniny dwufazowej. W trakcie takiego przepływu oba składniki mieszaniny tworzą formy geometryczne o różnych kształtach. Wzajemne konfiguracje tych form noszą nazwę struktur przepływu. Rodzaj tworzącej się struktury uzależniony jest od takich parametrów jak:

- wartość strumieni obu faz;
- właściwości fizyczne faz;
- wymiar, kształt i usytuowanie kanału w którym odbywa się przepływ.

Znajomość poszczególnych struktur przepływu, a zwłaszcza zakresów ich występowania, jest o tyle istotna, że częstokroć wytwarzane są one celowo dla uzyskania korzystnych warunków prowadzenia danego procesu. Przykładem mogą tu być wyparki cienkowarstewkowe w których wytwarza się w sposób hydrauliczny przepływ cienkiej warstwy cieczy na wewnętrznej ścianie rury wyparnej.

Systematyki struktur przepływu dokonuje się zwykle w oparciu o obserwacje wizualne płynącej mieszaniny dwufazowej.

Na rys. 1 przedstawiono powszechnie znaną, np. podawaną w pracy [1], systematykę struktur przepływu układu gaz-ciecz, które mogą pojawić się przy współprądowym wznoszącym przepływie gazu i cieczy w rurze pionowej.



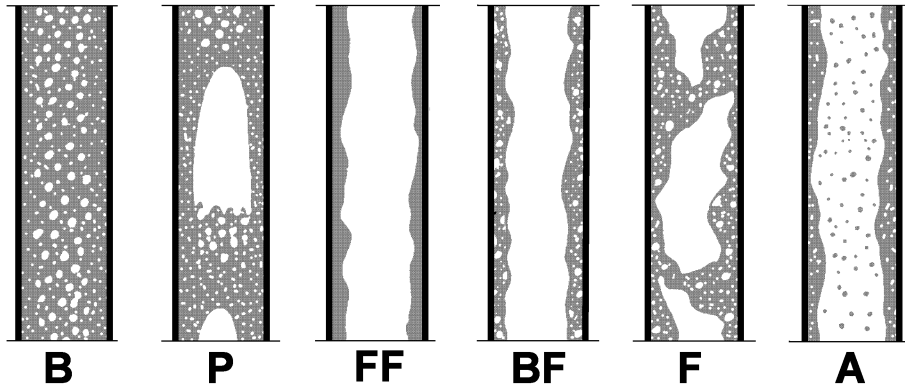
Rys. 1. Struktury dwufazowe gaz-ciecz przy przepływie w rurze ku górze
 B - pęcherzykowa; P - korkowa; F - pianowa;
 A - pierścieniowa; D - dyspersyjna

Są to następujące rodzaje (struktury) przepływu:

- przepływ pęcherzykowy (B) - charakteryzujący się tym, że w ciągłej fazie ciekłej rozproszone są pęcherzyki gazu płynące z prędkością zbliżoną do prędkości cieczy;
- przepływ korkowy (P) - to naprzemienny przepływ porcji cieczy i korków gazu;
- przepływ pianowy (F) - pojawia się wraz ze zwiększeniem strumienia gazu. Zwiększenie zawartości gazu w porcjach cieczy zaburza ciągłość fazy ciekłej i dochodzi do wzajemnego chaotycznego przemieszczania się faz;
- przepływ pierścieniowy (A) - charakteryzujący się tym, że ciecz płynie cienką warstwą po wewnętrznej powierzchni rury, a gaz, ze znaczną prędkością, jej środkiem. Wraz ze zwiększeniem prędkości gazu i zmniejszeniem prędkości cieczy, zanikają fale na powierzchni rozdziału faz;
- przepływ dyspersyjny (D) - przy dużym strumieniu gazu następuje porywanie kropelek cieczy z wierzchołków fal przepływu pierścieniowego. W skrajnym przypadku ciecz w całości płynie w postaci kropelek i mgły.

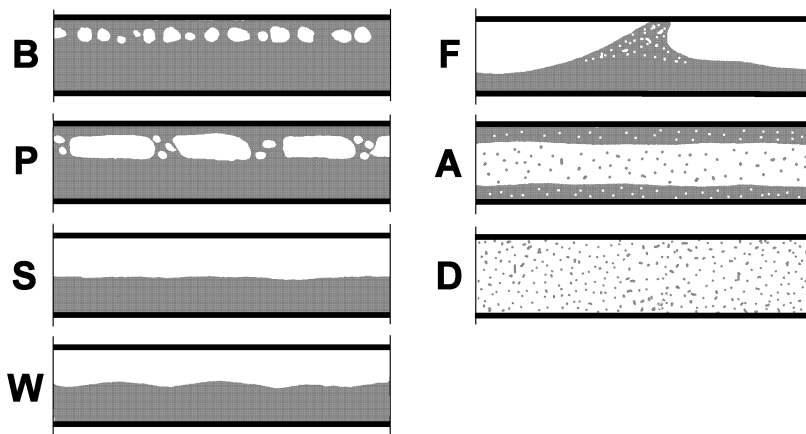
W przypadku przepływu układu dwufazowego w dół przez rury pionowe brak jest w literaturze zgodnej opinii co do systematyki struktur przepływu. Na rys. 2 przedstawiono, zaczerpniętą z pracy [2], przykładową systematykę tych struktur zaproponowaną przez Oschinowo i Charlsa.

Warto zauważyć, że podczas przepływu opadającego nie tworzy się przepływ dyspersyjny cieczy, natomiast przepływowi wznoszącemu nie towarzyszy klasyczny przepływ cienkiego filmu cieczy po ścianie kanału, jak to może mieć miejsce podczas przepływu ku dołowi.



Rys. 2. Struktury dwufazowe gaz-ciecz przy przepływie w rurach ku dołowi
 B - pęcherzykowa; P - korkowa; FF - spływający film; BF - pęcherzykowo-filmowa; F - pianowa; A - pierścieniowa

Na rys. 3 podano systematykę struktur występujących podczas przepływu mieszaniny gaz-ciecz przez rury poziome. Została ona zaproponowana przez Bakera i jest powszechnie uznawana przez wielu badaczy.



Rys. 3. Struktury dwufazowe gaz-ciecz przy przepływie w rurze poziomej
 B - pęcherzykowa; P - korkowa; S - rozwarstwiona; W - falowa; F - rzutowa;
 A - pierścieniowa; D - dyspersyjna

Według tej systematyki wyróżnia się następujące struktury:

- przepływ pęcherzykowy (B) - w ciągłej fazie ciekłej płyną pęcherzyki gazu gromadzące się głównie w górnej części rury;
- przepływ korkowy (P) - w ciągłej fazie ciekłej płyną korki gazu w postaci walców o zaokrąglonym czole, korki mają tendencję do przepływu w górnej części rury;
- przepływ rozwarstwiony (S) - ciecz płynie w dolnej części kanału, zaś gaz w górnej; powierzchnia rozdziału faz jest gładka;
- przepływ falowy (W) - wraz ze zwiększaniem strumieni gazu i cieczy na powierzchni rozdziału faz tworzą się fale, początkowo sinusoidalne, a następnie tzw. fale toczące;
- przepływ rzutowy (F) - powierzchnia rozdziału faz jest tak znacznie zafalowana, że szczyty fal dotykają górnej ściany rury tworząc na przemian przepływ porcji cieczy oraz spienionej mieszaniny cieczy i gazu;
- przepływ pierścieniowy (A) - ciecz płynie cienką warstwą po ścianie, zaś gaz środkiem rury, może występować asymetria grubości filmu cieczy - w dolnej części przekroju rury film jest grubszy niż w górnej. Na powierzchni rozdziału faz pojawiają się fale;
- przepływ dyspersyjny (D) - przy znacznych wartościach prędkości gazu następuje porywanie cieczy z wierzchołków fal, w skrajnym przypadku zanika film cieczy na ścianie, a cała ciecz płynie w postaci kropeł unoszonych przez gaz.

Zakresy występowania poszczególnych struktur przepływu układu dwufazowego są przedstawiane na ogół, w zależności od różnych parametrów, na wykresach zwanych mapami przepływu w formie obszarów rozdzielonych liniami bądź pasmami granicznymi. W literaturze, np. [1, 2, 3], można spotkać bardzo wiele takich map, opracowanych w różnych układach współrzędnych i obowiązujących dla kanałów o różnej geometrii i kierunku przepływu mieszaniny dwufazowej. Niekiedy mapy takie obowiązują jedynie dla mieszanin dwufazowych o ściśle określonych właściwościach fizycznych obu tworzących je składników i w ściśle określonych zakresach zmian ich strumieni.

Na rys. 4. przedstawiono mapę dla przepływu wznoszącego w rurach pionowych. Mapa ta uznawana jest w literaturze jako uniwersalna, obowiązująca w szerokim zakresie zmian właściwości i strumieni składników mieszaniny dwufazowej.

Na rys. 5 przedstawiono natomiast mapę obowiązującą dla przepływu przez rurę poziomą.

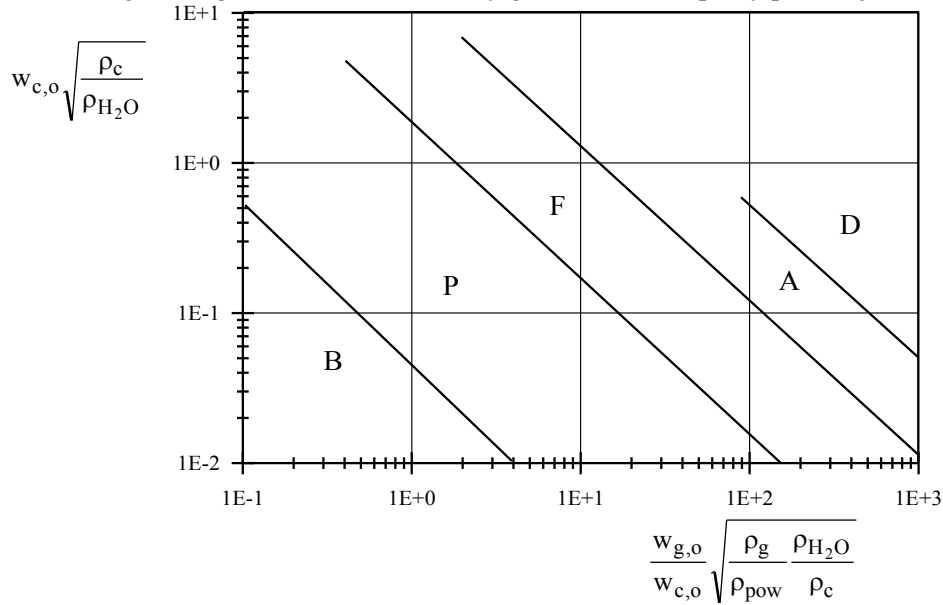
Parametry od wartości których uzależniono na obu prezentowanych mapach obszary występowania poszczególnych struktur to:

$w_{c,o}$ - prędkość pozorna cieczy liczona na pełny przekrój kanału;

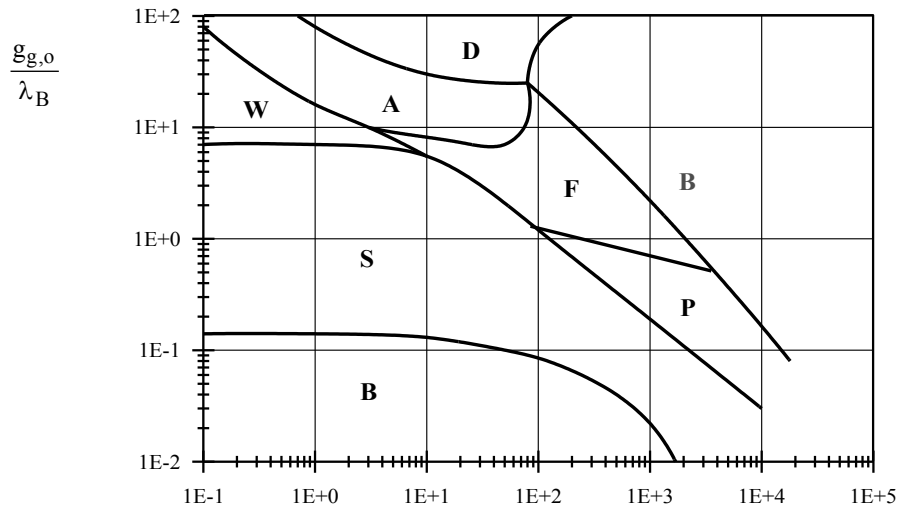
$w_{g,o}$ - prędkość pozorna gazu liczona na pełny przekrój kanału;

$g_{c,o}$ - gęstość strumienia masy cieczy liczona na pełny przekrój kanału;

$g_{g,o}$ - gęstość strumienia masy gazu liczona na pełny przekrój kanału;



Rys. 4. Mapa struktur przepływu mieszaniny gaz-ciecz w rurach pionowych ku górze
 B - pęcherzykowa; P - korkowa; F - pianowa; A - pierścieniowa; D - dyspersyjna



$$\frac{g_{c,o}}{g_{g,o}} \lambda_B \Psi_B$$

Rys. 5. Mapa struktur przepływu mieszaniny gaz-ciecz w rurach poziomych
 B - pęcherzykowa; P - korkowa; S - rozwarstwiona; W - falowa; F - rzutowa;
 A - pierścieniowa; D - dyspersyjna

$$\lambda_B = \left(\frac{\rho_g}{\rho_{pow}} \frac{\rho_c}{\rho_{H_2O}} \right)^{0,5}$$

$$\Psi_B = \frac{\sigma_{H_2O}}{\sigma_c} \left[\frac{\eta_c}{\eta_{H_2O}} \left(\frac{\rho_{H_2O}}{\rho_c} \right)^{0,5} \right]^{0,33}$$

gdzie: ρ - gęstość, kg/m^3 ;

η - współczynnik dynamiczny lepkości, $Pa \cdot s$;

σ - napięcie powierzchniowe, N/m ;

indeksy dotyczą:

c - cieczy;

g - gazu;

pow - powietrza;

H_2O - wody.

Dysponowanie mapami przepływu dla określonego przypadku daje możliwość przewidywania rodzaju struktury, która wystąpi w danym rurociągu zasilanym założonymi strumieniami gazu i cieczy. Znajomość rodzaju struktury dwufazowej pozwala natomiast na właściwą ocenę zjawisk ciepło-przepływowych (opory przepływu, wnikanie ciepła) towarzyszących tego rodzaju przepływowi.

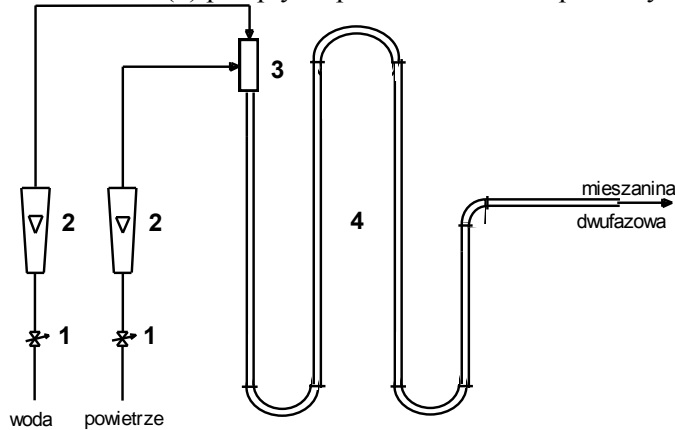
3. OPIS STANOWISKA LABORATORYJNEGO

Stanowisko do identyfikacji struktur przepływu układu dwufazowego gaz-ciecz składa się z dwóch niezależnych od siebie części.

Pierwsza z nich, przedstawiona schematycznie na rys. 6, służy do obserwacji struktur przepływu w rurach pionowych przy współprądowym, wznoszącym i opadającym, przepływie faz. Doprowadzane do instalacji na rys. 6 strumienie wody i powietrza są mieszane ze sobą w komorze (3), a następnie trafiają do układu szklanych pionowych rur o średnicy wewnętrznej 25 mm, połączonych ze sobą również szklanymi łukami. Wartość strumieni obu faz jest regulowana zaworami (1), a mierzona rotametrami (2) wyskalowanymi bezpośrednio w jednostkach strumienia objętościowego danego płynu. W trakcie przepływu mieszaniny przez instalację obserwowane są i identyfikowane tworzące się

struktury dwufazowe. Ich postać zależy m.in. od strumieni obu płynów oraz kierunku przepływu mieszaniny. Po przejściu przez instalację mieszanina kierowana jest do kanalizacji.

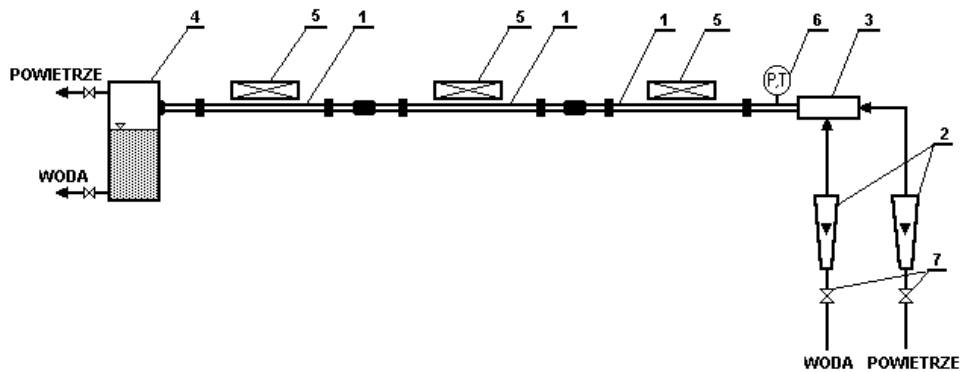
Druga część stanowiska to układ poziomych szklanych rur o średnicy 12, 16 i 22 mm połączonych ze sobą szeregowo, (rys. 7). Mieszanina dwufazowa, wytwarzana w komorze (3) przepływa przez układ trzech poziomych szklanych



Rys. 6. Schemat stanowiska do identyfikacji struktur przepływu układu dwufazowego gaz-ciecz w rurach pionowych

1 - zawory regulacyjne; 2 - rotametry; 3 - komora mieszana; 4 - układ szklanych rur o średnicy wewnętrznej ϕ 25 mm

rur w kierunku od rury o najmniejszej średnicy do największej, co zapobiega gromadzeniu się wody wewnątrz układu. Strumienie obu faz są regulowane zaworami (7), a mierzone rotametrami (2). Rotametry te wyskalowano w jednostkach strumieni objętościowych poszczególnych płynów. Obserwacja tworzących się struktur przepływu prowadzona jest na podświetlanych odcinkach rur (5).



Rys. 7. Schemat stanowiska do identyfikacji struktur przepływu układu dwufazowego gaz-ciecz w rurach poziomych

1 - rury szklane o średnicy kolejno 12, 16 i 22 mm, 2 - rotametry,
3 - komora mieszana, 4 - separator, 5 - układy podświetlające, 6 - pomiar ciśnienia i temperatury, 7 - zawory regulacyjne

4. METODYKA PROWADZENIA POMIARÓW

W celu przeprowadzenia identyfikacji struktur przepływu mieszaniny dwufazowej woda-powietrze w rurach pionowych, przy wykorzystaniu stanowiska badawczego przedstawionego na rys. 6, należy:

- otworzyć zawory odcinające na przewodach łączących instalację doświadczalną z siecią wodociągową i sprężonego powietrza;
- sprawdzić czy przewód odpływowy z instalacji jest przyłączony do sieci kanalizacyjnej;
- zmieniając zaworami (1) nastawy strumieni obu płynów, (z odpowiednio przyjętym krokiem), obserwować i identyfikować tworzące się w rurach struktury przepływu;
- wyniki obserwacji notować w tabeli.
- po wykonaniu pomiarów zamknąć zawory odcinające wody i sprężonego powietrza.

Struktury przepływu układu dwufazowego gaz-ciecz w rurach pionowych

Rodzaj cieczy: woda
Rodzaj gazu: powietrze
Średnica rury: 25 mm.

Strumień wody	Strumień powietrza	Zaobserwowana struktura przepływu

m ³ /h	m ³ /h	przepływ wznoszący	przepływ opadający

W celu przeprowadzenia identyfikacji struktur przepływu mieszaniny dwufazowej woda-powietrze w rurach poziomych, przy wykorzystaniu stanowiska badawczego przedstawionego na rys. 7, należy:

- otworzyć zawory odcinające na przewodach łączących instalację doświadczalną z siecią wodociągową i sprężonego powietrza;
- sprawdzić czy przewód odpływowy z separatora jest przyłączony do sieci kanalizacyjnej;
- wyłącznikiem elektrycznym umieszczonym obok rotametrów włączyć układy podświetlania rur;
- zmieniając zaworami (7) nastawy strumieni obu płynów, (z odpowiednio przyjętym krokiem), obserwować i identyfikować tworzące się w rurach struktury przepływu;
- wyniki obserwacji notować w tabeli;

Struktury przepływu układu dwufazowego gaz-ciecz w rurach poziomych			
Rodzaj cieczy: woda			
Rodzaj gazu: powietrze			
Strumień wody	Strumień powietrza	Średnica rury	Zaobserwowana struktura przepływu
m ³ /h	m ³ /h	mm	
		12	
		16	
		22	
		12	
		16	
		22	

- po wykonaniu pomiarów wyłączyć układy podświetlające i zamknąć zawory odcinające wody i sprężonego powietrza.

5. ZAKRES OPRACOWANIA WYNIKÓW

- Porównać rodzaj struktury gaz-ciecz występującej podczas przepływu wznoszącego i opadającego. Porównanie to przeprowadzić dla kolejnych

- punktów pomiarowych odpowiadających stałym strumieniom mieszaniny dwufazowej w rurach instalacji. Opisać różnice w zachowaniu się faz.
2. W odniesieniu do przepływu wznoszącego w rurze pionowej i przepływu w rurze poziomej, zaznaczyć na odpowiednich mapach przepływu punkty odpowiadające zaobserwowanym w trakcie pomiarów strukturom.
 3. Porównać, na podstawie uzyskanych w pkt. 2 rysunków, zgodność występowania zaobserwowanych kolejno struktur z obszarami ich występowania na mapach przepływu.
 4. Podać wnioski z przeprowadzonego ćwiczenia.

6. LITERATURA UZUPEŁNIAJĄCA

- [1] TRONIEWSKI L.: Aparaty z hydraulicznie wytwarzanym filmem cieczy, Zeszyty Naukowe WSI w Opolu, Seria: Studia i Monografie, z. 14, Opole 1989
- [2] KOCH R., NOWORYTA A.: Procesy mechaniczne w inżynierii chemicznej, WNT W-wa 1992
- [3] TRONIEWSKI L. i inni: Tablice do obliczeń procesowych, Skrypt PO nr 189, Opole 1996

7. TEMATYKA ZAGADNIENÍ KONTROLNYCH

1. Systematyka struktur przepływu układu dwufazowego gaz-ciecz występujących w rurach pionowych.
2. Systematyka struktur przepływu układu dwufazowego gaz-ciecz występujących w rurach poziomych.
3. Mapy przepływu układu dwufazowego gaz-ciecz.
4. Wpływ rodzaju struktury na zjawiska ciepłno-przepływowe zachodzące podczas przepływu mieszaniny gaz-ciecz przez rurociąg.
5. Przykłady praktycznego występowania przepływów wielofazowych w aparaturze procesowej.

Ćwiczenie 7:

BADANIE PROCESU SEDYMENTACJI ZAWIESINY

1. CEL ĆWICZENIA

Celem ćwiczenia jest doświadczalne określenie prędkości opadania swobodnego cząstki kulistej w cieczy oraz przeprowadzenie testu sedymentacyjnego zawiesiny kredy w wodzie.

2. WIADOMOŚCI WPROWADZAJĄCE

Sedymentacja, czyli zjawisko opadania cząstek ciała stałego w cieczy, służy do zagęszczania zawiesiny pod wpływem działania pola grawitacyjnego. Warunkiem koniecznym jest w tym przypadku istnienie różnicy gęstości ciała stałego i cieczy.

Najprostszym przypadkiem opadania cząstek ciał stałych w płynach pod wpływem pola grawitacyjnego jest opadanie swobodne pojedynczej cząstki. Prędkość jej swobodnego opadania zależy od właściwości fizycznych płynu i samej cząstki, a w szczególności od różnicy gęstości cząstki i płynu, od rozmiaru i kształtu cząstki oraz lepkości płynnego środowiska w którym ruch się odbywa.

Bardziej złożony jest proces opadania cząstek ciała stałego w zawieszynie. Proces ten jest nazywany opadaniem zakłóconym lub sedymentacją zawiesiny. Ponieważ na ruch każdej cząstki w zawieszynie wpływa obecność opadających cząstek sąsiednich, prędkość opadania cząstek zależy również od stężenia ciała stałego.

Zawiesina jest układem dwufazowym składającym się z cząstek ciała stałego zawieszonych w cieczy. Jeżeli cząstki ciała stałego rozmieszczone są równomiernie w objętości zawiesiny, to uważa się ją za jednorodną, a w przeciwnym przypadku - za niejednorodną.

Zawartość ciała stałego w zawieszynie (stężenie ciała stałego) może być różna. Zawiesiny zawierające poniżej 10% obj. ciała stałego uważa się zazwyczaj za rozcieńczone, natomiast powyżej 70% obj. - za zagęszczone.

Cząstki ciała stałego w zawieszynie mogą mieć różne kształty, np. kuli, walca, prostopadłościanu lub innych brył o kształcie regularnym lub nieregularnym.

Wielkość rozmiarów kulistych cząstek ciała stałego określa się wprost za pomocą ich średnicy, a cząstek niekulistych - odpowiednio zdefiniowanej średnicy zastępczej. Cząstki ciała stałego o rozmiarach powyżej 100 μm noszą nazwę gruboziarnistych, a poniżej 30 μm - drobnoziarnistych.

Zawiesiny zawierające cząstki ciała stałego o takim samym kształcie, gęstości i takich samych rozmiarach nazywane są monodyspersyjnymi, a w innych przypadkach - polidyspersyjnymi.

Związki pomiędzy ilością ciała stałego, ilością cieczy i zawiesiny są wyrażane w postaci udziałów masowych lub objętościowych, przy czym, ze względu na ich różnorodność, w tabeli 1 podano sposoby ich określania.

Tabela 1

Sposoby wyrażania stężenia zawiesiny

Rodzaj stężenia	Oznaczenie	Jednostka
Udział masowy ciała stałego	c_s	kg ciała stałego / kg zawiesiny
Udział masowy cieczy	c_c	kg cieczy / kg zawiesiny
Udział objętościowy ciała stałego	φ	m^3 ciała stałego / m^3 zawiesiny
Udział objętościowy cieczy	ε	m^3 cieczy / m^3 zawiesiny
Koncentracja ciała stałego	C_s	kg ciała stałego / m^3 zawiesiny
Koncentracja cieczy	C_c	kg cieczy / m^3 zawiesiny

Kształt cząstek wchodzących w skład zawiesiny może być bardzo różnorodny. Takie określenia kształtu jak: iglasty, ostro krawędziowy (kanciasty), włóknisty, płatkowy, ziarnisty itp., mają jednak wyłącznie charakter jakościowy, a nie ilościowy. Istnieje wiele propozycji ilościowego ujęcia kształtu cząstek. Najczęściej w zagadnieniach sedymentacji stosuje się pojęcie sferyczności Ψ lub czynnika kształtu $1/\Psi$. Sferyczność definiowana jest jako stosunek powierzchni kuli o takiej samej objętości jak objętość danej cząstki do powierzchni cząstki, czyli

$$\Psi = 4,836 \frac{V_{cz}^{2/3}}{F_{cz}} \quad (1)$$

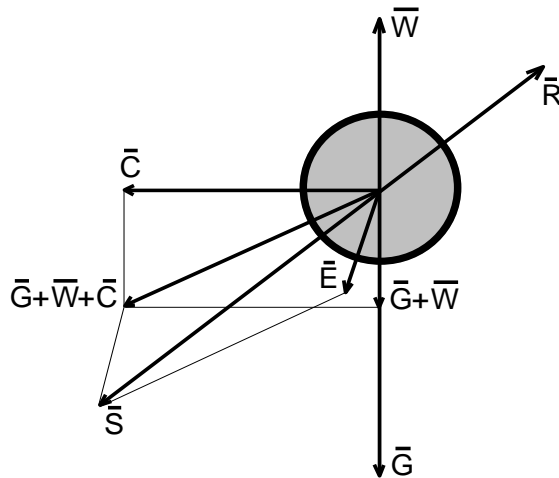
gdzie: V_{cz} - objętość cząstki ciała stałego, m^3 ;
 F_{cz} - pole powierzchni cząstki ciała stałego, m^2 .

Dla cząstek kulistych $\Psi=1$, a dla niekulistych $\Psi<1$, przy czym wartość Ψ maleje tym bardziej, im bardziej nieregularny jest kształt cząstki. Wartość

sferyczności, dla cząstek o różnym (aczkolwiek regularnym) kształcie podaje literatura, np. [1].

Pomijając jako nieistotny okres ruchu nieustalonego, a tym samym nie uwzględniając sił bezwładności, na pojedynczą cząstkę ciała stałego znajdującą się w płynie mogą działać następujące siły, (rys. 1):

- siła grawitacji \bar{G} ;
- siła wyporu \bar{W} ;
- siła wywołana ruchem wirowym płynu \bar{C} ;
- siła wywołana istnieniem pola elektrycznego \bar{E} .



Rys. 1. Układ sił działających na poruszającą się w płynie cząstkę ciała stałego

Wypadkowa \bar{S} tych sił jest więc równa $\bar{S} = \bar{G} + \bar{W} + \bar{C} + \bar{E}$. Jeżeli siła \bar{S} jest większa od zera, to cząstka zacznie się poruszać względem nieruchomego płynu z pewną prędkością w . Wówczas powstanie siła oporu ośrodka \bar{R} , o tym samym kierunku, lecz zwrocie przeciwnym do siły wypadkowej \bar{S} .

W ogólnym przypadku, siła oporu ośrodka zależy od: prędkości cząstki, wielkości i kształtu cząstki, gęstości i lepkości płynu; w szczególności zaś wynika z tego jaki charakter ma opływ płynu wokół cząstki: uwarstwiony, przejściowy czy burzliwy.

W równaniach opisujących ruch cząstek w płynie, siłę oporu ośrodka uwzględnia się poprzez tzw. liczbę oporu ośrodka. Liczba ta zależy z kolei od wartości liczby Reynoldsa dla płynu (czyli charakteru ruchu płynu wokół cząstki) oraz kształtu i rodzaju cząstki (jej sferyczności). W literaturze, np. [2],

można znaleźć wiele równań pozwalających na obliczenie liczby oporu ośrodka w różnych zakresach liczby Reynoldsa dla płynu opływającego cząstki kuliste i niekuliste.

Najbardziej istotnym dla przeprowadzenia opisywanego ćwiczenia jest sposób wyznaczenia prędkości opadania cząstki kulistej.

Dobór szczegółowego równania opisującego prędkość opadania cząstki wymaga określenia charakteru opływu płynu wokół niej. Charakter ten ustalić można jednak na podstawie wartości liczby Reynoldsa

$$Re = \frac{w_{cz} d_{cz} \rho_p}{\eta_p}, \quad (2)$$

gdzie: w_{cz} - prędkość ruchu cząstki, m/s;
 d_{cz} - średnica cząstki, m
 ρ_p - gęstość płynu, kg/m³;
 η_p - lepkość płynu, Pa·s.

czyli dysponując wartością poszukiwanej skądinąd prędkości. Z tego względu powyższy sposób postępowania przy wyznaczaniu prędkości opadania cząstki w płynie, wymaga stosowania żmudnej metody prób.

Dla potrzeb prowadzenia obliczeń nie wymagających dużej dokładności (np. szybkich obliczeń inżynierskich), do wyznaczania w_{cz} można wykorzystać wykres przedstawiony na rys. 2, a podawany szeroko w literaturze, np. [1].

Posługując się tym wykresem, korzysta się z ogólnego równania opisującego prędkość opadania cząstki

$$w_{cz} = \sqrt{\frac{4}{3} \frac{\rho_{cz} - \rho_p}{\rho_p} \frac{d_{cz} g}{\xi}} \quad (3)$$

w którym nie opisane dotąd symbole oznaczają:

ρ_{cz} - gęstość cząstki, kg/m³;
 g - przyspieszenie ziemskie, m/s²;
 ξ - liczba oporu ośrodka.

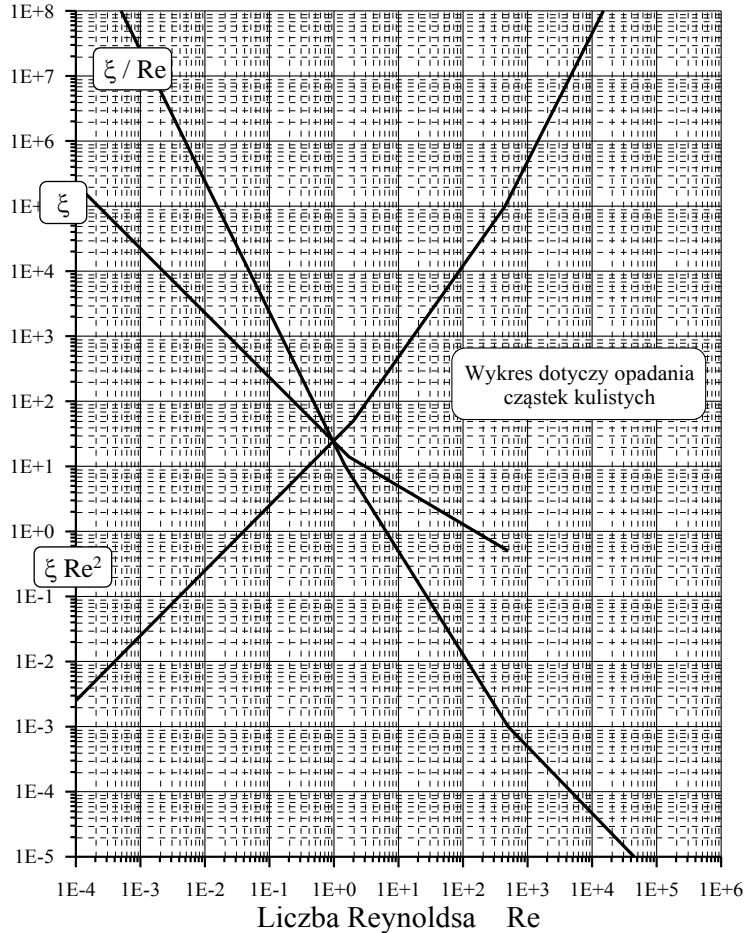
Wykorzystując równanie (2), zależność (3) można zapisać (po prostym przekształceniu) jako

$$\xi Re^2 = \frac{4}{3} \frac{d_{cz}^3 g (\rho_{cz} - \rho_p) \rho_p}{\eta_p^2}. \quad (4)$$

Dysponując wartościami prawej strony równania (4) oraz wykresem z rys. 2, można określić wartość Re , a tym samym, przekształcając zależność (2) do postaci

$$w_{cz} = \frac{Re \eta_p}{d_{cz} \rho_p} \quad (5)$$

poszukiwaną prędkość.

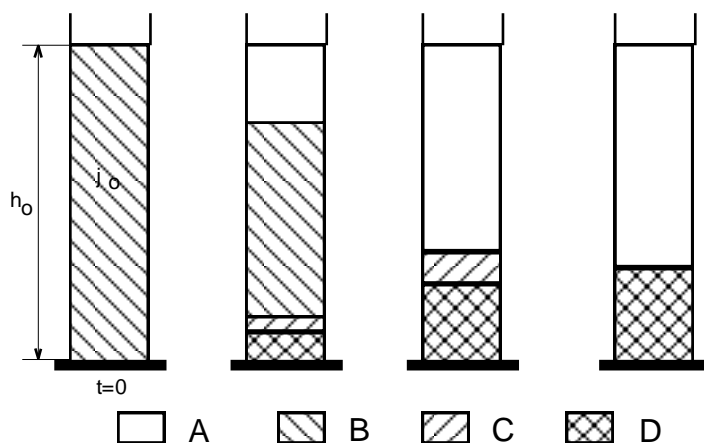


Rys. 2. Wykres do obliczania ruchu cząstek w płynie

Podczas sedymentacji zawiesin na ruch każdej cząstki wpływa obecność opadających cząstek sąsiednich. Wpływ oddziaływań innych cząstek na ruch cząstki rozważanej, ujawnia się już przy odległości pomiędzy cząstkami równej dziesięciu ich średnicom. Odpowiada to objętościowemu stężeniu ciała stałego w zawieszynie mniejszemu od 0,1 %. Sedymentacja zawiesin cząstek ciała stałego o jednakowych rozmiarach i gęstości przebiega w ten sposób, że cząstki opadają z taką samą prędkością. Jeżeli cząstki mają różne rozmiary (zawieszina

polidispersyjna), to ich prędkość opadania jest różna. W obu jednak przypadkach opis analityczny ruchu cząstek jest jak dotąd nieznan. Z tego też względu w praktyce, dla wyznaczania prędkości opadania cząstek (prędkości sedymentacji), przeprowadza się tzw. test sedymentacyjny.

Badanie to polega na obserwacji zachowania się zawiesiny umieszczonej w przezroczystym cylindrze, rys. 3.

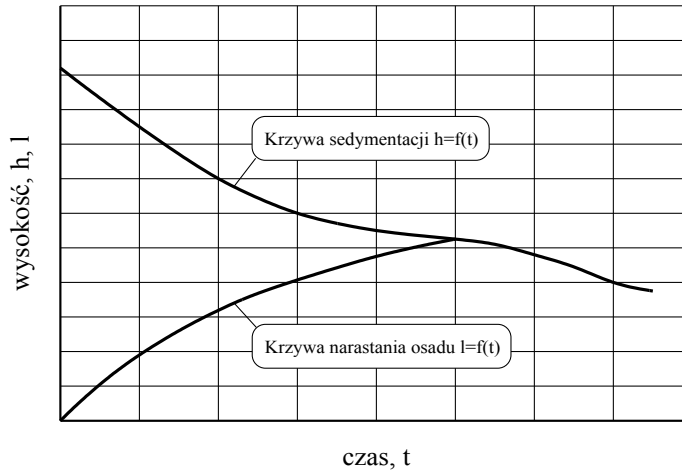


Rys. 3. Przebieg testu sedymentacyjnego

A - ciecz czysta, B - zawiesina o stałym stężeniu, C - zawiesina o zmiennym stężeniu, D - osad

Początkowa wysokość słupa zawiesiny wynosi h_0 , a jej początkowe stężenie, jednakowe w każdym miejscu, równe jest ϕ_0 . Ten stan początkowy dotyczy czasu $t = 0$. Od tego momentu rozpoczyna się sedymentacja zawiesiny. U góry cylindra pojawia się granica między cieczą a zawiesiną i równocześnie na dnie naczynia zaczyna narastać osad. Powstają zatem trzy strefy: ciecz czysta A, zawiesina B, osad D. Podczas sedymentacji niektórych zawiesin, strefa zawiesiny może składać się z dwóch części: górnej B - o stałym stężeniu i dolnej C - o zmiennym stężeniu. Z upływem czasu ilość zawiesiny zmniejsza się, a ilość osadu narasta. W pewnym momencie granice między cieczą a zawiesiną i zawiesiną a osadem stykają się ze sobą tworząc powierzchnię rozdziału między cieczą a osadem. Osad ulega dalszemu zagęszczeniu, aż do osiągnięcia stężenia końcowego ϕ_{max} . Na podstawie zmierzonych wysokości położenia górnej i dolnej granicy rozdziału w zależności od czasu, sporządza się wykres przedstawiony na rys. 4. Krzywa $h=f(t)$ nosi nazwę krzywej sedymentacji zawiesiny, natomiast krzywa $l=f(t)$ nazywa się krzywą narastania osadu. Na krzywej sedymentacji można wyróżnić trzy charakterystyczne części:

początkową część prostoliniową i dwie dalsze części krzywoliniowe, rozdzielone punktem przecięcia krzywej sedymentacji z krzywą narastania osadu. Punkt ten nosi nazwę punktu krytycznego krzywej sedymentacji. Część prostoliniowa krzywej sedymentacji odzwierciedla fakt występowania w cylindrze strefy zawiesiny o stałym stężeniu. Pierwsza część krzywoliniowa



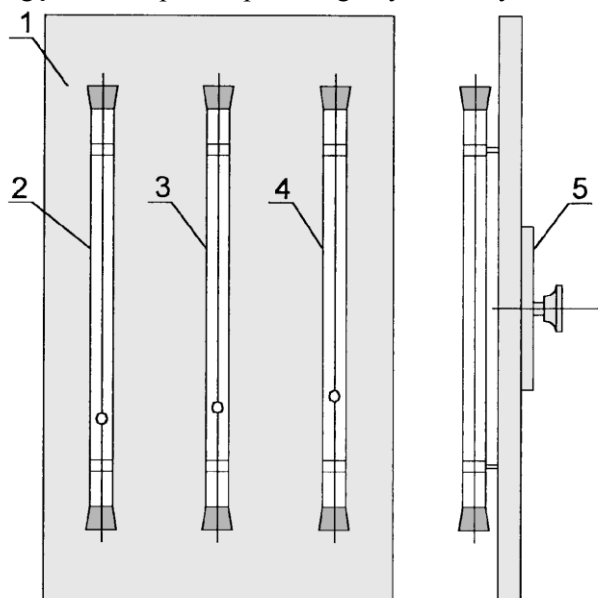
Rys. 4. Krzywa sedymentacji i linia narastania osadu

wskazuje na występowanie strefy zawiesiny o zmiennym stężeniu. Druga część krzywoliniowa przedstawia zagęszczenie osadu do stężenia ϕ_{\max} , któremu odpowiada minimalna wysokość warstwy osadu. W zależności od rodzaju zawiesiny, krzywe sedymentacji mogą mieć również inny kształt.

3. OPIS STANOWISKA LABORATORYJNEGO

Stanowisko pomiarowe składa się z dwóch niezależnych części. Schemat pierwszej z nich, służącej do wyznaczenia prędkości opadania swobodnego cząstki kulistej, przedstawiono na rys. 5. Składa się ono z umieszczonej na mechanizmie obrotowym pionowej płyty. Mechanizm obrotowy, współpracując z mechanizmem blokującym, pozwala na obracanie płyty o kąt 180° . Na płycie znajdują się trzy szklane rury, (przymocowane do niej za pomocą specjalnych uchwytów), wypełnione różnymi cieczami: wodą, olejem i gliceryną. Rury zamknięto gumowymi korkami oraz zabezpieczono obejmami z drutu. W razie konieczności istnieje możliwość otworzenia rur i wymiany cieczy. W każdej rurze znajduje się kulka o znanej średnicy i gęstości wykonana ze specjalnie spreparowanej modeliny. Preparacja ta miała na celu uzyskanie różnej gęstości materiału kulek, co przy podobnej ich średnicy zapewnia różny ciężar opadających cząstek. Kulka o największym ciężarze umieszczona została w

cieczy o największej lepkości i odwrotnie, kulka najlżejsza w środowisku najmniej lepkiem. Na rurkach naniesione są kreski określające odcinek drogi (80 cm), na długości której dokonuje się pomiaru czasu opadania kulek. Na płycie, dla potrzeb opracowania wyników doświadczenia, zostały umieszczone charakterystyki gęstości i lepkości poszczególnych cieczy oraz wykres $\xi=f(\text{Re})$.



Rys. 5. Schemat stanowiska pomiarowego

1 - płyta, 2 - rurka z wodą (kulka: $d_{cz} = 15,5 \text{ mm}$; $\rho_{cz} = 1231 \text{ kg/m}^3$), 3 - rurka z olejem (kulka: $d_{cz} = 15,3 \text{ mm}$; $\rho_{cz} = 1264 \text{ kg/m}^3$), 4 - rurka z gliceryną (kulka: $d_{cz} = 15,2 \text{ mm}$; $\rho_{cz} = 1305 \text{ kg/m}^3$), 5 - element obrotowy.

Druga część stanowiska to przyrząd do prowadzenia testu sedymentacyjnego. Stanowi go menzurka o pojemności nominalnej 500 cm^3 . Umieszczona z boku menzurki skala milimetrowa umożliwia kontrolę wysokości tworzącego się osadu i warstwy cieczy czystej.

4. PRZEBIEG ĆWICZENIA

W celu wyznaczenia prędkości opadania swobodnego cząstek kulistych w różnych cieczach należy:

- a) zmierzyć temperaturę cieczy w rurach (poprzez pomiar temperatury panującej w laboratorium) oraz przygotować trzy stopery;

- b) obrócić płytę z rurami o kąt 180° , pamiętając o zwolnieniu i powtórnym uruchomieniu elementu blokującego umieszczonego z tyłu płyty;
- c) w miarę przekraczania przez kulki górnych kresek naniesionych na rurach, uruchamiać pomiar czasu;
- d) zanotować w tabeli czas przebycia przez poszczególne kulki ich odcinków pomiarowych wyznaczonych przez kreski na rurach;
- e) pomiary wykonać trzykrotnie, uśredniając otrzymane wyniki.

Prędkość swobodnego opadania kulistych cząstek w cieczy					
Droga opadania: 80 cm					
Temperatura cieczy: °C					
WODA		OLEJ		GLICERYNA	
$d_{cz} = 15,5 \text{ mm}$		$d_{cz} = 15,3 \text{ mm}$		$d_{cz} = 15,2 \text{ mm}$	
$\rho_{cz} = 1231 \text{ kg/m}^3$		$\rho_{cz} = 1264 \text{ kg/m}^3$		$\rho_{cz} = 1305 \text{ kg/m}^3$	
$\rho_p = \dots\dots\dots \text{ kg/m}^3$		$\rho_p = \dots\dots\dots \text{ kg/m}^3$		$\rho_p = \dots\dots\dots \text{ kg/m}^3$	
$\eta_p = \dots\dots\dots \text{ mPa} \cdot \text{s}$		$\eta_p = \dots\dots\dots \text{ mPa} \cdot \text{s}$		$\eta_p = \dots\dots\dots \text{ mPa} \cdot \text{s}$	
czas ruchu cząstki	prędkość opadania cząstki	czas ruchu cząstki	prędkość opadania cząstki	czas ruchu cząstki	prędkość opadania cząstki
s	cm/s	s	cm/s	s	cm/s

W celu przeprowadzenia testu sedymentacyjnego zawiesiny należy:

- a) przygotować zawiesinę kredy w wodzie;
- b) po zmierzeniu temperatury dobrze wymieszanej zawiesiny, wlać określoną objętość zawiesiny do menzurki pomiarowej;
- c) włączyć stoper i w miarę upływu czasu rejestrować w tabeli wysokość tworzących się warstw osadu i czystej cieczy;
- d) po zakończeniu pomiarów oczyścić menzurkę z zawiesiny.

Test sedymentacyjny			
Skład zawiesiny: kreda i woda			
Koncentracja ciała stałego: $C_s = \dots\dots\dots \text{ kg kredy} / \text{m}^3 \text{ wody}$			
Temperatura zawiesiny: °C			
OSAD		CIECZ CZYSTA	
wysokość warstwy	czas tworzenia się warstwy	wysokość warstwy	czas tworzenia się warstwy
mm	s	mm	s
1			
3			
5			

...			
-----	--	--	--

5. ZAKRES OPRACOWANIA WYNIKÓW

1. W odniesieniu do pomiarów prędkości swobodnego opadania kulek, porównać otrzymane wyniki pomiarów z wynikami otrzymanymi na drodze analitycznej.
2. W odniesieniu do testu sedymentacyjnego, sporządzić krzywą sedymentacji i krzywą narastania osadu.
3. Podać wnioski z przeprowadzonego ćwiczenia.

6. LITERATURA UZUPEŁNIAJĄCA

- [1] TRONIEWSKI L. i inni: Tablice do obliczeń procesowych, Skrypt PO nr 189, Opole 1996
- [2] SERWIŃSKI M.: Zasady inżynierii chemicznej, WNT W-wa 1976

7. TEMATYKA ZAGADNIEŃ KONTROLNYCH

1. Istota procesu sedymentacji.
2. Siły działające na cząstkę ciała stałego poruszającą się w płynie.
3. Systematyka zawiesin.
4. Przebieg testu sedymentacyjnego.
5. Wpływ kształtu i wymiaru cząstek oraz stężenia zawiesiny na przebieg procesu sedymentacji.

Ćwiczenie 8:

BADANIE PROCESU FILTRACJI ZAWIESINY

1. CEL ĆWICZENIA

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z przebiegiem procesu filtracji izobarycznej oraz wyznaczenie stałych filtracji i współczynnika ściśliwości osadu.

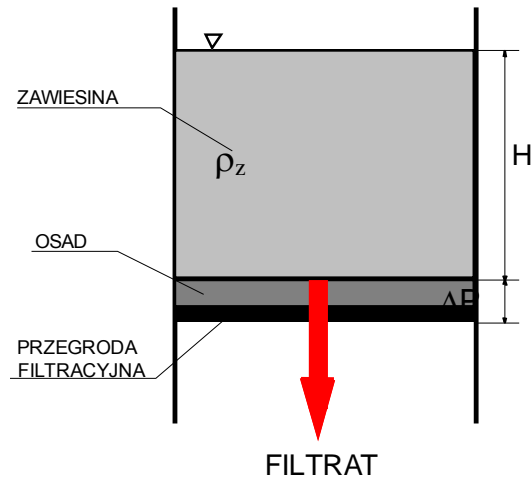
2. WIADOMOŚCI WPROWADZAJĄCE

Filtracją nazywa się operację technologiczną polegającą na oddzielaniu składników mieszaniny cieczy lub gazu od cząsteczek ciał stałych. Operacja ta prowadzona jest w urządzeniach (filtrach). Filtracja zawiesiny polega na zatrzymywaniu przez przegrodę filtracyjną cząstek ciała stałego, a przepuszczaniu przez tę przegrodę cieczy, którą nazywa się przesączem lub filtratem.

Przegroda filtracyjna może mieć strukturę ziarnistą lub włóknistą. Przykładem przegród filtracyjnych mogą być: warstwa piasku, tkanina z materiałów włóknistych, naturalnych lub sztucznych, porowate wyroby ceramiczne itp. Sama przegroda filtracyjna ma zwykle małą zdolność filtrowania i dlatego jako warstwa filtrująca wykorzystywany jest tworzący się na przegrodzie osad. Ponieważ w trakcie trwania procesu, porowatość warstwy osadu (tzw. placka filtracyjnego) zmienia się zwykle w istotny sposób (maleje), ściśliwość osadu ma duży wpływ na przebieg filtracji.

Siłą pod wpływem działania której w trakcie filtracji ma miejsce przepływ płynu, jest różnica ciśnienia przed i za przegrodą filtracyjną. Ze względu na sposób wytwarzania tej różnicy, filtrację można podzielić na:

- grawitacyjną - różnica ciśnienia wywołana jest parciem hydrostatycznym słupa zawiesiny nad przegrodą, rys. 1.
- ciśnieniową - nadciśnienie przed przegrodą wywołane jest zwykle pompą tłoczącą zawiesinę;
- próżniową - podciśnienie za przegrodą wywołane jest pompą próżniową;
- wirówkową - różnica ciśnienia po obu stronach przegrody wywołana jest działaniem siły odśrodkowej.



Rys. 1. Schemat filtracji grawitacyjnej, $\Delta P = \rho_z g H$

Zmiany wartości różnicy ciśnienia po obu stronach przegrody w trakcie trwania procesu filtracji, związane są bezpośrednio ze sposobem w jaki się go prowadzi. W praktyce wykorzystuje się trzy sposoby:

- filtrację przy stałej różnicy ciśnienia (izobaryczną) - w tym przypadku wraz z upływem czasu trwania procesu, zwiększa się grubość osadu na filtrze (a tym samym jego opór) i wydajność filtracji maleje;
- filtrację przy stałej wydajności filtratu - w miarę upływu czasu, zwiększa się wartość różnicy ciśnienia w stopniu proporcjonalnym do zwiększania oporu warstwy osadu;
- filtrację dwustopniową - w pierwszym okresie proces zachodzi przy stałej niewielkiej wydajności filtratu (mała ΔP). Po utworzeniu się na przegrodzie warstwy osadu o odpowiednich właściwościach filtracyjnych rozpoczyna się okres drugi - filtracja pod stałym ciśnieniem (duża ΔP).

Niezależnie od sposobu prowadzenia procesu, filtracji mogą być poddawane zawiesiny z osadami nieściśliwymi i osadami ściśliwymi. Ściśliwość osadu ma bezpośredni wpływ na wydajność filtracji i wymagane warunki jej prowadzenia. Współczynnik ściśliwości dla typowych osadów podaje literatura, np. [1, 2].

Ponieważ produktem filtracji może być zarówno przesącz jak i osad (lub też oba z nich), dlatego niejednokrotnie proces prowadzony jest na filtrze w dwóch etapach:

- etap I - filtracja właściwa dla otrzymania filtratu;

- etap II - przemywanie osadu w celu oczyszczenia go lub dodatkowego odzyskania fazy ciekłej zawartej w mokrym osadzie.

Filtracja izobaryczna

Ogólne równanie opisujące przebieg filtracji z wydzieleniem osadu nieściśliwego ma postać

$$\frac{dV}{F d\tau} = \frac{\Delta P}{\alpha_o \eta_c \left(\frac{V C_s}{F} + r \right)} \quad (1)$$

gdzie: V - objętość filtratu, m^3 ;

F - powierzchnia przegrody filtracyjnej, m^2 ;

τ - czas trwania filtracji, s ;

ΔP - różnica ciśnień przed i za przegrodą filtracyjną, Pa ;

α_o - opór właściwy osadu wydzielonego na przegrodzie, m/kg ;

η_c - lepkość cieczy, $Pa \cdot s$;

C_s - koncentracja ciała stałego w filtrowanej zawieszynie, kg/m^3 ;

r - jednostkowa ilość wydzielonego osadu, zapewniająca opór przepływu filtratu przez ten osad, równoważny oporom przepływu filtratu przez samą przegrodę filtracyjną, kg/m^2 .

W przypadku filtracji zachodzącej z wydzieleniem osadu ściśliwego, uwzględnić należy zmiany oporu właściwego placka filtracyjnego. Zmiany te wyraża empiryczne równanie

$$\alpha_o = \alpha_{o,śc} \Delta P^s \quad (2)$$

w którym: $\alpha_{o,śc}$ - opór właściwy osadu ściśliwego, $(m/kg) \cdot (m \cdot s^2/kg)^s$;

ΔP - różnica ciśnień przed i za przegrodą filtracyjną, Pa ;

s - współczynnik ściśliwości placka filtracyjnego.

Po podstawieniu zależności (2) do równania (1) i pewnym uporządkowaniu wielkości

$$dV = \frac{F \Delta P^{1-s}}{\alpha_{o,śc} \eta_c \left(\frac{V C_s}{F} + r \right)} d\tau \quad (3)$$

Scałkowanie zależności (3), przy założeniu $\Delta P = \text{const}$ (filtracja izobaryczna), w granicach od $V=0$ do $V=V_\tau$ oraz od $\tau=0$ do $\tau=\tau_f$ prowadzi do równania

$$\mathbf{V}_\tau = \frac{2}{\alpha_{o,\acute{s}} \eta_c \left(\frac{\mathbf{V}_\tau C_s}{F} + 2r \right)} F \Delta P^{1-s} \tau_f \quad (4)$$

w którym: \mathbf{V}_τ - objętość filtratu uzyskana po czasie τ_f , m³;
 τ_f - czas trwania filtracji izobarycznej, s.

Przyjmując oznaczenie objętości otrzymywanego filtratu jedynie symbolem \mathbf{V} i czasu filtracji symbolem τ , równanie (4) można sprowadzić, po pewnych przekształceniach, do postaci liniowej

$$\frac{\tau}{\mathbf{V}} = K_1 \frac{\mathbf{V}}{F} + C_1 \quad (5)$$

lub (częściej podawanej w literaturze) postaci parabolicznej

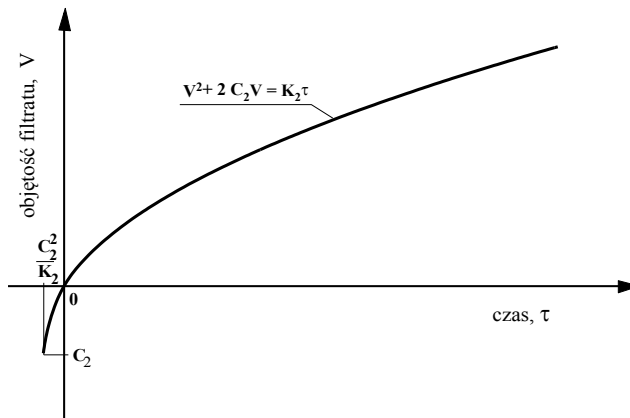
$$\mathbf{V}^2 + 2 \mathbf{V} C_2 = K_2 \tau \quad (6)$$

w których poszczególne wielkości stałe C i K wyrażane są jako

$$C_1 = \frac{\alpha_{o,\acute{s}} \eta_c r}{\Delta P^{1-s}} \quad ; \quad K_1 = \frac{\alpha_{o,\acute{s}} \eta_c C_s}{2 \Delta P^{1-s}}, \quad (7)$$

$$C_2 = \frac{F r}{C_s} \quad ; \quad K_2 = \frac{2 \Delta P^{1-s} F^2}{\alpha_{o,\acute{s}} \eta_c C_s}, \quad (8)$$

Interpretację równania (6) przedstawiono na rys. 2.



Rys 2. Zależność objętości filtratu od czasu filtracji, przy $\Delta P = \text{const}$

Paraboliczny przebieg zależności (1) oznacza, że wraz z upływem czasu otrzymywać się będzie coraz mniejszy strumień filtratu. Taki przebieg procesu podyktowany jest stałą wartością różnicy ciśnienia i zwiększającym się w sposób ciągły oporem warstwy osadu. Bezpośredni wpływ na szczegółową postać równania (6), dotyczącego konkretnego procesu, mają wartości stałych C_2 i K_2 nazywane stałymi filtracji. Sens fizyczny stałej C_2 można określić jako taką objętość filtratu po otrzymaniu której na filtrze uzyskiwana jest warstwa osadu o grubości zapewniającej opór filtracji równoważny oporowi samej tkaniny filtracyjnej. Sens fizyczny stałej K_2 jest natomiast taki, że wyrażenie C_2^2/K_2 określa czas po upływie którego na przegrodzie utworzy się placek o oporze równoważnym oporowi samej tkaniny filtracyjnej.

W praktyce, stałe filtracji wyznacza się (dla danego procesu) na drodze eksperymentalnej. Ze względu na to, że badania prowadzi się w skali laboratoryjnej, na filtrach o mniejszej powierzchni niż w aparatach rzeczywistych, dokonać należy pewnej modyfikacji równania (6), a mianowicie odnieść je do wielkości powierzchni filtracyjnej

$$\frac{\mathbf{V}^2}{F^2} + \frac{2\mathbf{V}C_2}{F^2} = \frac{K_2 \tau}{F^2} \quad (9)$$

a oznaczając:

$$C' = \frac{C_2}{F}, \quad K' = \frac{K_2}{F^2}, \quad \mathbf{V}' = \frac{\mathbf{V}}{F},$$

przedstawić w postaci

$$\mathbf{V}'^2 + 2C\mathbf{V}' = K'\tau. \quad (10)$$

W tak zapisanym równaniu filtracji izobarycznej, wartości z „primem” odniesione są do wielkości powierzchni filtracyjnej. Po różniczkowaniu równania (9) i prostych przekształceniach otrzymujemy zależność

$$\frac{d\tau}{d\mathbf{V}'} = \frac{2\mathbf{V}'}{K'} + \frac{2C'}{K'} \quad (11)$$

a po zastąpieniu różniczek różnicami

$$\frac{d\tau}{d\mathbf{V}'} \approx \frac{\Delta\tau}{\Delta\mathbf{V}'} = \frac{2\mathbf{V}'}{K'} + \frac{2C'}{K'} \quad (12)$$

czyli równanie linii prostej w postaci funkcji $\Delta\tau/\Delta\mathbf{V}' = f(\mathbf{V}')$.

Dysponując danymi eksperymentalnymi dotyczącymi przyrostów objętości filtratu w czasie, można zbudować wykres (rys. 3) i na jego podstawie wyznaczyć wartości stałych filtracji dla interesującego przypadku. Wyznaczone

w ten sposób stałe filtracji dla procesu laboratoryjnego, można odnieść do filtra o rzeczywistych rozmiarach wykorzystując zależności

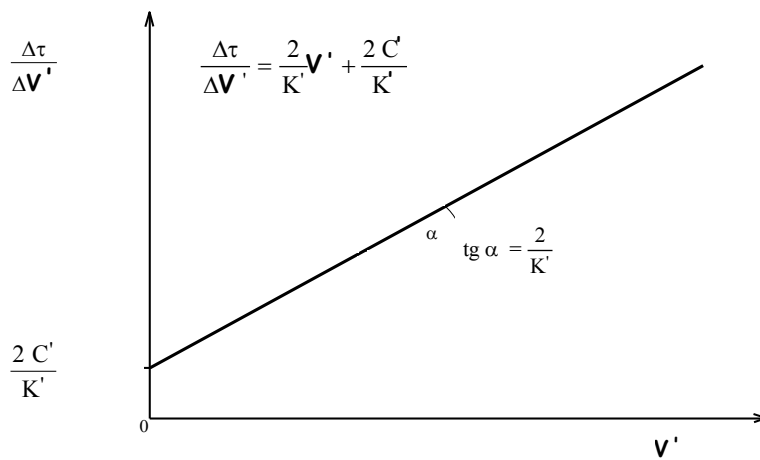
$$C_2 = C' F \quad ; \quad K_2 = K' F^2, \quad (13)$$

w których F oznacza wielkość rzeczywistej powierzchni filtracyjnej.

Dla określenia współczynnika ściśliwości osadu należy dysponować stałymi filtracji wyznaczonymi przy dwóch odmiennych stałych różnicach ciśnienia (ΔP_1 i ΔP_2). Odnosząc stałą filtracji K_2 do powierzchni filtru otrzymuje się

$$K' = \frac{K_2}{F^2} = \frac{2}{\alpha_{o,ś} \eta_c C_s} \Delta P^{1-s} = a \Delta P^{1-s} \quad (14)$$

gdzie: a - wartość stała dla danego procesu filtracji.



Rys. 3. Graficzny sposób wyznaczania stałych filtracji izobarycznej

Dla procesów prowadzonych przy dwóch stałych różnicach ciśnienia

$$\begin{cases} K'_1 = a \Delta P_1^{1-s} \\ K'_2 = a \Delta P_2^{1-s} \end{cases} \quad (15)$$

gdzie: K'_1 - stała wyznaczona przy różnicy ciśnienia ΔP_1 , m^2/s ;

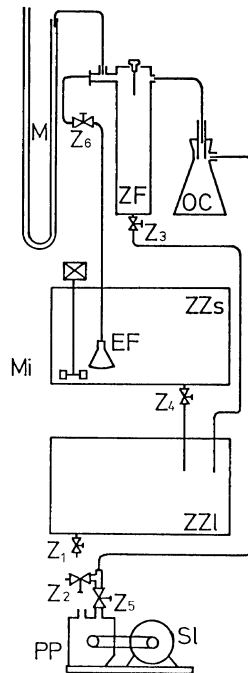
K'_2 - stała wyznaczona przy różnicy ciśnienia ΔP_2 , m^2/s .

Przekształcając powyższy układ równań, współczynnik ściśliwości

$$s = 1 - \left(\lg \frac{K'_1}{K'_2} / \lg \frac{\Delta P_1}{\Delta P_2} \right) \quad (16)$$

3. OPIS STANOWISKA LABORATORYJNEGO

Schemat stanowiska pomiarowego przedstawiono na rys. 4. Składa się ono z elementu filtracyjnego EF umieszczonego w zbiorniku zawiesiny ZZs. Element filtracyjny stanowi perforowana przegroda metalowa o powierzchni $0,01 \text{ m}^2$, pokryta bawełnianą tkaniną filtracyjną. Różnica ciśnienia po obu stronach przegrody filtracyjnej wytwarzana jest za pomocą pompy próżniowej PP napędzanej silnikiem elektrycznym SI. Filtrat zasysany jest do zbiornika ZF zaopatrzonego w podziałkę umożliwiającą pomiar objętości cieczy. Na przewo-



Rys. 4. Schemat stanowiska pomiarowego do badania procesu filtracji

EF - element filtrujący, ZZs - zbiornik zawiesiny, ZF - zbiornik filtratu, OC - oddzielacz ciecży, M - manometr U-rurkowy z rtęcią, PP - pompa próżniowa, SI - silnik elektryczny, Mi - mieszadło, Z - zawory, ZZI - zbiornik zlewczy

dzie łączącym zbiornik filtratu z pompą próżniową zainstalowany został oddzielacz kropel ciecży OC. Podciśnienie w zbiorniku filtratu mierzone jest manometrem U-rurkowym M wypełnionym rtęcią. W zbiorniku zawiesiny umieszczono mieszadło Mi. Zbiornik zlewczy ZZI służy do gromadzenia filtratu uzyskanego w kolejnych seriach pomiarowych.

4. METODYKA PROWADZENIA POMIARÓW

W celu przeprowadzenia badań filtracji izobarycznej należy:

- przygotować w zbiorniku ZZs zawiesinę kredy w wodzie o określonej koncentracji ciała stałego;
- po zamknięciu zaworu Z_6 , zanurzyć element filtrujący w zawieszynie i włączyć pompę próżniową;
- za pomocą zaworów Z_2 i Z_5 ustalić wymaganą różnicę ciśnień na elemencie filtrującym. Ciśnienie kontrolować manometrem M;
- otworzyć zawór Z_6 włączając jednocześnie pomiar czasu;
- w trakcie trwania procesu notować objętość otrzymanego filtratu w czasie. Do każdego odczytanego wyniku dodać objętość przesączu zawartą w węży łączącym element filtracyjny ze zbiornikiem filtratu, $V_o = 3,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$;
- wyniki notować w tabeli;
- powtórzyć pomiary przy innej wartości różnicy ciśnienia;
- po zakończeniu pomiarów wyłączyć pompę i zlać filtrat do zbiornika ZZl.

Badanie procesu filtracji izobarycznej					
Rodzaj zawiesiny: kreda w wodzie					
Koncentracja ciała stałego: kg kredy / m^3 zawiesiny					
Powierzchnia filtracyjna: $F=0,01 \text{ m}^2$					
Temperatura zawiesiny: $^{\circ}\text{C}$					
Objętość $V_o = 3,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 = 0,35 \text{ l}$					
ΔP	V	τ	V'	$\Delta V'$	$\Delta \tau$
mm Hg	l	s	m^3/m^2	m^3/m^2	s
100					
200					

5. ZAKRES OPRACOWANIA WYNIKÓW

- Sporządzić charakterystyki $V'=f(\tau)$ dla obu serii pomiarowych.
- Wyznaczyć wartości stałych filtracji C' i K' .
- Wyznaczyć współczynnik ściśliwości osadu.
- Podać wnioski z przeprowadzonego ćwiczenia

6. LITERATURA UZUPEŁNIAJĄCA

[1] KOCH R., NOWORYTA A.: Procesy mechaniczne w inżynierii chemicznej,
WNT W-wa 1992

[2] TRONIEWSKI L. i inni.; Tablice do obliczeń procesowych, Skrypt PO nr
189, Opole 1996

7. TEMATYKA ZAGADNIENÍ KONTROLNYCH

1. Sposoby prowadzenia procesu filtracji.
2. Wymagania stawiane przegrodom filtracyjnym.
3. Znaczenie stałych filtracji i sposoby ich określania.
4. Wpływ ściślności osadu na przebieg procesu filtracji.

Ćwiczenie 9:

OKREŚLANIE STANÓW ZŁOŻA FLUIDALNEGO

1. CEL ĆWICZENIA

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z różnymi stanami warstwy fluidalnej oraz eksperymentalne wyznaczenie prędkości początku fluidyzacji.

2. WIADOMOŚCI WPROWADZAJĄCE

Fluidyzacja jest to proces dwufazowy polegający na tym, że warstwa materiału sypkiego ułożona na ruszcie jest doprowadzana do stanu pseudopłynnego za pomocą strugi płynu tłoczonego z dołu. Tak utworzona warstwa fluidalna znajduje się w stanie quasi stabilnym tylko w pewnym przedziale prędkości przepływu gazu (lub cieczy), zależnym od rozmiarów cząstek i stosunku gęstości obu faz. Warstwa fluidalna zachowuje się jak ciecz ze względu na brak sztywności postaciowej oraz ze względu na obecność ciśnienia hydrostatycznego i lepkości. Cząstki ciała stałego charakteryzują się najczęściej rozmiarem od 25 μm do 3 mm.

Zalety złoża fluidalnego w porównaniu ze złożem stałym są następujące:

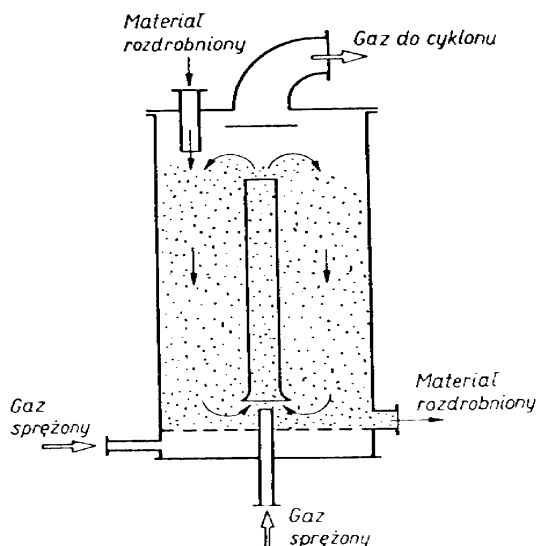
- szybkie wyrównywanie się temperatury w złożu,
- duże współczynniki wnikania ciepła i masy,
- duża powierzchnia czynna złoża,
- możliwość prowadzenia procesu z ciałem stałym tak jak z cieczą.

Natomiast do wad warstwy fluidalnej zalicza się:

- znacznie mniejsze niż w przypadku złoża nieruchomego stężenie ciała stałego,
- straty ciała stałego na skutek ścierania,
- powstawanie pyłu,
- erozja ścianek aparatu.

Zastosowanie fluidyzacji jest bardzo duże i ciągle zwiększa się w procesach katalitycznych (jak np. krakowanie, synteza benzyny) i niekatalitycznych (spalanie węgla, wytwarzanie węgla aktywnych, zgazowanie węgla itp.). Zjawisko to jest także praktycznie stosowane w procesach fizycznych, np.

podczas mieszania, transportu materiałów rozdrobnionych, ochładzania czy podgrzewania, adsorpcji i suszenia. Przykład aparatu w którym wykorzystywany jest proces fluidyzacji przedstawia rys. 1.



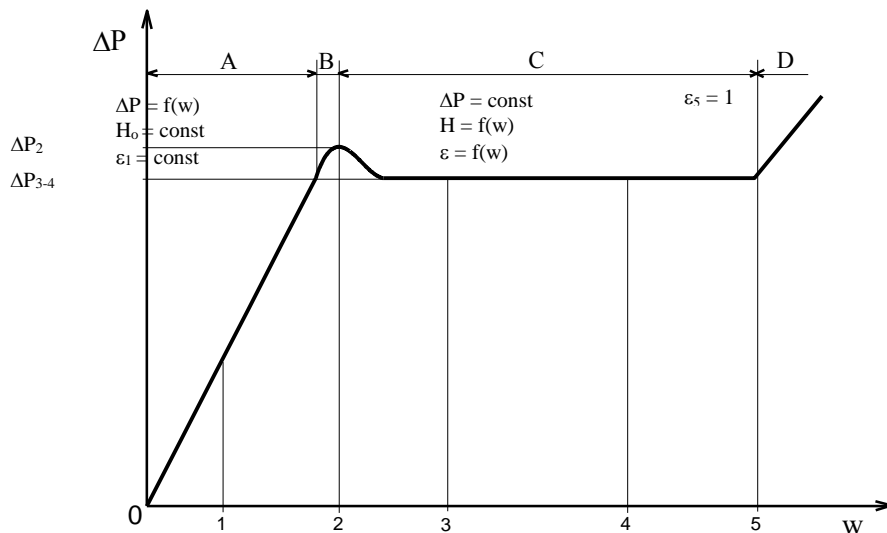
Rys. 1. Mieszalnik fluidyzacyjny

Obecnie coraz szersze zastosowanie przemysłowe znajdują aparaty z trójfazowym złożem fluidalnym. W aparatach tego typu, jedna z substancji roboczych występuje w postaci gazu, a druga w postaci cieczy. Obecność fluidalnego stałego wypełnienia (niekiedy spełniającego również rolę katalizatora) w środowisku kontaktującego się gazu i cieczy, intensyfikuje procesy wymiany ciepła i masy. Aparaty ze złożem trójfazowym mogą pracować jako współ- lub przeciwprądowe. W aparatach współprądowych strumienie gazu i cieczy przechodzą od dołu ku górze przez warstwę fluidowanego złoża. W aparatach przeciwprądowych złożo jest zraszane cieczą od góry, a gaz przepływa w kierunku przeciwnym, powodując jednocześnie „upłynnienie” warstwy ciała stałego.

Strata ciśnienia płynu przepływającego przez złożo nieruchome zwiększa się z kwadratem prędkości. W momencie, gdy nadciśnienie przewyższa ciśnienie statyczne ładunku, następuje niewielka jego ekspansja, a podczas dalszego zwiększania prędkości przepływu ładunek przechodzi w stan fluidalny.

Różne stany warstwy fluidalnej dogodnie jest przedstawiać na tle wykresu $\Delta P=f(w)$, gdzie ΔP jest stratą ciśnienia na grubości warstwy, a w prędkością przepływu płynu.

Zgodnie z wykresem przedstawionym na rys. 2, wyróżnić można następujące stany warstwy ciała stałego.



Rys. 2. Charakterystyka warstwy ciała stałego w układzie podwójnie logarytmicznym
 A - warstwa nieruchoma, B - warstwa ruchoma, C - warstwa fluidalna,
 D - transport pneumatyczny

Stan nieruchomy warstwy jest określony jako stan 1. Cząstki są wtedy nieruchome i podtrzymywane przez kontakt z innymi cząstkami. Spoczywają one na ruszcie, który nie tylko utrzymuje warstwę, lecz także równomiernie rozdziela tłoczony od dołu płyn. Strata ciśnienia zwiększa się wraz ze zwiększaniem prędkości w . Warstwa charakteryzuje się minimalną porowatością ϵ_1 , wynikającą z wzajemnego ułożenia cząstek, a także odpowiadającą tej porowatości wysokością H_1 . Przepływ gazu ma charakter typowy dla przepływów przez warstwę sypką lub porowatą.

Warstwa ruchoma odpowiada stanowi 2. Warstwa nieruchoma zostaje rozluźniona, przy czym cząstki pozostają w dalszym ciągu we wzajemnym kontakcie i nie zmieniając położenia względem siebie przesuwiają się względem ścian aparatu fluidyzacyjnego. Wykonują przy tym oscylacyjne ruchy z małą amplitudą, tak jakby były zawieszony w strudze płynu. Wspomniane rozluźnienie warstwy następuje wtedy, gdy nadciśnienie płynu zrówna się z ciśnieniem wywieranym przez warstwę. Taki stan oznacza początek fluidyzacji, odpowiada mu prędkość początku fluidyzacji $w = w_2$, porowatość ϵ_2 i wysokość warstwy H_2 . Strata ciśnienia ΔP_2 jest wówczas największa. Pojawia się lokalne maksimum, spowodowane siłami wzajemnego oddziaływania

cząstek ciała stałego tworzącego złożę. W przypadku cząstek dużych siły te są jednak małe i maksimum to nie występuje.

Warstwa fluidalna odpowiada stanom 3 i 4. Gdy zostanie przekroczona prędkość w_2 wówczas powstaje warstwa fluidalna z fazą gęstą, którą charakteryzuje wyraźnie zaznaczona górna granica. Gdy prędkość gazu dalej zwiększa się, warstwa zwiększa swą wysokość oraz porowatość (średnią). Drobne cząstki przemieszczają się do góry, tworząc tzw. fazę rzadką czyli zawiesinę o małym stężeniu (dużej porowatości), nie mającą górnej powierzchni swobodnej. Pomiedzy fazą gęstą a rzadką utrzymuje się dosyć wyraźna granica. Porowatość warstwy fluidalnej zmienia się zatem w przedziale $\varepsilon_2 < \varepsilon < 1$. Cechą charakterystyczną warstwy fluidalnej jest prawie stała strata ciśnienia ΔP_{3-4} , mimo zwiększania prędkości. Strata ciśnienia ma nieco mniejszą wartość niż na początku fluidyzacji, a różnica ($\Delta P_2 - \Delta P_{3-4}$) jest spowodowana siłami wiążącymi, które występują pomiędzy cząstkami.

Przy dalszym zwiększaniu prędkości gazu stężenie fazy rzadkiej zwiększa się, a fazy gęstej maleje. Gdy prędkość przepływu zrówna się z prędkością swobodnego opadania cząstek, powstaje stan graniczny, w którym kończy się fluidyzacja ($\varepsilon_s = 1$). Odpowiednia prędkość przepływu gazu zwana jest prędkością zawisania; jest ona równa prędkości swobodnego opadania cząstki w gazie nieruchomym. Jeżeli prędkość przepływu gazu jest większa od prędkości swobodnego opadania cząstek, cząstki są wywiewane z warstwy i unoszone w strudze gazu, a zatem zaczyna się transport pneumatyczny. Dla złoża zasilanego fazą stałą w sposób ciągły, strata ciśnienia zwiększa się wtedy wraz ze zwiększaniem prędkości przepływu gazu. Jednocześnie dochodzi do istotnego zaburzenia działania aparatu fluidalnego, objawiającego się innym od założonego kierunkiem rozplywu faz.

Rodzaje warstw fluidalnych przedstawiono na rys. 3. Ogólny ich podział wyróżnia warstwy fluidalne jednorodne i niejednorodne. Poszczególne rodzaje warstw można natomiast scharakteryzować następująco.

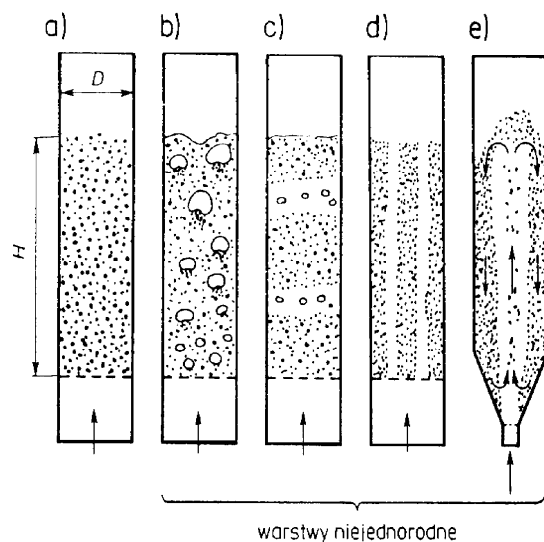
Warstwa jednorodna wykazuje jednakową porowatość we wszystkich punktach, (rys. 3a).

Warstwa pęcherzykowa charakteryzuje się tym, że część gazu płynie w postaci pęcherzy, (rys. 3b), wobec czego porowatość nie jest jednakowa we wszystkich punktach warstwy.

Warstwa tłokowa (nazywana również warstwą pulsującą) charakteryzuje się tym, że pęcherze urastają do rozmiarów równych średnicy aparatu, tworząc poprzeczne warstwy gazu, (rys. 3c). Warstwy zawiesiny znajdujące się pomiędzy nimi poruszają się ku górze na podobieństwo tłoków.

Warstwa kanalikowa charakteryzuje się występowaniem pionowych kanałów, przez które przepływa znaczna część płynu, nie wprawiając w ruch cząsteczek na całym przekroju aparatu, (rys. 3d).

Warstwa fontannowa charakteryzuje się tym, że cząstki są wynoszone do góry w obszarze występowania dużej prędkości w rdzeniu aparatu, a opadają na dół w obszarze małej prędkości w pobliżu ścian, (rys. 3e).



Rys. 3. Rodzaje warstw fluidalnych

a) jednorodna, b) pęcherzykowa, c) tłokowa, d) kanalikowa, e) fontannowa

Umiejętność obliczania prędkości początku fluidyzacji w_2 ma podstawowe znaczenie w projektowaniu i badaniu rzeczywistych procesów fluidyzacji. Chociaż procesy te są na ogół realizowane przy dość dużej prędkości, to niektóre z nich przebiegają tylko nieco powyżej prędkości w_2 . Prędkość w_2 odpowiada takiej prędkości przepływu, podczas której nadciśnienie płynu ΔP_2 zrównuje się z ciśnieniem wywieranym przez warstwę fluidalną o wysokości H_2 . Równanie pozwalające określić prędkość początku fluidyzacji ma postać

$$\frac{1,75 \rho_p}{\varepsilon_2^3 \psi d_s} w_2^2 + \frac{150 (1 - \varepsilon_2) \eta_p}{\varepsilon_2^3 (\psi d_s)^2} w_2 - (\rho_s - \rho_p) g = 0 \quad (1)$$

gdzie: w_2 - prędkość początku fluidyzacji, m/s;
 ε_2 - porowatość złoża dla początku fluidyzacji, -;
 d_s - średnica cząstek ciała stałego, m;
 ψ - sferyczność cząstek, -;
 ρ_p - gęstość płynu, kg/m³;
 η_p - współczynnik dynamiczny lepkości płynu, Pa·s;
 ρ_s - gęstość ciała stałego, kg/m³;

\mathfrak{g} - przyspieszenie ziemskie, m/s^2 .

Zwykle porowatość złoza ε_2 jest wielkością nieznaną. W celu jej określenia można skorzystać z empirycznych zależności podawanych w literaturze w postaci

$$\frac{1-\varepsilon_2}{\psi^2 \varepsilon_2^3} \approx 11 \quad \text{oraz} \quad \frac{1}{\psi \varepsilon_2^3} \approx 14. \quad (2)$$

Dla określenia poprawnych warunków pracy aparatu ze złożem fluidalnym konieczne jest również wyznaczenie zwiększenia objętości złoza w stosunku do złoza nieruchomego oraz oporów przepływu płynu przez warstwę fluidalną.

Zwiększenie objętości złoza, w miarę zwiększania porowatości związanej ze zwiększającym się strumieniem płynu, można obliczyć na podstawie zależności

$$\frac{H_1}{H_2} = \frac{1-\varepsilon_2}{1-\varepsilon_1} \quad (3)$$

gdzie: H_1, ε_1 - wysokość i porowatość warstwy nieruchomej;

H_2, ε_2 - wysokość i porowatość warstwy dla początku fluidyzacji.

Opór przepływu płynu przez warstwę fluidalną wyznaczyć można z równania

$$\Delta P_f \approx \Delta P_2 = H_2(1-\varepsilon_2) (\rho_s - \rho_p) \mathfrak{g}, \quad (4)$$

pamiętając jednak o tym, że na sumaryczną stratę ciśnienia w aparacie fluidalnym mają również istotny wpływ miejscowe opory przepływu płynu przez ruszt podtrzymujący warstwę.

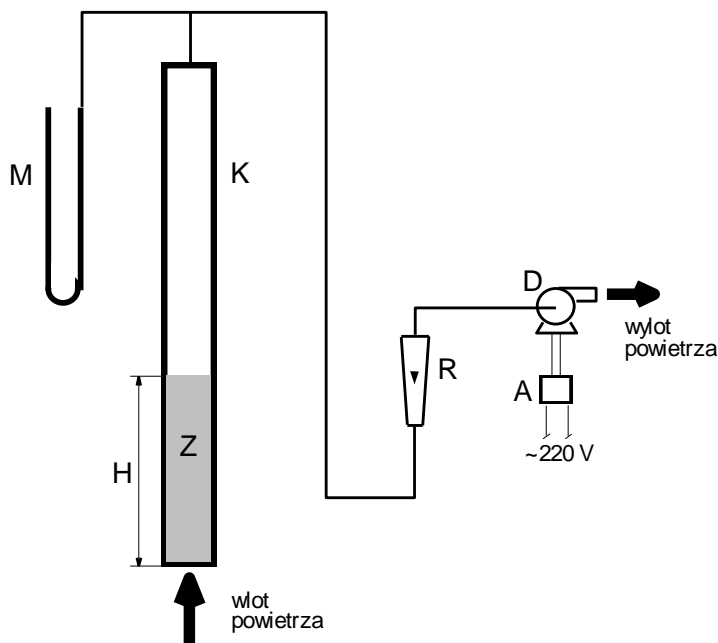
Warunki odpowiadające punktowi początku fluidyzacji można stosunkowo wyraźnie zaobserwować i określić, natomiast przejście między stanem fluidalnym i transportem pneumatycznym nie daje się jednoznacznie określić. Podczas silnego porywania cząstek ciała stałego z warstwy fluidalnej opór przepływu warstwy zmniejsza się i w momencie, gdy prędkość płynu przekracza prędkość opadania pojedynczej cząstki, następuje ich szybkie wyrzucanie z aparatu. Porównując opór przepływu podczas unoszenia cząstki z ciężarem cząstki, prędkość unoszenia można określić zależnością

$$w_5 = \sqrt{\frac{4}{3} \frac{d_s \mathfrak{g} (\rho_s - \rho_p)}{\xi \rho_p}}, \quad (5)$$

gdzie: ξ - liczba oporu ruchu cząstki, -.

3. OPIS STANOWISKA LABORATORYJNEGO

Schemat stanowiska pomiarowego do badania przebiegu fluidyzacji warstwy zgranulowanego ciała stałego strumieniem powietrza, przedstawiono na rys. 4. Głównym elementem stanowiska jest pionowa szklana rura o średnicy wewnętrznej 54 mm, zakończona u dołu rusztem siatkowym na którym spoczy-



Rys. 4. Schemat stanowiska do badania procesu fluidyzacji

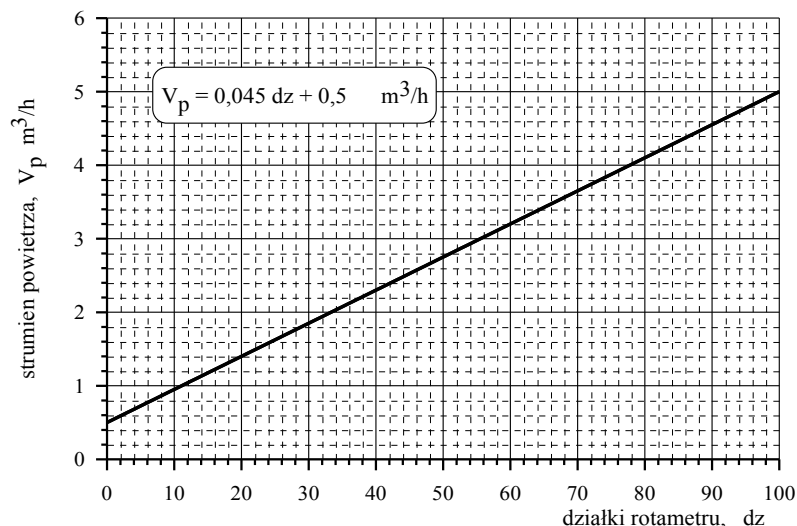
K - pionowa rura szklana o średnicy 54 mm, Z - złożo granulek polietylenu spoczywające na ruszcie; R - rotametr powietrza; M - manometr U-rurkowy, D - dmuchawa, A - autotransformator

wa złożo utworzone z granulek polietylenu. Charakterystyka cząstek stałych jest następująca:

- gęstość $\rho_s = 920 \text{ kg/m}^3$;
- średnica $d_s = 3 \text{ mm}$;
- porowatość w złożu nieruchomym $\varepsilon_1 = 0,38$;
- sferyczność $\psi = 0,825$.

Przepływ gazu przez warstwę zgranulowanego ciała stałego wymuszany jest za pomocą dmuchawy D zasysającej powietrze atmosferyczne. Dmuchawa zasilana jest przez autotransformator, co umożliwia płynną regulację jej prędkości obrotowej, a tym samym wydajności. Pomiar oporów przepływu powietrza przez warstwę polietylenu, umożliwia wypełniony wodą manometr

U-rurkowy M, wskazujący wartość podciśnienia wytwarzającego się w kanale ponad złożem. Naniesiona na szklanej rurze podziałka milimetrowa umożliwia ocenę ekspansji złoża. Strumień powietrza mierzony jest rotametrem R, którego charakterystykę przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. Charakterystyka rotametru powietrza

4. PRZEBIEG ĆWICZENIA

W celu przeprowadzenia badań przebiegu procesu fluidyzacji na stanowisku pomiarowym przedstawionym na rys. 3, należy:

- zdemontować górne elastyczne połączenie rury szklanej z instalacją ssącą, a następnie wypełnić rurę do wysokości około 20 cm suchymi granulami polietylenu;
- zamontować ponownie połączenie rury szklanej z dmuchawą oraz zanotować początkową wysokość warstwy polietylenu w kolumnie;
- przełącznikiem na pulpicie stanowiska włączyć autotransformator zasilający dmuchawę;
- zmieniając strumień powietrza przepływającego przez warstwę, obserwować zmiany jego oporów przepływu;
- szczególne uwagę zwrócić na początek fluidyzacji i odpowiadający jej strumień gazu;
- po przejściu złoża w stan fluidalny, obserwować zmiany jego wysokości w zależności od strumienia powietrza;
- przeprowadzić identyfikację tworzących się rodzajów warstwy fluidalnej;

- h) zwracać uwagę na zachowanie się cząstek ciała stałego w każdym z obserwowanych rodzajów warstw;
- i) określić wartość strumienia gazu odpowiadającą przejściu złoża fluidalnego w transport pneumatyczny cząstek ciała stałego;
- j) wyniki prowadzonych obserwacji i pomiarów każdorazowo notować w tabeli;

Badanie procesu fluidyzacji					
Średnica kolumny:		D = 54 mm			
Gęstość ciała stałego:		$\rho_s = 920 \text{ kg/m}^3$			
Średnica cząstek ciała stałego:		$d_s = 3 \text{ mm}$			
Sferyczność cząstek ciała stałego:		$\Psi = 0,825$			
Porowatość złoża nieruchomego:		$\varepsilon_1 = 0,38$			
Początkowa wysokość warstwy:		$H_1 = \dots \text{ mm}$			
Temperatura powietrza :		$t_p = \dots \text{ }^\circ\text{C}$			
Gęstość powietrza:		$\rho_p = \dots \text{ kg/m}^3$			
Lepkości powietrza:		$\eta_p = \dots \text{ mPa}\cdot\text{s}$			
Strumień powietrza		Opór przepływu	Wysokość warstwy	Rodzaj warstwy	Uwagi
dz	m ³ /h	mm H ₂ O	mm	-	-
5					
10					
...					

- k) w trakcie badań zwrócić uwagę na wydajność dmuchawy, gdyż wytworzenie zbyt dużego podciśnienia w instalacji ssącej może spowodować wysianie wody z manometru U-rurkowego, a tym samym uniemożliwić kontynuację ćwiczenia;
- l) po zakończeniu pomiarów wyłączyć zasilanie autotransformatora.

5. ZAKRES OPRACOWANIA WYNIKÓW POMIARÓW

1. Na podstawie uzyskanych wyników badań, sporządzić w układzie współrzędnych logarymicznych charakterystykę $\Delta P = f(w)$, jak na rys. 2.
2. Na podstawie sporządzonej charakterystyki określić prędkość początku fluidyzacji oraz porównać jej wartość z wartością otrzymaną na podstawie równania (1).
3. Na podstawie równania (5) określić teoretyczną prędkość przepływu powietrza odpowiadającą początkowi transportu pneumatycznego granulek

polietylenu w kanale i porównać otrzymaną wartość z danymi otrzymanymi w trakcie pomiarów. Sposób określenia liczby oporu przepływu ξ występującej w równaniu (5) zawiera instrukcja do ćwiczenia 7 pt. „Badanie procesu sedimentacji zawiesin”.

4. Podać zakresy występowania zaobserwowanych rodzajów warstwy fluidalnej w zależności od prędkości przepływu powietrza.
5. Przedstawić wnioski z przeprowadzonego ćwiczenia.

6. LITERATURA UZUPEŁNIAJĄCA

- [1] KOCH R., NOWORYTA A.: Procesy mechaniczne w inżynierii chemicznej, WNT W-wa 1992
- [2] ORZECZOWSKI Z.: Przepływy dwufazowe, jednowymiarowe, ustalone, adiabatyczne, PWN W-wa 1990
- [3] TRONIEWSKI L. i inni; Tablice do obliczeń procesowych, Skrypt PO nr 189, Opole 1996

7. TEMATYKA ZAGADNIEŃ KONTROLNYCH

1. Cechy charakteryzujące złoża fluidalne.
2. Zalety i wady złoża fluidalnego.
3. Przykłady wykorzystania złoża fluidalnego w aparaturze przemysłowej.
4. Rodzaje złoża fluidalnego.
5. Opory przepływu gazu przez złoża zgranulowanego ciała stałego.

Ćwiczenie 10:

OKREŚLANIE SPRAWNOŚCI ODPYLANIA FILTRU WORKOWEGO

1. CEL ĆWICZENIA

Celem ćwiczenia jest eksperymentalne wyznaczenie całkowitej sprawności odpylania odpylacza tkaninowego w zależności od strumienia oczyszczanego powietrza.

2. WIADOMOŚCI WPROWADZAJĄCE

Odpylanie gazów polega na usuwaniu z nich cząstek aerozolowych. Proces odpylania gazu - usuwania cząstek stałych - prowadzony jest w aparatach zwanych odpylaczami. Natomiast do usuwania kropeł - cząstek ciekłych - stosowane są odkraplacze. Zastosowanie określonego procesu odpylania oraz typu odpylacza wyznacza zarówno charakterystyka źródła emisji zanieczyszczeń, jak i wymagany stopień odpylania gazu - sprawność odpylania. Odpylanie może być prowadzone metodą suchą lub moką, w zależności od tego w jakiej postaci znajdują się po zakończeniu procesu wydzielone cząstki - suchego pyłu czy też zawiesiny cząstek stałych w cieczy.

Dla efektywnego i racjonalnego projektowania procesu odpylania oraz użytkowania aparatury odpylającej, oprócz znajomości strumienia gazu i stężenia w nim cząstek aerozolowych, niezbędna jest również znajomość właściwości fizykochemicznych cząstek, takich jak ich średnica (rozmiar liniowy), kształt, masa, gęstość, powierzchnia właściwa, skład chemiczny, rozkład rozmiarów poszczególnych frakcji.

Cząstki ciała stałego, będące składnikiem pyłów lub dymów, mają zwykle kształt nieregularny. Spośród charakterystycznych kształtów można tu wymienić cząstki:

- sferyczne - np. węgiel aktywny, skrobia, dymy tlenków żelaza, PCW i inne tworzywa sztuczne;
- prostopadłościennie - np. proszek żelaza, kwarc i inne minerały;
- odłamkowe (nieregularne) - np. cement, korund, pigmenty organiczne;
- płaskie (płytkowe) - np. mika, grafit;

- prętowe - np. talk, mąka;
- włókniste - np. włókna tekstylne, celuloza.

W celu wyrażenia średnicy cząstek o kształtach nieregularnych, w zależności od metody pomiaru ich wielkości, stosuje się takie pojęcia, jak:

- średnica projekcyjna, tj. średnica równoważna średnicy koła o tej samej powierzchni co rzut danej cząstki na płaszczyznę prostopadłą do kierunku jej ruchu;
- średnica objętościowa, tj. średnica kuli o takiej samej objętości jak objętość danej cząstki;
- średnica powierzchniowa, tj. średnica kuli o takiej samej powierzchni co powierzchnia zewnętrzna (bez porów wewnętrznych) danej cząstki;
- średnica sedymentacyjna, tj. średnica kuli o takiej samej gęstości oraz prędkości opadania w danym środowisku (zwykle powietrzu) jak dana cząstka;
- średnica aerodynamiczna, tj. średnica kuli o jednostkowej gęstości 1g/cm^3 , o tej samej prędkości opadania w danym środowisku jak dana cząstka.

Stężenie pyłu w gazie wyraża ilość fazy stałej w mieszaninie aerozolowej i może być definiowane jako:

- stężenie masowe - stosunek masy pyłu (lub strumienia masy pyłu) do sumy masy pyłu i gazu (lub ich strumieni masy);
- stężenie objętościowe - stosunek objętości pyłu (strumienia objętości pyłu) do sumy objętości pyłu i gazu (lub ich sumy strumieni objętości);
- stężenie ilościowe - stosunek liczby sztuk ziaren pyłu do objętości gazu (liczba ziaren pyłu w jednostce objętości gazu);
- stężenie masowo-objętościowe, zwane krótko koncentracją - to stosunek masy pyłu (strumienia masy pyłu) do sumy objętości pyłu i gazu (lub ich sumy strumieni objętości).

W literaturze anglojęzycznej stosuje się często, zwłaszcza przy bardzo małym stężeniu zanieczyszczeń gazowych, ale także pyłowych, określanie stężenia objętościowego w częściach na milion (ppm) lub w częściach na miliard (ppb).

W procesach odpylania, które zwykle zachodzą w kilku charakterystycznych etapach, można wyróżnić na ogół następujące fazy:

- kształtowania ruchu gazu i ziaren pyłu;
- koagulacji, tj. łączenia się ze sobą pojedynczych, drobnych ziaren w grupy, a więc tworzenia elementów o masie i wymiarach większych od masy i wymiarów pojedynczych ziaren;
- separacji rozumianej jako trwałe oddzielenie pyłu od gazu;
- wprowadzenia z odpylacza i zagospodarowania oddzielonego pyłu.

Ze względu na zakres przeprowadzanych w odpylaczu operacji, aparaty służące do zmiany stopnia zapylenia gazów można podzielić na dwie główne grupy:

- urządzenia samodzielne (koagulująco-oddzielające), tj. takie, w których następuje zarówno koagulacja pyłu (łączenie pojedynczych ziaren w grupy lub wiązanie ich z kroplami cieczy), jak i trwałe wydzielenie ze strumienia gazu skoagulowanego pyłu lub kropeł cieczy wraz ze związanymi z nimi cząstkami,
- urządzenia niesamodzielne, zwane także koncentratorami lub koagulatorami, w których zachodzi jedynie zwiększanie stężenia pyłu w gazie (koncentrowanie) lub koagulacja pyłu, bądź też łączenie go z kroplami cieczy, ale bez wydzielenia skoagulowanego pyłu lub kropeł cieczy ze strumienia gazu. Wydzielenie to następuje w innych urządzeniach współpracujących z koncentratorami lub koagulatorami.

Do zjawisk i procesów wykorzystywanych w działaniu poszczególnych grup odpylaczy należy zaliczyć:

- grawitacyjne opadanie ziaren pyłu (komory osadcze);
- bezwładność (inercję) ziaren pyłu (koncentratory i odpylacze inercyjne);
- efekty działania na ziarna pyłu siły odśrodkowej, powstającej podczas spiralnego ruchu zapyłonego gazu (cyklony, multicyklony, koncentratory odśrodkowe);
- efekty działania na ziarna pyłu siły odśrodkowej i siły wywołanej przyspieszeniem Coriolisa (suche odpylacze wirnikowe);
- proces suchej filtracji zapyłonego gazu, zachodzący podczas jego przepływu poprzez suche warstwy porowate. Odpylacze zaliczane do tej grupy noszą nazwę filtrów (filtry ziarniste, filtry ceramiczne i piaskowe),
- proces mokrej filtracji zapyłonego gazu, zachodzący podczas jego kontaktu z cieczą. Odpylacze zaliczane do tej grupy nazywa się płuczkami (płuczki: natryskowe bez wypełnienia, z wypełnieniem stacjonarnym i fluidyzującym, pianowe, z przepływem gazu poprzez zamknięcie wodne - zwane przewalowymi, uderzeniowe, wirnikowe, ze zwężką Venturiego, mokre cyklony, filtry ze zwilżonymi powierzchniami);
- zjawiska jonizacji gazu i pyłu oraz elektrostatycznego przyciągania różnoimiennie naładowanych ciał (odpylacze elektrostatyczne - nazywane potocznie elektrofiltrami);
- proces koagulacji pyłu w polu akustycznym (koagulatory akustyczne).

Zasada działania wykorzystywanego w niniejszym ćwiczeniu odpylacza filtracyjnego oparta jest na przepływie strumienia odpylanego gazu przez zespół porowatych kolektorów. W wyniku działania mechanizmów: inercyjnego, dyfuzyjnego, częściowo elektrostatycznego oraz efektu

zaczepienia, cząstki aerozolowe osadzają się na powierzchni kolektorów, a z biegiem procesu odpylania - filtracji - na uprzednio wydzielonych już cząstkach. Cząstki te stanowią wówczas właściwą warstwę filtracyjną, która musi być okresowo usuwana, gdy strata ciśnienia gazu osiągnie dopuszczalną wartość. Odpylanie filtracyjne jest więc procesem cyklicznym, w którym są powtarzane cykle odpylania i oczyszczania (regeneracji) przegrody filtracyjnej.

W procesach odpylania filtracyjnego gazów odlotowych rozróżnić można dwa podstawowe typy przegród - układów filtracyjnych:

- filtry tkaninowe; w których przegrodę filtracyjną stanowią tkaniny tkane lub plecione, a także włókna filcowane, formowane w kształcie worków, kieszeni lub rozpinane na płaskich ramach;
- filtry warstwowe; w postaci przypadkowo upakowanych luźnych lub sprasowanych włókien, ziaren (granul) nieruchomych, ruchomych lub fluidyzowanych.

Filtry tkaninowe i włókniste wykonuje się z włókien naturalnych i syntetycznych, np. bawełny, wełny, nylonu, teflonu, włókna szklanego. Regeneracja filtru polega na wstrząsaniu mechanicznym lub przedmuchu powietrzem w kierunku przeciwnym do odpylania, w wyniku czego wydzielony pył w dużym stopniu zostaje usunięty. Duży wpływ na sprawność odpylania ma jakość tkaniny, a głównie równomierność rozłożenia w niej włókien, rozmiar porów i przekrój swobodny. Tkanina filtracyjna powinna spełniać odpowiednie warunki. Przy dużej zdolności do zatrzymywania cząstek tkanina powinna być również odporna na korozyjne i erozyjne działanie strumienia aerozolu, na wpływ temperatury procesu oraz oddziaływania mechaniczne związane z jej regeneracją. Pozostałe czynniki, jak zdolność do uwalniania pyłu i właściwości elektrostatyczne, są określone głównie przez powierzchniowe preparowanie tkaniny. Układy filtracyjne są zaliczane do najbardziej skutecznych metod odpylania. Uzyskuje się przy ich stosowaniu sprawności odpylania 99,9% dla cząstek o wymiarze do 0,5 μm , a nawet mniejszych - do 0,01 μm .

Do analizy i oceny ilościowej procesu odpylania, a tym samym mechanizmów wydzielania cząstek, są konieczne odpowiednie kryteria. Jako podstawowe kryterium przyjmowana jest tzw. całkowita sprawność odpylania. Jest to stosunek strumienia masy pyłu zatrzymanego w odpylaczu do masy pyłu wprowadzanego (wraz z oczyszczanym gazem) do odpylacza, czyli

$$\eta = \frac{m_z}{m_w}, \quad (1)$$

gdzie: m_z - masa pyłu zatrzymanego w odpylaczu, kg;
 m_w - masa pyłu wprowadzonego do odpylacza, kg;

ale także

$$\eta = \frac{m_z}{m_z + m_o} = \frac{m_w - m_o}{m_w} \quad (2)$$

gdzie: m_o - masa pyłu opuszczającego odpylacz w oczyszczonym gazie (masa pyłu nie zatrzymanego w odpylaczu), kg.

Ocenie ilości pyłu opuszczającego odpylacz, zwłaszcza gdy urządzenie to osiąga bardzo wysoką sprawność, służy również pojęcie penetracji, definiowane jako stosunek masy pyłu opuszczającego odpylacz (pyłu nie zatrzymanego, przechodzącego) do masy pyłu wprowadzanego wraz z gazem do odpylacza

$$p = \frac{m_o}{m_w} = \frac{m_w - m_z}{m_w} = 1 - \frac{m_z}{m_w}, \quad (3)$$

a więc: $p = 1 - \eta$.

Dla pełnej oceny efektów działania odpylacza nie wystarcza jednak znajomość jego całkowitej sprawności odpylania. Nie jest bowiem obojętne dla jakiego uziarnienia pyłu jest ona określona. Zdolność do separacji poszczególnych klas ziarnowych pyłu opisuje frakcyjna sprawność odpylania η_f . Frakcyjna sprawność odpylania i-tej klasy ziarnowej (np. o średnicy zastępczej $(5 \div 10) \mu\text{m}$, np. η_{5-10}) jest to stosunek masy pyłu tej klasy ziarnowej zatrzymywanego w odpylaczu do masy pyłu tejże klasy wprowadzanego (wraz z gazem) do odpylacza, czyli

$$\eta_{f,i} = \frac{m_{z,i}}{m_{w,i}} = \frac{m_{w,i} - m_{o,i}}{m_{w,i}} = \frac{m_{z,i}}{m_{z,i} + m_{o,i}}. \quad (4)$$

gdzie: $\eta_{f,i}$ - sprawność odpylania i-tej frakcji, -;
 $m_{z,i}$ - masa pyłu i-tej frakcji zatrzymanego w odpylaczu, kg;
 $m_{w,i}$ - masa pyłu i-tej frakcji wprowadzonego do odpylacza, kg;
 $m_{o,i}$ - masa pyłu i-tej frakcji opuszczającej odpylacz, kg;

Współzależność między całkowitą sprawnością odpylania a sprawnością frakcyjną wyraża równanie

$$\eta = \sum_{i=1}^n \eta_{f,i} u_{w,i} \quad (5)$$

gdzie: $u_{w,i} = \frac{m_{w,i}}{m_w}$ - masowy udział i-tej frakcji ziarnowej w pyłe wprowadzanym wraz z gazem do odpylacza, -.

W podobny sposób jest określona frakcyjna penetracja i-tej klasy ziarnowej pyłu

$$p_{f,i} = \frac{m_{o,i}}{m_{w,i}} = 1 - \frac{m_{z,i}}{m_{w,i}} = 1 - \eta_{f,i}, \quad (6)$$

a także relacja między penetracją całkowitą a frakcyjną

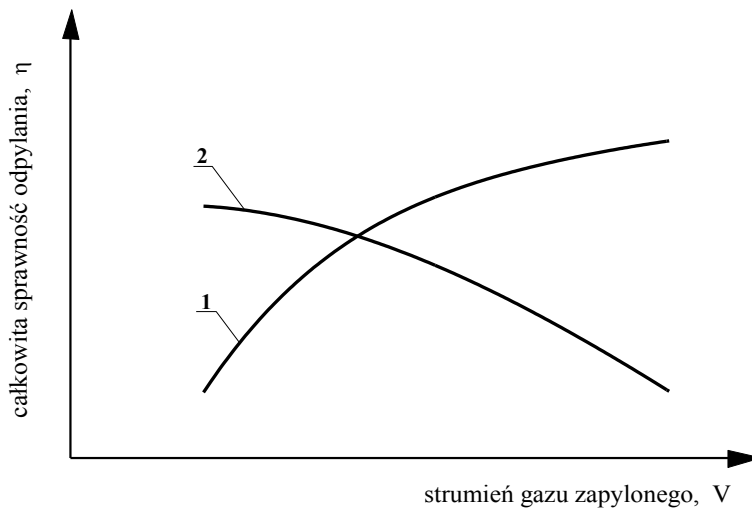
$$p = \sum_{i=1}^n p_{f,i} u_{w,i}. \quad (7)$$

W przypadku konieczności bardzo skutecznego oczyszczania gazów stosuje się często wielostopniowe stacje oczyszczania, składające się z szeregowo współpracujących urządzeń. Całkowita sprawność oczyszczania takiej stacji zależy od sprawności tworzących ją elementów (pojedynczych urządzeń), co wyraża równanie

$$\eta = 1 - (1 - \eta_1)(1 - \eta_2)...(1 - \eta_n), \quad (8)$$

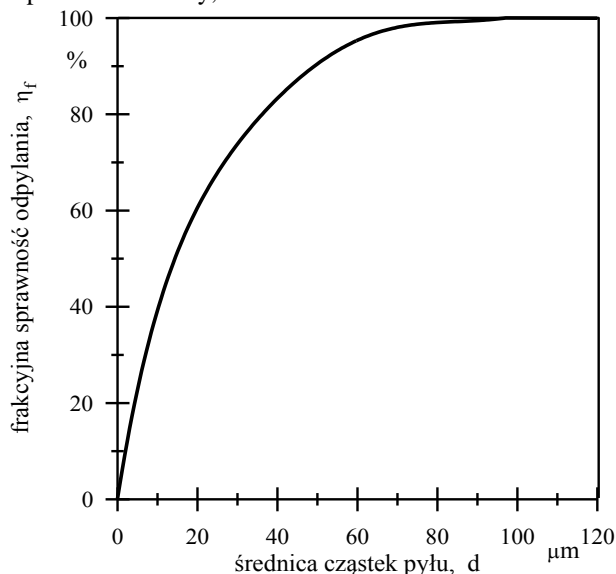
gdzie: 1, 2, 3, ..., n - numery kolejnych odpylaczy.

Podstawowymi czynnikami wpływającymi na sprawność odpylania filtracyjnego są właściwości fizyczne cząstek i gazu nośnego, prędkość filtracji, właściwości tkaniny filtracyjnej i parametry jej regeneracji. Na ogół występuje zmniejszenie sprawności odpylania ze zwiększeniem prędkości filtracji i zmniejszaniem się rozmiaru cząstek. Na rys. 1 i 2 przedstawiono typowe charakterystyki sprawności odpylania odpylaczy.



Rys. 1. Całkowita sprawność odpylania w funkcji strumienia gazu;

- 1 - np. cyklon, odpylacz mokry Venturiego, płuczka przewalowa,
2 - np. filtr tkaninowy, elektrofiltr.



Rys. 2. Przykładowy przebieg zmian frakcyjnej sprawności odpylania w funkcji wielkości ziaren pyłu

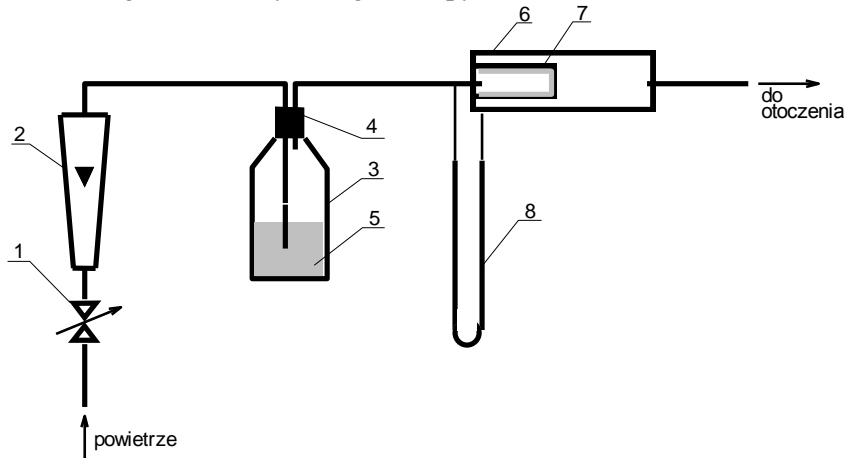
Warto podkreślić, że ze wszystkich rodzajów urządzeń do odpylania najwyższe sprawności w usuwaniu cząstek ciała stałego z gazu uzyskuje się w odpylaczach filtracyjnych wyposażonych w specjalnie preparowane bibuły nasączone cieczą o dużej lepkości (zwykle olejem).

3. OPIS STANOWISKA LABORATORYJNEGO

Schemat stanowiska pomiarowego do badania sprawności odpylania filtru tkaninowego przedstawiono na rys. 3.

Powietrze, którego strumień regulowany jest zaworem (1) i mierzony rotametrem (2), wprowadzone jest do szklanego naczynia (3) częściowo wypełnionego suchą sproszkowaną kredą i zamkniętego gumowym korkiem (4). W naczyniu tym na skutek przepływu powietrza przez warstwę kredy tworzy się gaz zapyłony, kierowany następnie do komory filtracyjnej (6). W komorze umieszczony jest tkaninowy filtr workowy (7), wewnątrz którego następuje osadzanie się cząstek ciała stałego. Oczyszczone powietrze kierowane jest do otoczenia. Wypełniony wodą manometr U-rurkowy (8) pozwala na obserwacje zmian oporów przepływu gazu przez filtr w miarę zwiększania się ilości pyłu zatrzymanego wewnątrz worka. W skład stanowiska

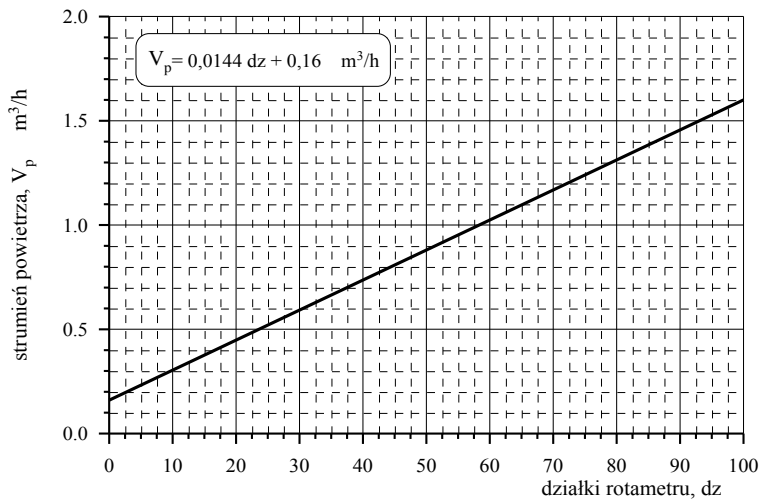
wchodzi również waga analityczna służąca do określania masy pyłu wprowadzanego oraz zatrzymanego w odpylaczu.



Rys. 3. Schemat stanowiska badawczego

- 1- zawór regulacyjny, 2 - rotametr, 3 - naczynie szklane, 4 - korek gumowy,
5 - kreda, 6 - komora filtracyjna, 7 - filtr workowy, 8 - U - rurka

Masę pyłu wprowadzonego wyznacza się na podstawie różnicy ciężaru naczynia z kredą, mierzonego przed i po zakończeniu przepływu gazu przez naczynie. W analogiczny sposób określana jest masa pyłu zatrzymanego w worku odpylacza tkaninowego. Charakterystykę rotametrów mierzących strumień powietrza przedstawiono na rys. 3.



Rys. 4. Charakterystyka rotametu powietrza

4. METODYKA PROWADZENIA POMIARÓW

W celu przeprowadzenia ćwiczenia należy:

- a) naczynie szklane (3) napęlnić do połowy suchą sproszkowaną kredą;
- b) wykorzystując wagę analityczną wyznaczyć masę szklanego naczynia z kredą ;
- c) oczyścić (wytrzepać) worek filtracyjny (7) i wyznaczyć jego masę przy użyciu wagi analitycznej;
- d) naczynie (3) zamknąć korkiem (4) i całość umieścić w odpowiednim uchwycie stanowiska;
- e) zamontować worek filtracyjny w komorze filtru (6);
- f) zaworem (1) ustalić stosunkowo niewielki, kontrolowany rotametrem (2), strumień powietrza przepływającego przez elementy stanowiska;
- g) w trakcie przepływu powietrza przez szklane naczynie (3) potrząsać nim energicznie w celu spulchnienia kredy a tym samym ułatwienia wytwarzania się gazu zapyłonego;
- h) w trakcie trwania procesu obserwować zmiany oporów przepływu gazu przez filtr workowy;
- i) odpylanie prowadzić do chwili zużycia całej ilości kredy;
- j) po zamknięciu dopływu powietrza zdemontować naczynie (3) z uchwytu i po wyjęciu korka (4) zważyć je powtórnie co pozwala na określenie masy kredy wprowadzonej do odpylacza;
- k) z komory filtracyjnej wyjąć worek i ważąc go wyznaczyć masę kredy zatrzymanej w odpylaczu;
- l) wyniki zanotować w tabeli pomiarowej;

Sprawność odpylania filtru workowego							
Rodzaj gazu zapyłonego: powietrze zanieczyszczone cząstkami kredy							
Strumień powietrza		Masa naczynia z kredą	Masa pustego worka	Masa pustego naczynia	Masa worka z kredą	Masa kredy wprowadzonej	Masa kredy zatrzymanej
dz	m ³ /h	g	g	g	g	g	g
20							
40							
...							

m) po oczyszczeniu worka filtracyjnego z kredy (poprzez energiczne potrząśnięcie nim), powtórzyć czynności wg pkt. a)-l) dla innych wartości strumienia powietrza.

5. ZAKRES OPRACOWANIA WYNIKÓW

1. Na podstawie zależności (1) i (3) wyznaczyć całkowitą sprawność odpylania oraz penetrację dla badanego filtra.
2. Wykreślić charakterystykę zmian zmierzonej całkowitej sprawności odpylania oraz penetracji filtra w funkcji strumienia oczyszczanego gazu.
3. Podać wnioski z przeprowadzonego ćwiczenia.

6. LITERATURA UZUPEŁNIAJĄCA

- [1] WARYCH J.: Oczyszczanie przemysłowych gazów odlotowych, WNT W-wa 1994
- [2] KABSCH P.: Odpylanie i odpylacze, t.1, WNT W-wa 1992

7. TEMATYKA ZAGADNIEŃ KONTROLNYCH

1. Wielkości charakteryzujące gaz zapyłony.
2. Wielkości charakteryzujące cząstki pyłu.
3. Podział urządzeń odpylających.
4. Właściwości tkanin filtracyjnych stosowanych w odpylaczach.
5. Wielkości charakteryzujące odpylacze.

Ćwiczenie 11:

BADANIE PROCESU ROZDZIAŁU ZAWIESINY METODĄ WIROWANIA

1. CEL ĆWICZENIA

Celem ćwiczenia jest praktyczne zapoznanie się z przebiegiem procesu odwirowywania zawiesiny w wirówce filtracyjnej, a także eksperymentalne określenie zmian wilgotności placka filtracyjnego w trakcie trwania procesu.

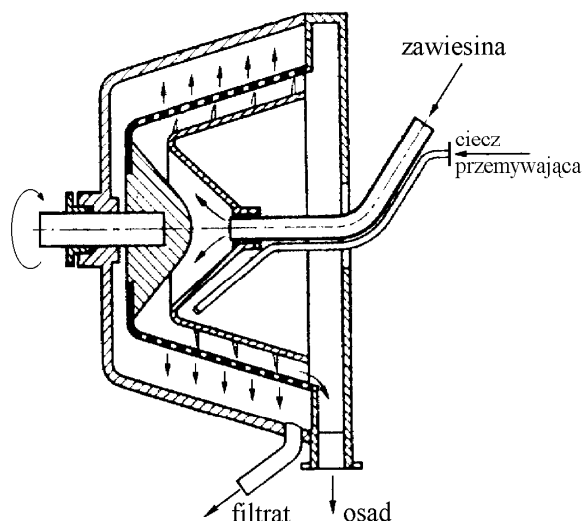
2. WIADOMOŚCI WPROWADZAJĄCE

Intensyfikację sedymentacji naturalnej czy też filtracji można osiągnąć prowadząc te procesy w polu siły odśrodkowej. Stosowane w praktyce, zdecydowanie większe od ziemskiego, wartości przyspieszenia odśrodkowego, zapewniają zwielokrotnienie siły napędowej procesu rozdziału, a tym samym skrócenie czasu jego trwania.

Do oddzielania cząstek ciała stałego od cieczy, a także jednej cieczy od drugiej, wykorzystywane są urządzenia zwane wirówkami. Zasadniczą częścią wirówki jest bęben obracający się wokół pionowej lub poziomej osi. Przykład konstrukcji takiego urządzenia przedstawia schemat na rys.1.

Do rozdzielania zawiesin ciała stałego w cieczy stosowane są wirówki filtracyjne. Bęben takiej wirówki ma na pobocznicy otwory, bądź też sama pobocznica wykonana jest z siatki o dużej wytrzymałości mechanicznej. Wewnętrzna powierzchnia bębna wyłożona jest tkaniną filtracyjną lub też rolę przegrody filtracyjnej pełni sama siatka o bardzo drobnych oczkach. W ten sposób zapewnia się swobodny przepływ filtratu przez ścianę bębna. Zatrzymaną na przegrodzie filtracyjnej warstwę osadu usuwa się, (w wirówkach pracujących w sposób ciągły), za pomocą odpowiednio ukształtowanych i usytuowanych skrobaków. W celu uzyskania osadu o dużym stopniu czystości, niekiedy do wnętrza wirówki doprowadzana jest ciecz przemywająca - podawana naprzemiennie z zawiesiną.

Drugi rodzaj wirówek to wirówki sedymentacyjne, stosowane do rozdziału ciekłych mieszanin. Bęben wirówki sedymentacyjnej nie ma otworów na pobocznicy. Składnik ciekłej mieszaniny o większej gęstości gromadzi się na



Rys. 1. Schemat wirówki filtracyjnej z poziomym wałem napędowym

ścianie bębna, a wyprowadzenie każdej z rozdzielonych w urządzeniu cieczy odbywa się za pomocą odpowiednio usytuowanych przelewów.

Podczas sedymentacji grawitacyjnej, czynnikiem powodującym proces opadania cząstek jest przyspieszenie ziemskie. Podczas sedymentacji cząstek w wirówkach, czynnikiem decydującym o jakości rozdzielania jest przyspieszenie odśrodkowe

$$a = \omega^2 r, \quad (1)$$

gdzie: $\omega = 2\pi n$ - prędkość kątowa bębna, 1/s;
 r - odległość cząstki od osi obrotu bębna, m;
 n - liczba obrotów bębna w jednostce czasu, 1/s.

Pod wpływem przyspieszenia odśrodkowego, na cząstkę działa siła odśrodkowa

$$N_a = m \omega^2 r. \quad (2)$$

Stosunek siły odśrodkowej do siły ciężenia

$$\Omega = \frac{N_a}{N_g} = \frac{m \omega^2 r}{m g} = \frac{\omega^2 r}{g}, \quad (3)$$

nazywany jest współczynnikiem rozdziału i stanowi wielkość charakterystyczną dla danej wirówki. I tak:

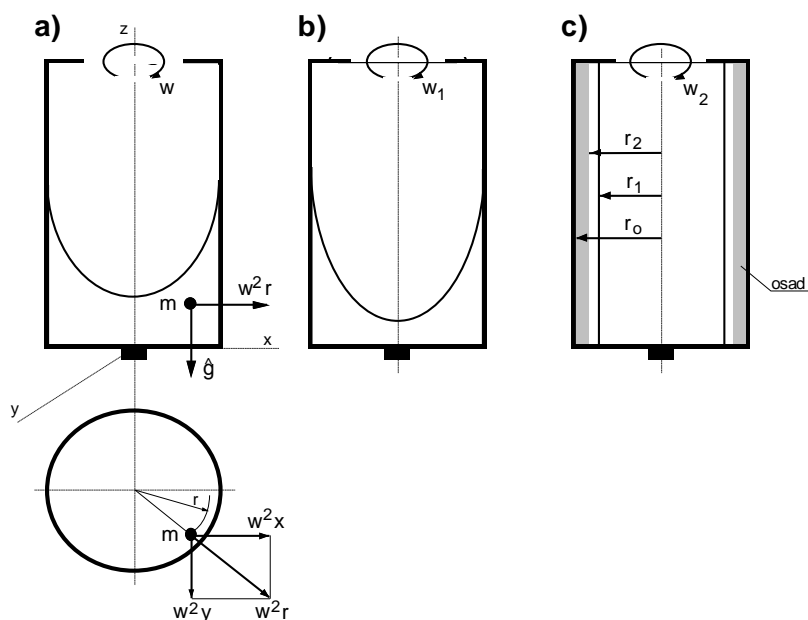
- dla wirówek normalnych $\Omega = 500 \div 4000$,
- dla ultrawirówek $\Omega = 4000 \div 50000$.

Z równania (3) wynika, że zwiększenie skuteczności wirowania można osiągnąć bardziej przez stosowanie większej prędkości obrotowej bębna niż przez zwiększenie jego promienia.

Z bilansu sił działających na zawieszinę w trakcie jej wirowania wynika, że powierzchnia cieczy przyjmuje kształt paraboloidy obrotowej (rys. 2a, b)) o równaniu

$$\frac{\omega^2 x^2}{2} + \frac{\omega^2 y^2}{2} + g z = \text{const} \quad (4)$$

w którym: x, y, z - współrzędne punktu na powierzchni cieczy w prostokątnym układzie odniesienia, m ;
 ω - prędkość kątowa zawiesziny (zwykle równa prędkości kątowej bębna wirówki), $1/s$;
 g - przyspieszenie ziemskie, m/s^2 .



Rys. 2. Zmiana kształtu powierzchni cieczy podczas wirowania $\omega < \omega_1 < \omega_2$

Przy obrotach typowych dla wirówek, wierzchołek paraboloidy jest tak bardzo oddalony od przekroju dna wirówki, że powierzchnię cieczy można traktować jako powierzchnię walca o promieniu r_1 , rys. 2 c).

Praca wirówki filtracyjnej składa się z trzech etapów:

- Etap 1. Doprowadzenie zawiesiny i wytworzenie na ścianie bębna placka filtracyjnego.
- Etap 2. Rozdział zawiesiny znajdującej się ponad plackiem przy braku zasilania wirówki surówką.
- Etap 3. Odwirowanie cieczy z placka filtracyjnego oraz usunięcie osadu z bębna.

Filtracja zawiesiny przez warstwę osadu zachodzi w wirówce pod wpływem różnicy ciśnienia

$$\Delta P = \frac{\omega^2 \rho_z}{2} (r_0^2 - r_1^2), \quad (5)$$

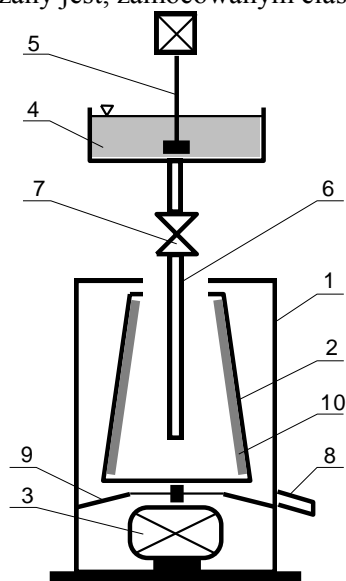
gdzie: ω - prędkość kątowa bębna, 1/s;
 ρ_z - gęstość zawiesiny, kg/m³;
 r_0 i r_1 - promienie wg oznaczeń na rys. 2 c), m.

Z równania (5) wynika, że „siła napędowa” procesu wirowania (przy stałej prędkości obrotowej) zależy od ilości zawiesiny w bębnie (r_1) oraz koncentracji ciała stałego (ρ_z). Oba te parametry zmieniają się w sposób ciągły w trakcie cyklu pracy wirówki. Analityczny opis przebiegu wirowania, tj. szybkości filtracji oraz wymaganego czasu jej trwania dla uzyskania placka filtracyjnego o określonej grubości, jest możliwy jedynie dla przypadków w których: otrzymany osad jest nieściśliwy, przepływ cieczy przez placek ma charakter laminarny, a opór przegrody filtracyjnej można pominąć. Gdy nie można poczynić powyższych założeń, koniecznym staje się eksperymentalne określenie warunków prowadzenia procesu. W sposób eksperymentalny określa się również wilgotność osadu w zależności od czasu wirowania. Jak wynika z przebiegu badań w tym zakresie, największe zmniejszenie wilgotności placka obserwuje się w początkowej fazie trzeciego etapu wirowania. Wraz z dalszym upływem czasu trwania procesu, wilgotność osadu maleje coraz wolniej, zbliżając się asymptotycznie do minimalnej możliwej do uzyskania w danych warunkach zawartości wilgoci w placku filtracyjnym. Należy jednak pamiętać, że długotrwałe wirowanie pociąga za sobą zwiększenie kosztów prowadzenia procesu ze względu na zużywaną energię. Uzyskanie zatem osadu o małej wilgotności może okazać się zbyt kosztowne.

3. OPIS STANOWISKA LABORATORYJNEGO

Schemat stanowiska pomiarowego przedstawiono na rys. 3. Głównym jego elementem jest typowa wirówka bębnowa stosowana w gospodarstwie domowym do odwirowywania bielizny. Stożkowy bęben wirówki (2) zmodyfikowano poprzez nawiercenie w jego pobocznicę otworów oraz

wyłożenie jego wnętrza stalową siatką drenażową i bawełnianą tkaniną filtracyjną. Bęben napędzany jest, zamocowanym elastycznie do obudowy,



Rys. 3. Schemat stanowiska do badania procesu odwirowywania zawiesiny

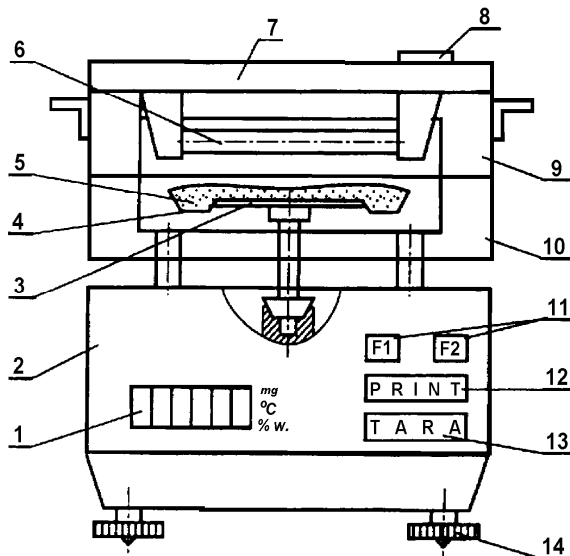
- 1 - obudowa, 2 - bęben wyłożony tkaniną filtracyjną, 3 - silnik elektryczny, 4 - zbiornik zawiesiny, 5 - mieszadło, 6 - rura spustowa, 7 - zawór odcinający, 8 - otwór wypływowy filtratu, 9 - koryto zbiorcze filtratu, 10 - placek filtracyjny

silnikiem elektrycznym (3) o prędkości obrotowej 1480 obr/min. Współczynnik rozdziału liczony dla średniej średnicy bębna 240,5 mm wynosi w tym przypadku 589. Do wewnętrznej powierzchni obudowy przymocowane jest koryto zbiorcze filtratu (9), odpływającego z wirówki otworem wypływowym (8). Nad wirówką znajduje się zbiornik (4) z mieszadłem (5) służący do wytwarzania zawiesiny kredy w wodzie. Zawiesina dopływa do wnętrza bębna rurą spustową (6) na której zamontowano zawór odcinający (7). Konstrukcja rury spustowej umożliwia jej demontaż, co ułatwia pobieranie próbek osadu z wnętrza wirującego bębna.

Do pomiaru wilgotności pobranych próbek, wykorzystywana jest w opisywanym ćwiczeniu wagosuszarka, rys. 4.

Jest to urządzenie składające się z ogrzewanej radiacyjnie komory suszarniczej, zamontowanej na elektronicznej wadze analitycznej. Maksymalna masa próbki poddawanej suszeniu wynosi 30 g, a temperaturę suszenia można regulować w zakresie (50÷140) °C. W trakcie pracy wagosuszarki, na jej

wyświetlaczu cyfrowym podawany jest procentowy ubytek masy materiału suszonego. Znajomość końcowego ubytku masy próbki (po jej wysuszeniu) oraz jej masy początkowej (przed suszeniem), pozwala na określenie masy



Rys. 4. Schemat budowy wagosuszarki WS 30

1 - wyświetlacz cyfrowy, 2 - waga WPE 300, 3 - szalka wagi, 4 - komora suszenia, 5 - materiał suszony, 6 - promiennik ciepła, 7 - pokrywa z otworem wentylacyjnym, 8 - wyłącznik zasilania, 9 - obudowa uchylna, 10 - obudowa stała, 11 - przyciski funkcyjne, 12 - przycisk wydruku, 13 - przycisk tarowania, 14 - pokrętki poziomujące

wody usuniętej z osadu, zgodnie z równaniem

$$m_{\text{H}_2\text{O}} = m_{\text{os,p}} \left(1 - \frac{\% \text{ mas.}}{100} \right), \quad (6)$$

w którym: $m_{\text{H}_2\text{O}}$ - masa wody usuniętej z próbki osadu, kg;
 $m_{\text{os,p}}$ - masa początkowa próbki osadu, kg;
 % mas. - procentowy ubytek masy próbki osadu (wskazany przez wagosuszarke).

Znajomość początkowej masy próbki osadu umieszczonej w komorze wagosuszarki oraz masy usuniętej z próbki wilgoci, pozwala na określenie wilgotności osadu przed suszeniem

$$Z_{os} = \frac{m_{H_2O}}{m_{os,p} - m_{H_2O}}, \quad (7)$$

gdzie: Z_{os} - bezwzględna wilgotność osadu, kg H_2O /kg osadu suchego.

4. METODYKA PROWADZENIA POMIARÓW

W celu wykonania pomiarów skuteczności usuwania wilgoci z warstwy osadu w trakcie wirowania zawiesiny należy:

- a) sporządzić zawiesinę kredy w wodzie o stężeniu 0,1 kg kredy/kg zawiesiny
W tym celu:
 - zbiornik zawiesiny napełnić wodą do znaku 1 na jego wewnętrznej powierzchni;
 - wsypać do zbiornika 200 g kredy;
 - za pomocą mieszadła rozprowadzić kredę w wodzie.
- b) włożyć do bębna przemyty worek filtracyjny (tkanina powinna dobrze przylegać do pobocznic bębna);
- c) włączyć na kilkanaście sekund wirówkę; co pozwoli na ułożenie się worka w bębnie;
- d) po ponownym uruchomieniu wirówki spuścić do bębna 1 kg zawiesiny (poziom zawiesiny w zbiorniku powinien osiągnąć znak 2);
- e) wirować zawiesinę do chwili uzyskania całej ilości filtratu, ok. 2 min;
- f) spuścić ze zbiornika resztę (1 kg) zawiesiny, włączając jednocześnie pomiar czasu. Zdemontować rurę spustową.
- g) przy wirującym bębnie (zachowując szczególną ostrożność), ręcznym skrobakiem będącym na wyposażeniu stanowiska pomiarowego, pobrać próbki osadu po 15, 30, 60, 120, 240 i 480 sekundach trwania procesu;
- h) po zakończeniu pobierania próbek, wyłączyć wirówkę;
- i) wyjąć z bębna oraz przemyć worek filtracyjny;
- j) za pomocą wagosuszarki określić zawartość wody w pobranych próbkach i na tej podstawie wyznaczyć ich wilgotność;
- j) otrzymane wyniki pomiarów zanotować w tabeli.

Badanie procesu odwirowywania zawiesiny			
Rodzaj zawiesiny: kreda w wodzie			
Stężenie zawiesiny: 0,1 kg kredy/ kg zawiesiny			
Prędkość obrotowa bębna: 1480 obr/min			
czas trwania odwirowywania	temperatura suszenia	masa próbki poddanej suszeniu	ubytek masy próbki wysuszonej
s	°C	g	%

15			
30			
60			
120			
240			
480			

Opis obsługi wagosuszarki.

- a) załączyć urządzenie wyłącznikiem sieciowym - na wyświetlaczu pojawi się liczba <15.00> malejąca do zera, oznaczająca czas stabilizacji termicznej wagi;
- b) po odliczeniu czasu (gdy na wyświetlaczu pojawi się <dE1>), wcisnąć przycisk wyboru urządzenia współpracującego (**F1** - drukarka, **F2** - komputer) i zatwierdzić wybór klawiszem F1;
- c) po ukazaniu się na wyświetlaczu <LOAD> wcisnąć przycisk **TARE**;
- d) wyjąć z komory suszarniczej szalkę wagi, umieścić na niej badaną próbkę i ponownie umieścić w komorze suszarniczej - na wyświetlaczu pokaże się masa netto próbki;
- e) wcisnąć przycisk F1 w celu ustalenia temperatury suszenia, na wyświetlaczu pokaże się <oC50> - wartość temperatury można zmieniać w zakresie (50÷140) °C wciskając F2;
- f) wciśnięcie F1 zatwierdza ostatni wybór temperatury oraz umożliwia ustawienie czasu próbkowania, na wyświetlaczu pojawi się <SEC5.0> - wciskając F2 można ustawić czas próbkowania co 5, 10, 15 oraz 20 sekund;
- g) wciśnięcie F1 zatwierdza ostatni wybór czasu próbkowania, na wyświetlaczu pojawi się napis <rEADy>, wagosuszarka jest gotowa do pracy;
- h) uruchomić wagosuszarkę wciskając **F1** (na panelu wagosuszarki). Po zakończeniu pomiaru urządzenie wyłącza się samoczynnie.

5. ZAKRES OPRACOWANIA WYNIKÓW POMIARÓW

1. Sporządzić wykres zmian wilgotności osadu w funkcji czasu trwania procesu wirowania.
2. Podać wnioski z przeprowadzonego ćwiczenia.

6. LITERATURA UZUPEŁNIAJĄCA

- [1] KOCH R., NOWORYTA A.: Procesy mechaniczne w inżynierii chemicznej, WNT W-wa 1992
- [2] SERWIŃSKI M.: Zasady inżynierii chemicznej, WNT W-wa 1976

7. TEMATYKA ZAGADNIEŃ KONTROLNYCH

1. Metody rozdziału zawiesin.
2. Podział wirówek i zasady ich działania.
3. Rozkład sił działających na zawiesinę w trakcie jej wirowania.
4. Charakterystyka zawiesin ciała stałego w cieczy.
5. Właściwości osadów filtracyjnych.