

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 - polidispersyjnymi.

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

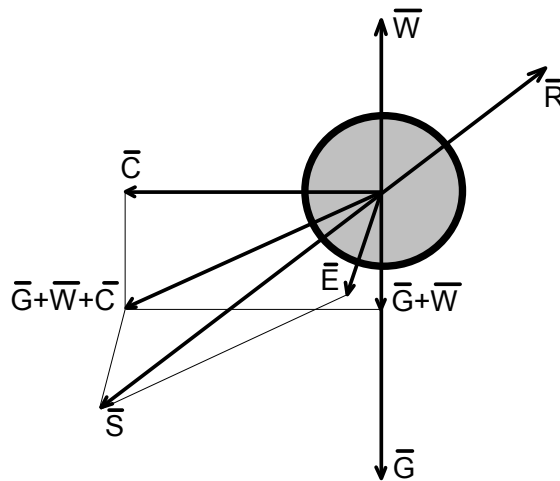
$$\Psi = 4,836 \frac{V_{cz}^{2/3}}{F_{cz}} \quad (1)$$

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

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

w którym nie opisane dotąd symbole oznaczają:

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

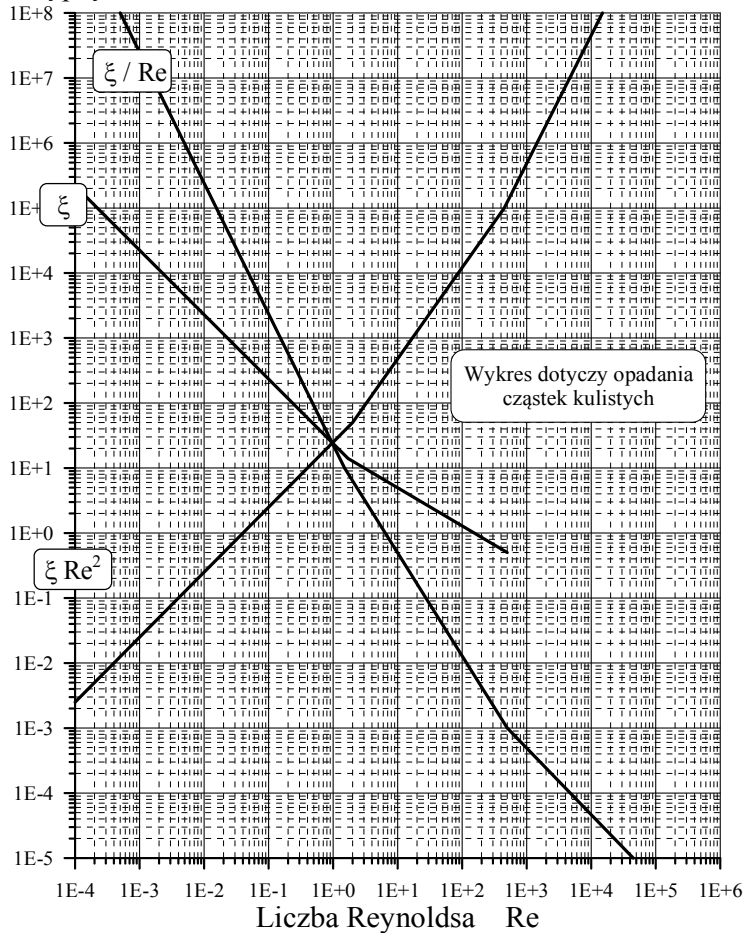
Wykorzystując równanie (2), zależność (3) można zapisać (po prostym przekształceniu) jako

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

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.

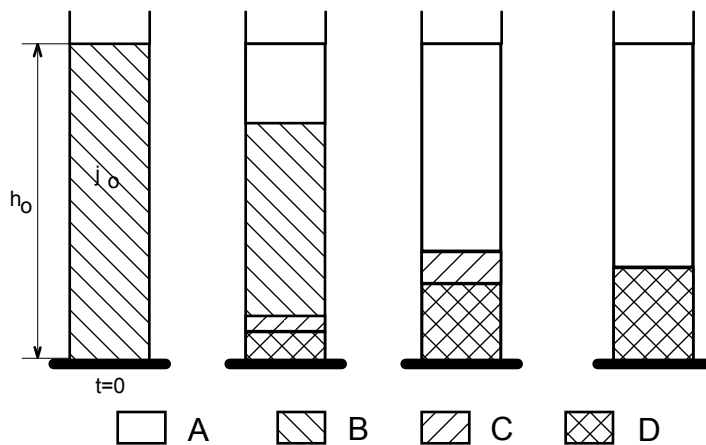


Rys. 2. Wykres do obliczania ruchu cząstek w płynie

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

zawiesinie 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 (zawiesina 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.

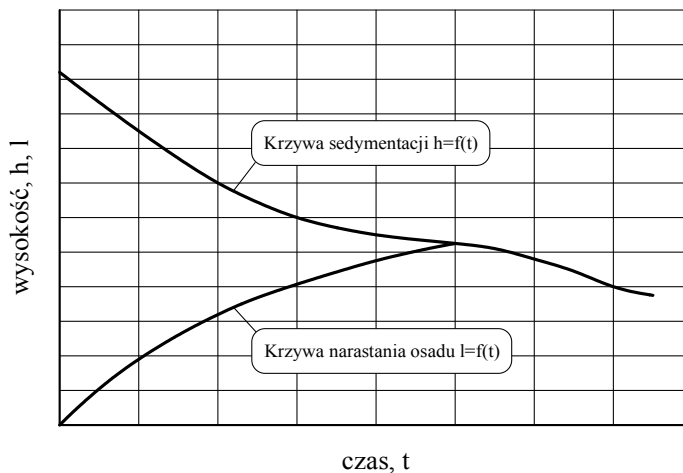


Rys. 3. Przebieg testu sedymentacyjnego

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



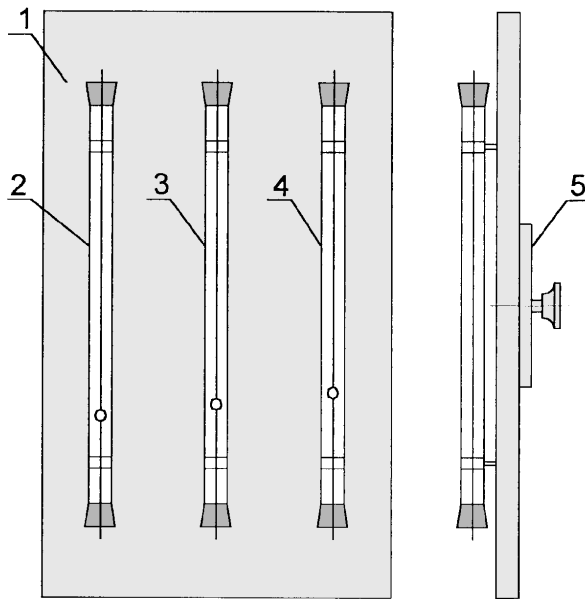
Rys. 4. Krzywa sedymentacji i linia narastania osadu

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 wyznaczania 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

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

Drugą 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:

- zmierzyć temperaturę cieczy w rurach (poprzez pomiar temperatury panującej w laboratorium) oraz przygotować trzy stopery;
- obrócić płytę z rurami o kąt 180° , pamiętając o zwolnieniu i powtórnym uruchomieniu elementu blokującego umieszczonego z tyłu płyty;
- w miarę przekraczania przez kulki górnych kresk naniesionych na rurach, uruchamiać pomiar czasu;
- zanotować w tabeli czas przebycia przez poszczególne kulki ich odcinków pomiarowych wyznaczonych przez kreski na rurach;
- 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:

- przygotować zawiesinę kredy w wodzie;
- po zmierzeniu temperatury dobrze wymieszanej zawiesiny, wlać określoną objętość zawiesiny do menzurki pomiarowej;
- włączyć stoper i w miarę upływu czasu rejestrować w tabeli wysokość tworzących się warstw osadu i czystej cieczy;
- 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.