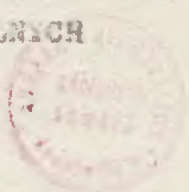


POLITECHNIKA ŚLĄSKA

Instytut Inżynierii Chemicznej i Budowy Aparatury

Janusz WÓJCIK

ANALIZA METOD PROJEKTOWANIA OSADNIKÓW
RADIALNICH



EGES-9

Praca doktorska

Promotor:

Prof.dr hab.inż. Karol MACHNĄJ

66.066 : 662.762 ; 678.704.51] 6043



R-2707

Spis treści

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|
| 1.1 | 1.1.1 | 1.1.2 | 1.1.3 | 1.1.4 | 1.1.5 | 1.1.6 | 1.1.7 | 1.1.8 | 1.1.9 | 1.1.10 | 1.1.11 | 1.1.12 | 1.1.13 | 1.1.14 | 1.1.15 | 1.1.16 | 1.1.17 | 1.1.18 | 1.1.19 | 1.1.20 | 1.1.21 | 1.1.22 | 1.1.23 | 1.1.24 | 1.1.25 | 1.1.26 | 1.1.27 | 1.1.28 | 1.1.29 | 1.1.30 | 1.1.31 | 1.1.32 | 1.1.33 | 1.1.34 | 1.1.35 | 1.1.36 | 1.1.37 | 1.1.38 | 1.1.39 | 1.1.40 | 1.1.41 | 1.1.42 | 1.1.43 | 1.1.44 | 1.1.45 | 1.1.46 | 1.1.47 | 1.1.48 | 1.1.49 | 1.1.50 | 1.1.51 | 1.1.52 | 1.1.53 | 1.1.54 | 1.1.55 | 1.1.56 | 1.1.57 | 1.1.58 | 1.1.59 | 1.1.60 | 1.1.61 | 1.1.62 | 1.1.63 | 1.1.64 | 1.1.65 | 1.1.66 | 1.1.67 | 1.1.68 | 1.1.69 | 1.1.70 | 1.1.71 | 1.1.72 | 1.1.73 | 1.1.74 | 1.1.75 | 1.1.76 | 1.1.77 | 1.1.78 | 1.1.79 | 1.1.80 | 1.1.81 | 1.1.82 | 1.1.83 | 1.1.84 | 1.1.85 | 1.1.86 | 1.1.87 | 1.1.88 | 1.1.89 | 1.1.90 | 1.1.91 | 1.1.92 | 1.1.93 | 1.1.94 | 1.1.95 | 1.1.96 | 1.1.97 | 1.1.98 | 1.1.99 | 1.1.100 |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|

Szanownemu Panu

Prof. dr hab. inż. Karolowi WACHĘJOWI
 składam serdeczne podziękowania za
 opiekę, pomoc i wskazówki w czasie
 wykonywania i redagowania niniej-
 szej pracy

| <u>Spis treści</u> | str |
|--|-----|
| Spis oznaczeń | 5 |
| Wstęp | 7 |
| 1. Prędkość sedymentacji | 10 |
| 1.1 Opis procesu opadania | 10 |
| 1.1.1 Opadanie swobodne | 10 |
| 1.1.2 Opadanie skrepowane | 12 |
| 1.1.2.1 Opis opadania w zakresie przejściowym | 12 |
| 1.1.2.2 Opadanie kolektywne | 13 |
| 1.1.3 Opis opadania skrepowanego okresowego | 16 |
| 1.2 Sposoby matematycznego opisu sedymentacji | 22 |
| 1.2.1 Matematyczne ujęcie sedymentacji Kynch'a | 22 |
| 1.2.2 Ujęcie przy pomocy teorii ruchu drogowego | 27 |
| 1.2.3 Wzory typu Steinsour'a | 28 |
| 1.2.4 Matematyczne ujęcie Scott'a | 30 |
| 1.2.5 Zestawienie wzorów na prędkość sedymentacji i ich sprawdzenie doświadczalne dla zawiesin polidispersyjnych | 32 |
| 1.2.6 Uwagi własne dotyczące przedstawionych ujęć matematycznych | 36 |
| 1.3 Ujęcie własne prędkości opadania skrepowanego zawiesiny polidispersyjnej | 40 |
| 1.4 Wpływ średnicy aparatu na prędkość sedymentacji | 56 |
| 1.5 Wysokość słupa zawiesiny a prędkość sedymentacji | 58 |
| 2. Powierzchnia sedymentacji | 61 |
| 2.1 Metody rachunkowe | 61 |
| 2.2 Obliczanie powierzchni sedymentacji w oparciu o metody graficzne wykorzystujące dane z krzywych sedymentacji | 81 |

| | str |
|--|-----|
| 2.2.1 Metoda Coe i Clevengers [15, 21, 68] | 81 |
| 2.2.2 Metoda japońska [4, 21] | 86 |
| 2.2.3 Metoda Kyncha [69] | 93 |
| 2.2.4 Metoda Talmage'a Fitcha [1, 70] | 94 |
| 2.2.5 Metoda Herty, Zioly [71 - 73] | 100 |
| 2.2.6 Porównanie metod obliczania powierzchni sedymentacji opartych o procedury graficzne | 101 |
| 3. Wysokość osadnika | 103 |
| 4. Uwagi własne do projektowania osadników | 109 |
| 4.1 Propozycja algorytmu projektowanie osadników | 112 |
| 4.1.1 Wstępne stadium projektowania /tzw. koncepcja/ | 112 |
| 4.1.2 Etap założeń techniczno-ekonomicznych /ZTS/ | 113 |
| 5. Podsumowanie i wnioski | 115 |
| Spis literatury | 118 |
| Załączniki | 126 |
| Załącznik I | 126 |
| Załącznik II | 127 |
| Załącznik III | 144 |
| Załącznik IV | 153 |
| Załącznik V | 159 |
| Załącznik VI | 165 |

Spis oznaczeń

| | | |
|--------------------|--|---|
| α | - współczynnik | |
| A | - powierzchnia osadnika | $[m^2]$ |
| c, C | - stężenie | |
| Q_v | - udział objętościowy | |
| d | - średnica cząstki | $[\mu m]$ |
| D | - średnica osadnika | $[m]$ |
| f | - pole przekroju ziarna | $[\mu m^2]$ |
| F | - pole całkowitej powierzchni ziarna | " |
| g | - gęstość masowa opadającego ciała stałego ^{strumienia} | $[kg/m^2 s]$ |
| g_v | - gęstość objętościowa opadającego ciała stałego ^{strumienia} | $[m^3/m^2 s]$ |
| g | - przyspieszenie słoneczne | $[m^2/s]$ |
| G | - strumień opadającego ciała stałego | $[kg/s]$ |
| h, H | - wysokość | $[m]$ |
| k, K | - stała | |
| K^0 | - stała Carman | |
| K, m | - stała | |
| w | - rozcieńczenie | $[\frac{kg \text{ cieczy}}{kg \text{ c. stałego}}]$ |
| m_i | - masa frakcji ziarnowej | $[kg]$ |
| n | - ilość pomiarów | |
| n_i | - ilość ziarn | |
| n | - strumień populacji | $[\frac{\text{ilość cząstek}}{m^2 s}]$ |
| p | - stężenie | $[\frac{m^3 \text{ cieczy}}{kg \text{ c. stałego}}]$ |
| q | - stężenie | $[\frac{kg \text{ c. stałego}}{m^3 \text{ zawiesiny}}]$ |
| Re | - liczba Reynoldsa | |
| S | - siła | $[N]$ |
| \dot{s}, \dot{S} | - strumień cząstek | $\frac{\text{ilość cząstek}}{m^2 s}$ |

| | | |
|-----------|------------------------------------|---|
| t | - czas | [s] |
| V | - objętość ziarna | [μm^3] |
| \dot{V} | - objętościowe natężenie przepływu | [m^3/s] |
| w | - prędkość opadania | [cm/min] |
| x | - stosunek masowy | [$\frac{\text{kg c. stałego}}{\text{kg cieczy}}$] |
| ξ | - porowatość | |
| η | - dynamiczny współczynnik lepkości | [Pa.s] |
| λ | - współczynnik oporów przepływu | |
| ψ | - współczynnik kształtu | |
| ρ | - gęstość | [kg/m^3] |
| σ | - odchylenie standardowe | |

Indeksy dotyczą

- c - ciecz czysta
- e - ekwiwalentny
- f - powierzchnia
- p - prasien
- v - objętość
- w - wylew
- z - zasilenie

Indeks górny $\bar{\quad}$ np \bar{V} dotyczy wartości średniej

symbole oznaczające własności fizykochemiczne bez indeksu np :

ρ, η dotyczą zawiesiny.

WSTĘP

Porównując sedymentację w polu sił ciężkości z innymi operacjami jednostkowymi, może wydawać się, że jest ona stosunkowo prosta w opisie, projektowaniu czy prowadzeniu ruchu w instalacji przemysłowej. Jednak po dokładniejszym zapoznaniu się z przebiegiem opadania w osadniku pracującym w sposób ciągły, trudno nawet ex post wyjaśnić dlaczego dla konkretnych parametrów wejściowych otrzymuje się takie, a nie inne parametry wyjściowe. Świadczy to o tym, że operacja ta w zasadzie nie jest zadawalająco rozpoznana. Dodatkowym utrudnieniem jest różnorodność teorii, sformułowań matematycznych oraz metod pomiaru rozpracowanych po różnych działach nauki /górnictwo, inżynieria sanitarna czy inżynieria chemiczna/. Brak jest pełnego zestawu, sprawdzonych w praktyce metod badawczych i projektowych. Często występują sprzeczności we wzorach i poglądach np. teorii Fitcha [1] i teorii Richardsona i Kirse [2]. Innym utrudnieniem jest stosowane przez badaczy różnorodność sposobów wyrażania stężeń, które komplikuje porównanie wyników uzyskanych dla zawiesin różnych substancji.

Jak wiadomo podstawowymi danymi koniecznymi do obliczenia osadników są: pędowe /objętościowe/ natężenie przepływu zasilenia, stężenie fazy stałej na wlocie, wylewie i przelewie z aparatu, prędkość sedymentacji oraz właściwości fizykochemiczne obu faz. Jak dotąd nie ma odpowiedniej teorii pozwalającej na podstawie powyższych parametrów, na poprawne zaprojektowanie osadnika ten, na określenie powierzchni przekroju poprzecznego i wysokości aparatu, ponieważ, że problemem tym zajmowali się m.in. Stokes, Newton i Einstein.

Z całokształtu przedstawianych powyżej powodów, firmy oferujące osadniki dobierają je najczęściej na podstawie własnych, niepubliko-

wanych reguł empirycznych.

Do celów projektowych, niezależnie od obranej metody potrzebna jest znajomość prędkości sedimentacji. Niestety nie istnieją ściśle metody wyznaczenia wartości tego parametru. Otrzymane z testów okresowych, szeregów empirycznych bądź częściowo teoretycznych wyniki są tylko przybliżeniem ^uszkanej prędkości opadania. Najbliższe rzeczywistości wyniki uzyskuje się z badań na ciągłej instalacji pilotującej. Doświadczenia te są jednak bardzo kosztowne /wymagają dużych ilości zawiesiny, nie mówiąc o samej instalacji/. W związku z tym najczęściej wykonuje się pomiary okresowe w tzw. rurach sedimentacyjnych /kolunnsch/. Wymaga to osobnego zastanowienia się nad adekwatnością przenoszenia wyników uzyskanych dla małych średnic urządzeń pomiarowych do obliczania aparatów dużych rozmiarów. Najwięcej zastrzeżeń wzbudza jednak fakt stosowania do projektowania urządzeń o działaniu ciągłym rezultatów doświadczeń okresowych.

Zasygnalizowane powyżej problemy były przyczyną wielokrotnych badań sedimentacji wykonywanych w Instytucie Inżynierii Chemicznej i Budowy Aparatury Politechniki Śląskiej. Niniejsza praca wykorzystuje część uzyskanych w nich danych doświadczalnych dotyczących zawiesin polidispersyjnych wykazujących opadanie skrapowane z granicą mętności, w szczególności obszaru opadania kolektywnego.

Z uwagi na wymienione na wstępie trudności celem poniższej pracy jest :

- 1/ Zebranie materiału dotyczącego prędkości sedimentacji skrapowanej uporządkowanie go, poddanie krytycznej ocenie, uzupełnienie własnymi rozważaniami teoretycznymi i wynikami badań własnych.
- 2/ Zgromadzenie i uporządkowanie informacji na temat metod projektowania osadników radialnych o działaniu ciągłym, przeprowadzenie krytycznej analizy wymienionych metod w oparciu o przesłanki teoretyczne i przeliczenie z danych eksperymentalnych.

własnych i obcych, wybór metod godnych polecenia do projektowania interesujących nas aparatów.

Stąd monograficzny charakter i nietypowa forma niniejszej pracy. Zamiast całościowego, osobnego przeglądu literatury zastosowano przedstawienie informacji literaturowych w poszczególnych rozdziałach wraz, z własnymi uwagami krytycznymi, które w tekście wyraźnie podkreślono.

1. Prędkość sedymentacji.

1.1 Opis procesu opadania.

Sposób opadania grawitacyjnego cząstek ciała stałego w płynie zależy od ich rozmiaru, kształtu, gęstości obu faz, lepkości ośrodka oraz stężenia i względnej tendencji do przylegania /kohezji/

Wyróżnia się dwa rodzaje sedymentacji : swobodną i skrepowaną [3].

1.1.1 Opadanie swobodne.

Sedymentacja swobodna /cząsteczkowa/ [1] występuje przy bardzo niskich koncentracjach, gdy nie występują siły przylegania i polega na tym, że każda cząstka opada osobno / z prędkością właściwą dla wyżej wymienionych oprócz koncentracji parametrów układu/ - - czyli wpływ cząstek na siebie wzajemnie / wpływ stężenia/ nie istnieje lub jest do pominięcia.

Na opadającą w płynie o gęstości ρ_c pojedynczą cząstkę kulistą o gęstości ρ_s i średnicy d działają następujące siły : ciężkości S_c

$$S_c = \frac{\pi}{6} d^3 \rho_s g \quad /1/$$

wyporu $S_w = \frac{\pi}{6} d^3 \rho_c g \quad /2/$

oporu przepływu $S_o = \frac{\lambda}{2} \rho_c w_o^2 \frac{\pi}{4} d^2 \quad /3/$
oraz

bezładności $S_u = \frac{\pi}{6} d^3 \rho_s \frac{dw_o}{dt} \quad /4/$

Występujący w równaniu /3/ współczynnik oporu przepływu λ zależy od liczby $Re = \frac{w_o d \rho_c}{\eta_c}$.

W obszarze ruchu laminarnego tj. przy $Re < 0,2$ obowiązuje teoretyczne równanie Stokesa :

$$\lambda = \frac{24}{Re} \quad /5/$$

W zakresie ruchu burzliwego gdy $500 < Re < 3 \cdot 10^5$ współczynnik λ jest wielkością stałą $\lambda = 0,44$ /obszar Newtona lub Rittingera/

W przedziale przejściowym /Allena/ współczynnik oporów przepływu jest funkcją $\lambda = \lambda / Re^{-0,5}$.

W całym obszarze liczb $Re \leq 3 \cdot 10^5$ współczynnik ten można opisać korzystając z równania Kilmara [4]

$$\lambda = \frac{24}{Re} + \frac{3,73}{\sqrt{Re}} - \frac{0,00483 \sqrt{Re}}{1 + 3 \cdot 10^{-6} Re^{1,5}} + 0,49 \quad /6/$$

Opisane równaniem /4/ siła bezwładności jest iloczynem masy i przyspieszenia. Wielu autorów [4 - 6] podaje, że przyśpieszeniu ulega ta równik warstwa cieczy przylegająca do cząstki i wobec tego proponują następujący zapis $S_b = \frac{\pi}{6} d^3 / \rho_c + a \cdot \rho_c / \frac{d}{dt} w_0$ gdzie współczynnik $a = 0,5$ dla cząstek kulistych i zbliżonych do kul, natomiast dla cylindrów $L/d = 1$ i ruchu prostokątnego o osi $a = 0,75$.

Ponieważ małe cząstki / w niniejszej pracy wymiar maksymalny cząstek był mniejszy od $200 \mu m$ / praktycznie od początku opadania poruszają się ruchem jednostajnym prostoliniowym w zakresie $Re < 0,1$ stąd z pierwszej zasady dynamiki zachodzi równoweże sił

$$S_c = S_w + S_o \quad /7/$$

Podstawiając do równania /7/ równanie / 1,2,3 i 5/ otrzymamy wzór wprowadzony przez Stokesa

$$w_0 = \frac{d^2 / \rho_c - \rho_c / g}{18 \eta_c} \quad /8/$$

Gdy opadają cząstki niekuliste, ale izometryczne to zamiast wzoru /5/ można zastosować [9,10]

$$\lambda = \frac{d}{Re} \quad a = \frac{24}{0,84 \lg \frac{\psi}{0,065}} \quad \psi = \frac{F}{F_z}$$

/5/

$$Re = \frac{w_o d_c \rho_c}{\eta_c} \quad d_c = \sqrt[3]{\frac{6 V_z}{\pi}}$$

gdzie F to powierzchnia kuli o objętości ziarna, F_z - powierzchnia ziarna a V_z - objętość ziarna.

1.1.2 Opadanie skrępowane.

1.1.2.1 Opis opadania w zakresie przejściowym.

W miarę wzrostu koncentracji początkowej ziarn w zawieszynie osiąga się w końcu takie stadium /tzw. przejściowe/, przy którym wystąpi nierzalne zmniejszenie się szybkości sedymentacji. Zawieszyny o zagęszczeniu większym od powyższego podlegają opadaniu skrępowanemu [3] /zakłóconemu, hamowanemu/, w zakresie przejściowym. Poniżej przedstawiono najczęściej cytowane wzory do obliczenia prędkości dla powyższego przedziału stężeń.

tabl. 1. Wzory na prędkość sedimentacji w zakresie przejściowym

| lp | Wzór | Autor i źródło |
|-----|--|----------------|
| 1.1 | $w = w_0 / (1 - \alpha c_v)$ $\alpha = 2,5$ dla kul | Einstein [11] |
| 1.2 | $w = w_0 / (1 - 2,6 c_v^{0,5})$ | Einstein [12] |
| 1.3 | $w = \frac{k d^2 / (\rho_s - \rho_c) / g}{\eta_c}$ | Robinson [13] |
| 1.4 | $w = \frac{\epsilon d^2 / (\rho_s - \rho_c) / g}{18 \eta_c}$ | Hawkeley [13] |

gdzie w_0 - prędkość opadania swobodnego obliczona ze wzoru Stokesa [8]

1.1.2.2 Opadania kolektywne

Jeżeli w zawieszynie o stężeniu początkowym większym od stężenia przejściowego w dalszym ciągu będzie wzrastać zawartość ciała stałego, to w końcu osiągnięte zostanie stężenie graniczne, przy którym utworzy się wyraźna powierzchnia międzyfazowa oddzielająca strefę cieczy czystej od zawiesziny zwane granicą spętności, a cząstki ciała stałego sedymentują z prędkością będącą funkcją stężenia. Ten typ opadania nazywa się kolektywnym [3], strefowym lub skonsolidowanym [1] bądź gromadnym [4].

Dalszy wzrost stężenia początkowego zawiesziny powodują zmniejszanie się prędkości sedymentacji, a suspensja po przekroczeniu koncentracji tzw. krytycznej osiąga stan kompresji, w którym następuje upakowanie leżących na sobie cząstek. Nacisk pochodzący od ciężaru osadu i ciśnienie hydrostatyczne powoduje wypychanie cieczy z przestrzeni między-ciernowej-tworzą się charakterystyczne kanały [14 - 16], którymi ciało przediera się ku górze.

Gierczyk i Szczepański [17] przeprowadzili pomiary opadania zawieszin bidyspersyjnych węgla kamiennego w wodzie i wyciągnęli wniosek uzasadniający występowanie ruchu kolektywnego - dla cząstek większych opadających w ośrodku ziaren mniejszych opory przepływu są większe niż dla cząstek mniejszych opadających w czystej cieczy. Przy odpowiednio dużym stężeniu zjawisko to powoduje konsolidację ruchu zawiesziny.

Richardson i Sirzs [2] przeprowadzili badania opadania zawieszin mono i bidyspersyjnych kulek szklanych i stwierdzili, że opadanie kolektywne wcale nie występuje i nawet dla suspensji polidyspersyjnej tuż pod granicą zgętności zawsze występuje warstwa najmniejszych ziaren / zachodzi segregacja/.

Richardson i Shabi [18] badali opadanie zawieszin polidyspersyjnych przy pomocy materiałów radioaktywnych i otrzymali, że ruch kolektywny występuje jedynie w przypadku floculacji dla zawieszin o $C_v > 0,4$ /piasek cyrkonowy $\rho_s = 4420 \text{ kg/m}^3$ /, a dla stężeń mniejszych zachodzi segregacja.

Battaglia [14] twierdzi, że gdy zawieszina zawiera tylko wąską klasę ziarnową, to nawet dla dużych koncentracji nie obserwuje się ruchu kolektywnego, a gdy składa się z dwu nie graniczących ze sobą frakcji, to opadanie skonsolidowane rozpoczyna się dopiero po wypadnięciu klasy grubszej. Wydaje się, że pogląd ten jest wewnętrznie sprzeczny bo, jeśli dla zawieszin monodispersyjnych nie występuje opadanie kolektywne, to jak może wystąpić dla zawiesziny bidyspersyjnej po wypadnięciu klasy grubszej ?

Battaglia [14] dalej podaje, że zawieszina o ciągłym polidyspersyjnym rozkładzie ziarnowym wydaje się tworzyć pewnego rodzaju continuum granulometryczne osiadające ze stałą prędkością.

Fitch [1] twierdzi, że opadanie skrzepowane zachodzi gdy cząstki ciała stałego stykają się, tworząc plastyczną, przestrzenną strukturę /siatkę/, ciecz filtruje się przepływając przez siatkę ku górze a wszystkie cząstki utrzymujące się w tej strukturze ześluzowane są do opadania z tą samą prędkością. Dla zawiesin o stężeniu z przedziału od przejściowego do granicznego struktura jest rozrzedzona i większe cząstki mogą się przez nią przedrzeć. Ale ze wzrostem koncentracji siatka ta umocnia się i nawet cząstki są w niej utrzymywane.

Wg Bischoffa [4] proces sedymentacji stężonych zawiesin zależy nie tylko od stężenia ciała stałego, ale również od zjawisk zachodzących na powierzchni międzyfazowej cząstka - płyn. Innego rodzaju opadanie obserwujemy w cieczach niepolarnych i polarnych.

W celu stwierdzenia czy w trakcie opadania kolektywnego zachodzi segregacja wykonano następujące doświadczenie dla zawiesiny kredy mielonej w wodzie :

Ustalono wstępnie, że dla stężenia $C_v = 0,1$ zachodzi opadanie z granicą mętności. Zawiesinę o takim stężeniu umieszczono w pipecie Andreasena i po wymieszaniu zaczęto mierzyć czas. W trakcie opadania pobrano trzy próbki 10 ml zawiesiny po 2, 15 i 71 minutach. Próbki te sfotografowano na mikroskopie skaningowym. [19].

Otrzymane obrazy oceniono przy pomocy półautomatycznego analizatora obrazu. Otrzymane wyniki zamieszczono w tabl. 2

tabl. 2 Wyniki analizy ziarnowej zawiesiny w trakcie opadania z granicą mętności

| Próbka | Czas opadania [min] | $\bar{F} [\mu m^2]$ | σ | n |
|--------|------------------------|---------------------|----------|------|
| 1 | 2 | 3,77 | 8,90 | 757 |
| 2 | 15 | 1,44 | 4,03 | 1016 |
| 3 | 71 | 2,51 | 4,87 | 1411 |

gdzie \bar{F} -średnie pole przekroju ziarna

σ - odchylenie standardowe

n - ilość analizowanych ziaren

Uzyskane wyniki z uwagi na duży rozrzut nie wykluczają opadania kolektynowego.

Wydaje się, że najbardziej prawdopodobne są twierdzenia Fitcha [1] orazczyka i Szczepańskiego [17].

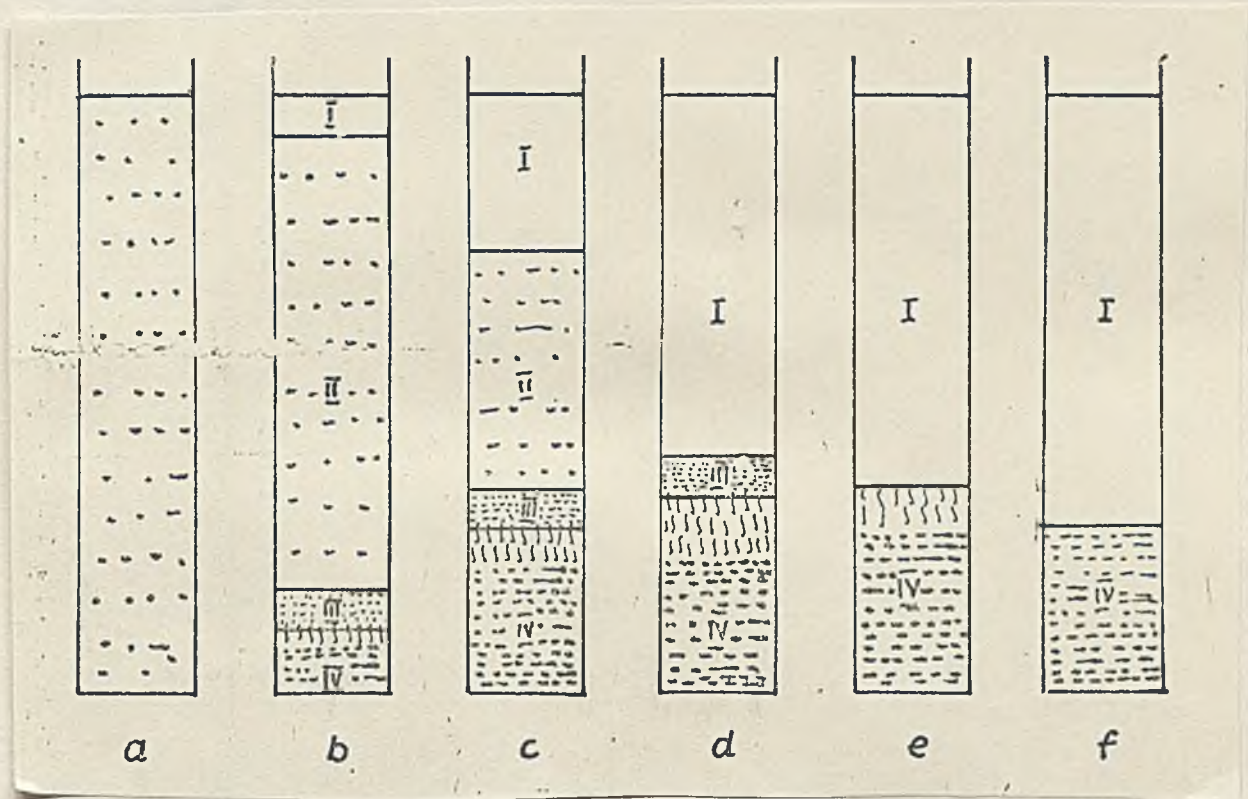
1.1.3 Opis opadania skrapowanego okresowego.

Aby zrozumieć zjawisko zachodzące w osadniku ciągłym kołysanym jest zapoznanie się z przebiegiem opadania okresowego.

Opis sedymentacji okresowej zawiesiny o stężeniu początkowym zapewniającym opadanie kolektynowe podali podczas pierwszego Cee i Clevenger w fundamentalnej pracy [15] do dzisiaj wykorzystywanej przez wszystkich poważnych badaczy i projektantów.

Po wymieszaniu w naczyniu pomiarowym, ziarna ciała stałego są równomiernie rozmieszczone w całej objętości zawiesiny, czyli jej stężenie jest w każdym miejscu jednakowe /Rys. 1a/. Po pewnym czasie /Rys. 1b/ zależnym od składu granulometrycznego, stężenia i innych parametrów fizykochemicznych /patrz Rozdz. 1.1/ wytwarza się w zawieszynie cztery strefy I, II, III i IV przy czym pomiędzy cieczą czystą I a strefą jednoczącego opadania kolektynowego II widoczna jest wyraźna granica międzyfazowa zwana granicą mętności. Strefa IV na dnie naczynia to warstwa komprimującego osadu, którą można oszacować bezpośrednio lub pośrednio /densometr/ wiedząc, że jej górna powierzchnia jest granicą wcześniej opisanym kanałom /kominom/. Bezpośrednio nad IV znajduje się tzw. strefa przejściowa III, której zachowanie badali Gaudin i Fuerstenau [14] przy pomocy pomiarów densometrami rentgenowskimi. Grubość strefy III pozostaje stała podczas opadania /Rys. 1b,c/, zmniejsza

ona tylko swoje pokolenie.



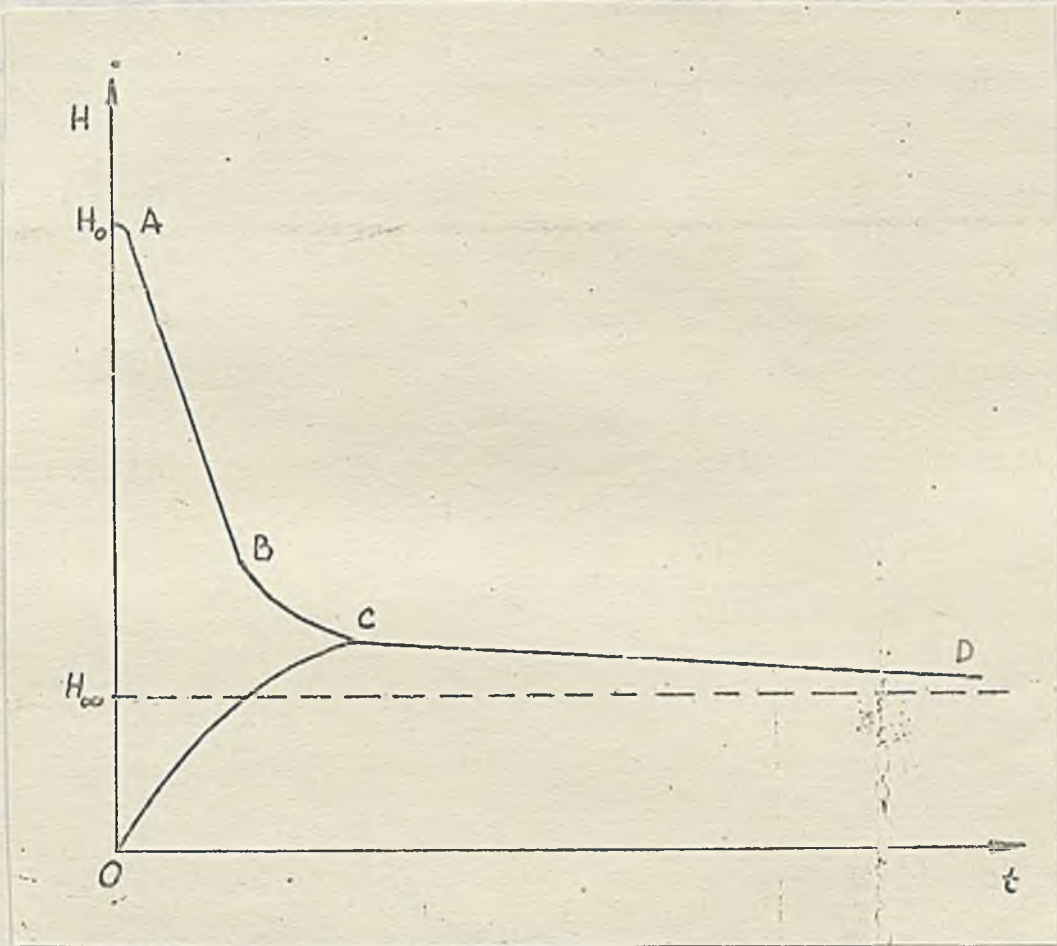
Rys. 1 Kolejne etapy adymentacji okresowej.

Z chwilą zaniku strefy II /Rys. 1d/ granica wętności oddziela bezpośrednio strefy I i III. Następnie grubość III zanikająca się, a stała do tej pory szybkość osadzenia granicy wętności maleje. Po pewnym czasie /Rys. 1 e/ w naczyniu pozostaje tylko warstwa cieczy czystej I i komprymujący osad IV w którym bardzo wolno zanikają kanały /Rys. 1f/. Moment, w którym zanika strefa przejściowa III przyjęto uważać punktem krytycznym lub kompresji.

Należy zaznaczyć, że niektórzy autorzy uważają strefę III i IV za jedną fazę gęstą i wtedy czas krytyczny definiuje się jako czas zaniku strefy II /faz. fazy rzadkiej/ [20]

Opisany powyżej proces opadania okresowego można przedstawić i graficznie.



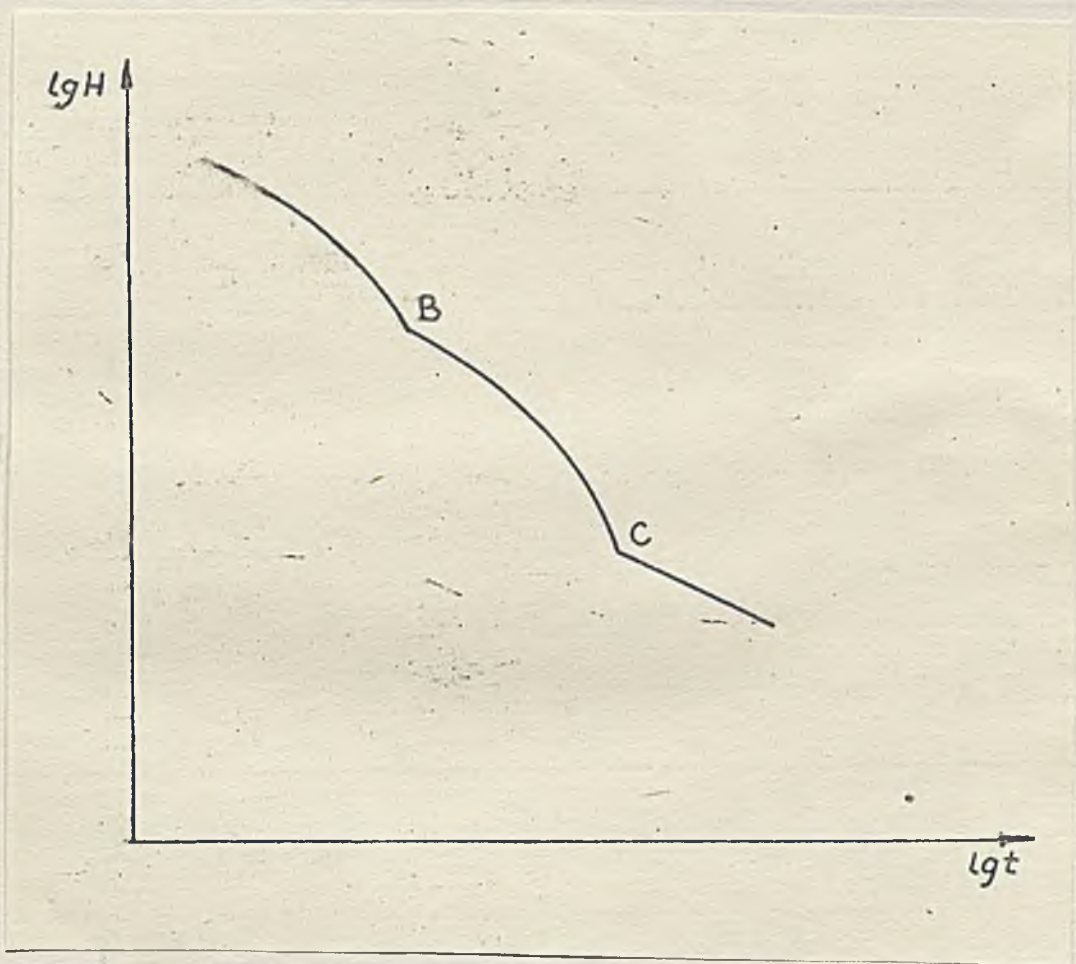


Rys. 2 Wykres krzywej sedymentacji

Linie ABCD na Rys.2 będące wykresem położenia granicy mętności w funkcji czasu nasywana jest krzywą sedymentacji. Odcinek H_0A tzw. rozbiegowy może, ale nie musi wystąpić /zależy to od własności układu tj. od składu ziarnowego, tendencji do flokulacji, intensywności mieszania, lepkość ośrodka itp./. \overline{AB} to wykres opadania kolektywnego, ze stałą prędkością zależną przede wszystkim od stężenia początkowego zawiesiny /granice mętności oddziela strefy I i II/. Krzywa BC przedstawia sedymentację w strefie przejściowej z malejącą prędkością /granice mętności oddziela warstwę I i III/. Punkt C to punkt krytyczny /zanika strefa III/. Linia CD jest wykresem kompresji osadu /Rys. 1a,f/, Krzywa CC przedstawia narastanie osadu /strefy IV/ na dnie naczynia. H_∞ to wysc-

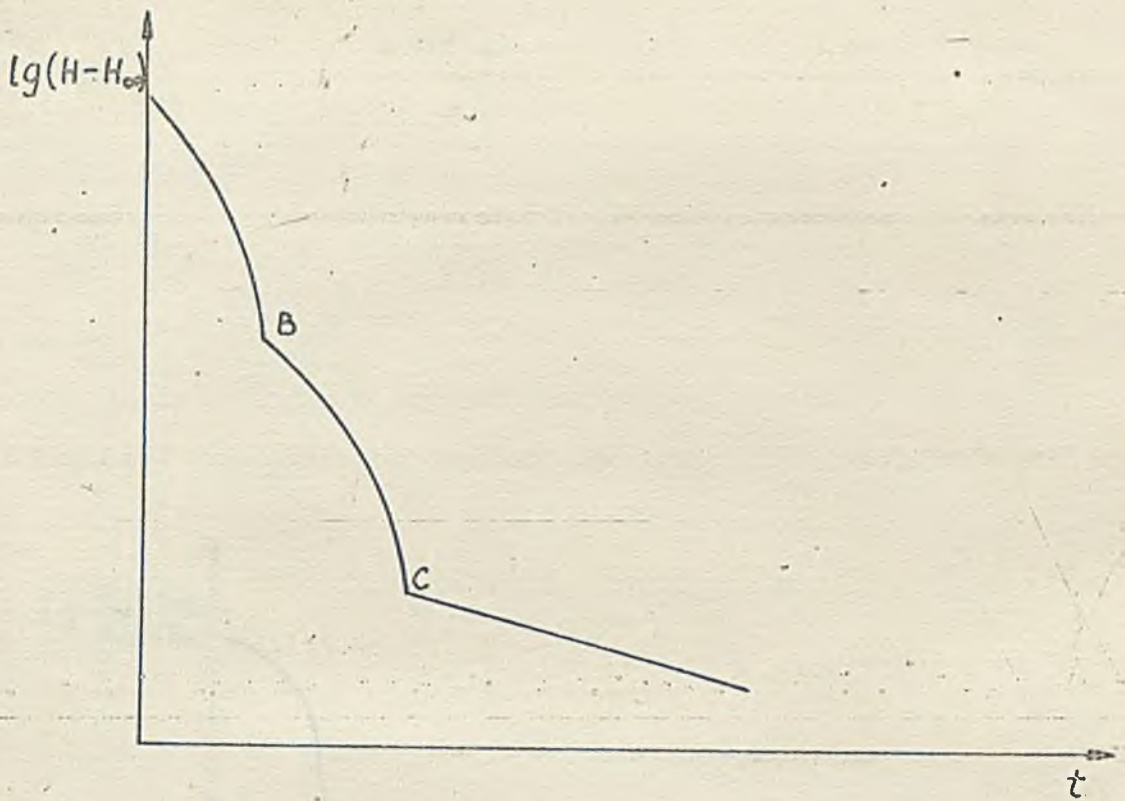
$\lg(H-H_0)$

kość osadu po niekończącym czasie kompresji. Należy w tym miejscu wspomnieć, że istnieją również inne formy przedstawienia krzywej sedimentacji np. /Rys.3/ [1] wykres $\lg H$ od $\lg t$, wykres Roberta /Rys.4/ [1] który przedstawia $\lg \frac{H - H_\infty}{H_0 - H_\infty} = f(t)$. Czasami stosuje się również tzw. wykresy unormowane /Rys.5/ $\lg \frac{H/H_0}{H_0/H_\infty}$ od $\lg t / H_0/H_\infty$ [21]. Można także spotkać wykresy zredukowanej wysokości osadu $\lg \frac{H - H_\infty}{H_0 - H_\infty}$ od czasu /Rys.6/ [20].

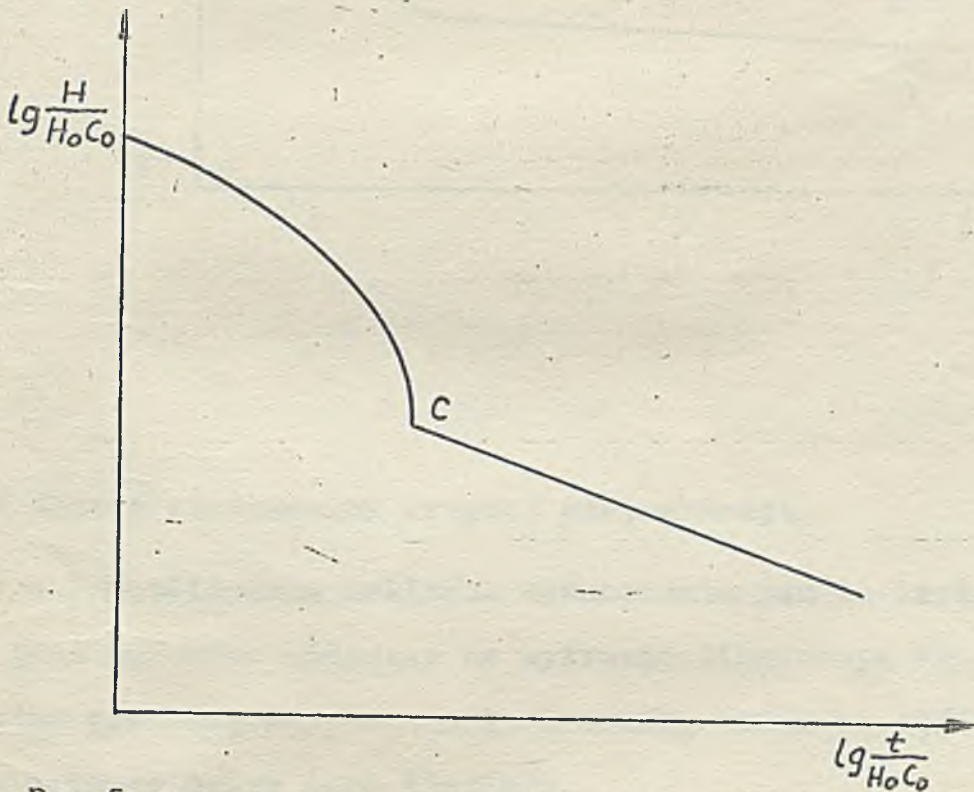


Rys.3 Wykres $\lg H$ od $\lg t$

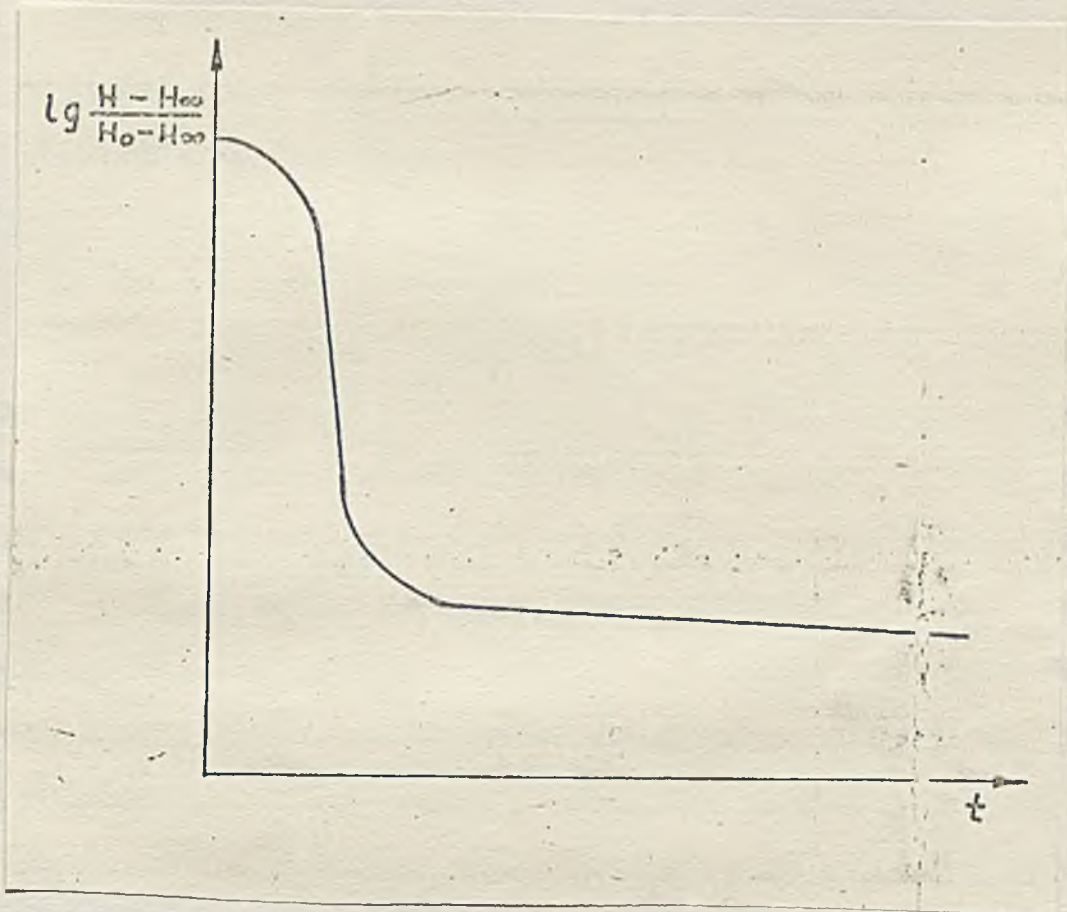
Rys.4 Wykres unormowany krzywej sedimentacji.



Rys. 4 Wykres Roberta



Rys.5 Wykres unormowany krzywej sedimentacji.



Rys. 6 Wykres zredukowany krzywej sedymentacji.

Rys. 3 - 5 umożliwiają dokładne wyznaczenie punktu krytycznego, jeśli jest on słabo widoczny na wykresie klasycznym /Rys.2/.

Znając przebieg sedymentacji okresowej można przejść do prób matematycznego opisu tego zjawiska.

1.2 Sposoby matematycznego opisu sedymentacji.

1.2.1 Matematyczne ujęcie sedymentacji Kyncha.

Już Coe i Clevenger [15] z obserwacji krzywych sedymentacji otrzymanych dla różnych stężeń początkowych danej zawiesiny wyciągnęli następujące wnioski :

- 1/ prędkość opadania początkowego / stałe nachylenie krzywej sedymentacji / dla danej zawiesiny jest tylko funkcją koncentracji początkowej.
- 2/ zmniejszenie prędkości sedymentacji w strefie przejściowej spowodowane jest przesuwaniem się ku górze stref o większym stężeniu, ograniczających możliwości przepływu ciecia stałego.

Jednak dopiero Kynch [14] potrafił wykorzystać te spostrzeżenia i przy pomocy pewnych wywodów matematycznych otrzymać interesujące rezultaty tzn. metodę graficzną pozwalającą na podstawie jednego testu okresowego znaleźć prędkość sedymentacji jako funkcji stężenia. Podstawą do tych rozważań były zewnętrzne obserwacje opadających zawiesin, a właściwie krzywych sedymentacji. Wywody te oparte są na następujących założeniach :

- 1/ prędkość sedymentacji danej zawiesiny zależy wyłącznie od lokalnego stężenia cząstek,
- 2/ koncentracja ciecia stałego jest jednokrotna w każdym przekroju poprzecznym,
- 3/ stężenie początkowe jest takie samo w całej zawieszynie lub rośnie w kierunku dna,
- 4/ prędkość sedymentacji dąży do zera jeżeli stężenie osiągnie wartość koncentracji koagracji na dnie naczyń,
- 5/ zawiesina jest monodispersyjna,
- 6/ wpływ ścian naczyń sedymentacyjnego może być pominięty.

Jeżeli strumień opadających cząstek zdefiniować jako iloczyn lokalnej koncentracji rozumianej jako ilość cząstek w jednostce objętości zawiesiny i prędkości sedymentacji

$$\dot{s} = c \cdot v \quad /9/$$

a h jako wysokość dowolnego przekroju poprzecznego względem dna naczynia, to różnica strumieni dla h i h + dh w czasie dt wyniesie

$$[\dot{s} / h + dh - \dot{s} / h] dt = d\dot{s} dt = dt dh \frac{\partial \dot{s}}{\partial h} \quad /10/$$

Po elementarnych przekształceniach

$$\frac{\partial \dot{s}}{\partial t} = \frac{\partial \dot{s}}{\partial h}$$

$$\frac{\partial \dot{s}}{\partial h} = \frac{\partial \dot{s}}{\partial c} \cdot \frac{\partial c}{\partial h}$$

z równania /9/ $\dot{s} = \dot{s} / c$

$$\frac{\partial c}{\partial t} - \frac{\partial \dot{s}}{\partial c} \cdot \frac{\partial c}{\partial h} = 0 \quad /11/$$

w opisanego w rozdziale 1.1.3 mechanizmu procesu wynika, że $c = c / h, t$ czyli

$$dc = \frac{\partial c}{\partial h} dh + \frac{\partial c}{\partial t} dt$$

gdy $c = const$ jak np. podczas jednostajnego opadania kolektywnego wtedy $dc = 0$

$$\frac{\partial c}{\partial h} dh = - \frac{\partial c}{\partial t} dt$$

$$\frac{\partial c}{\partial h} = - \frac{\frac{\partial c}{\partial t}}{\frac{dh}{dt}} \quad /12/$$

Podstawiając równanie /12/ do równania /11/ otrzymamy

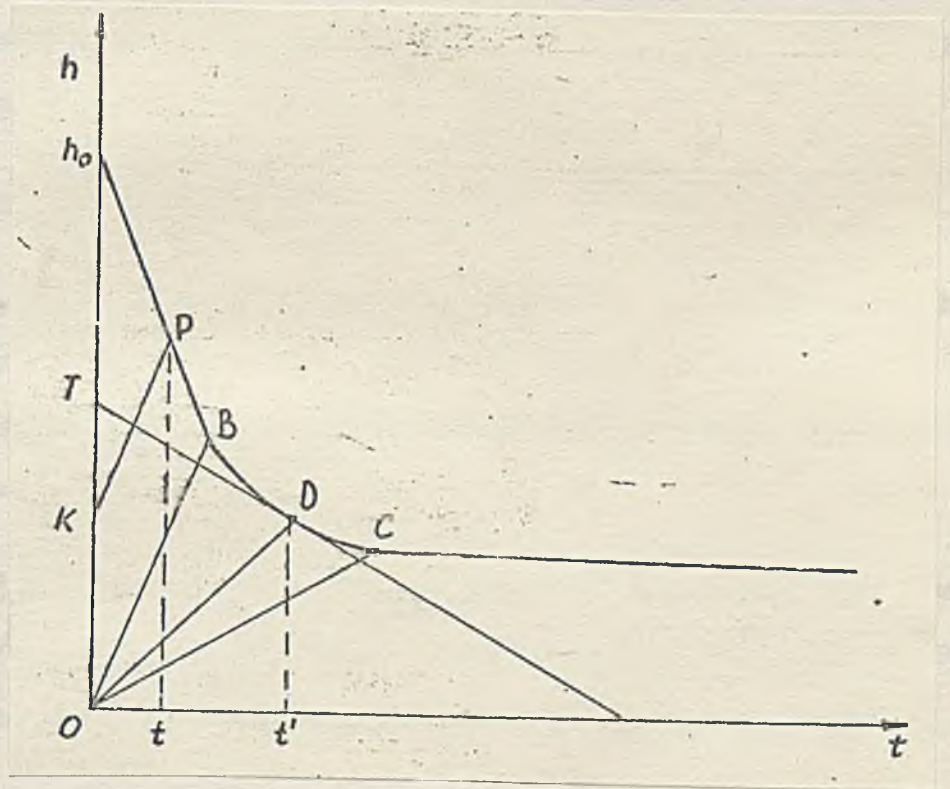
$$\frac{\partial c}{\partial t} - \frac{\partial \dot{s}}{\partial c} \left[- \frac{\frac{\partial c}{\partial t}}{\frac{dh}{dt}} \right] = 0$$

stąd $-\frac{\partial \dot{s}}{\partial c} = \left(\frac{dh}{dt} \right)_f = w_f$ /13/

nowie i indeks f wprowadzono aby powyższego wyrażenia nie mylić z prędkością opadania, a w_f to prędkość fali o stężeniu $c = \text{const.}$ Kynch wprowadzas pojęcie fali stężenia, którą ^{pod} można rozumieć poruszającą się od dna naczynia powierzchnią o stałym stężeniu.

Poniższe rozważenie dotyczy zawiesziny dla której otrzymuje się klasyczną krzywą opadania jak na Rys. 7.

Jeżeli zawiesina o stężeniu początkowym c_0 zapoczniającym opadanie kolektywne z prostoliniowym odcinkiem na krzywej opadania podlega sedymentacji, to na dnie naczynia zaczynają tworzyć się fale /powierzchnie/ o koncentracji wyższej od stężenia c_0 i przemieszczają się ku górze. Granica mgłocistości opada tak długo ze stałą prędkością, aż fale o stężeniu / $c > c_0$ / dotrzą do zwierciadła zawiesziny. Wtedy prędkość sedymentacji maleje ze wzrostem stężenia.



rys. 7 Konstrukcje graficzne Ryacha

Rozpatrzmy przypadek przedstawiony na rys. 7. Linie równoległe do OB np. KP mają pochylenie $w_f = \left(\frac{dh}{dt} \right)_f$ - są to tzw. linie stałego stężenia / tutaj c_0 /. Odcinek OC odpowiada linii stałej koncentracji c_{max} /nie uwzględniając zdolności kompresji osadu/. Odcinki łączące punkt O z punktami krzywej BC /np. D/ są obrazami linii stałego stężenia dla koncentracji pośrednich między c_0 i c_{max} .

Rozważmy przebieg odcinka KP. Położenie P wynika z przemieszczenia się z K fali o stałym składzie c_0 z prędkością w_f . Przez powierzchnię tę opadają cząstki z prędkością w_g . Wobec tego całkowity strumień populacji przechodzący przez poruszające się od K do P czoło fali, w czasie t, w którym fala osiąga swierciedło

/punkt F/, wynosi

$$n = c_0 / w_f + w_s / t \quad /14/$$

Ponieważ F odpowiada zwierciadłu zawiesziny, to n musi być równa ilości cząstek początkowo będących powyżej F

$$c_0 / w_f + w_s / t = c_0 / h_0 - h_k / \quad /15/$$

W związku z tym, że stężenie c_0 jest na początku jednakowe w całej zawieszynie, a prędkość sedymentacji zależy tylko od lokalnej koncentracji cząstek, linia AFB jest odcinkiem prostej, mającej pochYLENIE $w_s = - \frac{dh}{dt}$.

Odcinek \overline{OD} , jak wspomniano wyżej, odpowiada położeniu punktów o stężeniu $c \in /c_0, c_{max}/$. Gdy fala o stężeniu c dojdzie do punktu D to wszystkie cząstki zawiesziny muszą przejść przez jej środek, czyli

$$c / w_f + w_s / t = c_0 / h_0 - c / \quad /16/$$

Kreśląc styczną do krzywej ABCD w punkcie B otrzymamy na jej przecięciu z osią rzędnych punkt T, dla którego

$$w_s' \cdot t' = h_f - h_D \quad /17/$$

$$w_f' \cdot t' = h_D \quad /18/$$

stąd $1/w_s' + w_f' / t' = h_f \quad /19/$

podstawiając równanie /19/ do /16/ otrzymamy

$$c = \frac{c_0 h_0}{h_f} \quad /20/$$

W ten sposób rysując styczne do odpowiednich punktów krzywej BDC i wyznaczając w nich nachylenia, można określić prędkość opadania dla dowolnej wartości stężenia z przedziału c_0, c_{max} .

Przedstawione powyżej rozumowanie określa się jako metodę graficzną Kynch'a otrzymania $w_s = w_s / c$ /prędkości sedymentacji danej zawiesiny jako funkcji stężenia/.

Niestety istnieją zawiesiny monodyspersyjne [1,22] nie stosujące się do wyprowadzonych związków - są to zawiesiny nieidealne, tworzące osady bardzo ściśliwe.

Pominięty przez Kynch'a problem narastania osadu na dnie naczyń próbował rozwiązać Filler [23]. Rozważał on, że odcinki typu OD /Rys. 7/ będące liniami stałego stężenia, nie powinny zaczynać się w początku układu, ale w górnej warstwie osadu - oprócz krajowej sedymentacji potrzebna jest także krzywa narastania osadu. Otrzymana przez niego modyfikacja metody Kynch'a na razie nie nadaje się do dalszego wykorzystania, gdyż jest bardzo skomplikowana, a oprócz tego aby ją stosować trzeba mieć uprzednio wyznaczoną funkcję $w_s = w_s / c$ - czyli to co jest celem trzeba znać wcześniej.

1.2.2 Użycie przy pomocy teorii ruchu drogowego.

Ariz i Amundson [24] stwierdzili, że do rozwiązań sedymentacji można wykorzystać teorię ruchu drogowego. Tropem tym poszli Jordache i Corbu [25]. Ich podstawowe założenia były następujące:

- 1/ ziarna opadające w zawieszynie oddziałują między sobą i wtedy poruszają się kolektywnie,
- 2/ opadające cząstki oddziałują z płynem co powoduje ruch indywidualny,
- 3/ oba oddziaływania zachodzą równocześnie z różnym prawdopodobieństwem.

4/ oddzielające ze sobą cząstki uzyskują tę samą prędkość minimalną, z którą porusza się wolniej niż z nich .

Na podstawie powyższych założeń autorzy uzyskali następujący

wzór :
$$\frac{w}{w_c} = 1 - \left(\frac{C_v}{C_{v \max}} \right)^{1/3} \quad /21/$$

gdzie $C_{v \max}$ to stężenie zawiesiny po nieskończonym czasie sedymentacji .

1.2.3 Wzory typu Steineura.

W 1926 roku Robinson zaproponował modyfikację wzoru Stokesa /8/ do postaci $w = \frac{k d^2 / \rho_s - \rho / g}{\eta}$, k - stała empiryczna /22/

gdzie zamiast parametrów czystej cieczy należy wstawić parametry zawiesiny, a otrzymana prędkość będzie wartością obserwowaną względem dna naczynia.

Jeżeli do powyższego wzoru za parametry fizykochemiczne zawiesiny wstawić parametry cieczy czystej to otrzymamy wzór /1.3 tabl.1/ będzie niekiedy opisywał opadanie w zakresie przejściowym.

Steineur [3, 13] w oparciu o pewne rozważania teoretyczne oraz doświadczenia nad sedymentacją taploki w oleju uzyskał następujący wzór :

$$w = \frac{d^2 / \rho_s - \rho / g}{18 \eta_c} \varepsilon^2 \cdot 10^{-1,82/1-\varepsilon} \quad /23/$$

gdzie : $\varepsilon = \frac{v}{v_s + v_c} = 1 - C_v$ /24/

a empiryczna funkcja $f / \varepsilon / = 10^{-1,82/1-\varepsilon}$ /26/

ujmują wpływ stężenia zawiesiny na lepkość ośrodka.

W pracy [3] przeprowadzono szczegółową ocenę metod określania prędkości sedymentacji zawiesin monodispersyjnych. Według niej wzór /23/ jest wśród innych formuł najbardziej zgodny z doświadczeniem.

Bardzo interesującą modyfikacją powyższego wzoru dla zawiesin monodispersyjnych o ziarnach małych wymiarów, ale dowolnego kształtu, przedstawiono w pracy [26]

$$\pi = w_0 \frac{\epsilon - b/2}{1 - b} \cdot 10^{-3} \frac{1,82/1 - \epsilon}{1 - b} \quad /27/$$

gdzie w_0 jest prędkością opadania swobodnego wyliczoną ze wzoru Stokesa b - zależy od kształtu i wielkości ziaren i jest równe

$$b = \frac{\text{def} \quad \text{objętość cieczo porwanej}}{\text{objętość cieczo i czątki}} \quad /28/$$

Dla cementu $b = 0,24 - 0,34$, a dla proszku asmerylowego /karborundu/ wartości b przedstawia tabl. 3.

tabl. 3. Wartości współczynnika b dla ziarn karborundu

| | | | |
|-----------------------|-------|-------|-------|
| d [μm] | 4,6 | 9,6 | 12,2 |
| b | 0,350 | 0,288 | 0,268 |

W pracy [26] podano, że dla kuli $b = 0$. Jest to sprzeczne z obserwacjami [4-8, 27-29]. W tym przypadku b powinno wynosić ok. 0,333

1.2.4 Matematyczne ujęcie Scotta [30].

Dla przepływu płynu przez złożo porowate złożone z kulek jednakowej średnicy d , prędkość płynu dana jest przez sprawdzone empirycznie równanie Carmana

$$w_0 = \frac{d^2}{K^0 \eta_c} \frac{\varepsilon^3}{36(1-\varepsilon)^2} \frac{\Delta p}{L} \quad /29/$$

Scott ze Honatem podaje, że równanie to jest również prawdziwe dla cząstek nieskulekistych, a Coulson [13] twierdzi, że K^0 zmienia się w zależności od kształtu i rozmiaru ziarn między 3,2 a 5,8.

Zastosowanie równania /29/ do sedymentacji jest możliwe po zamianie spadku ciśnienia na jednostec długości $\frac{\Delta p}{L}$ na ciężar cieła stałego pomniejszony o siłę wyporu w odniesieniu do jednostki wysokości zawiesziny, które te wielkości są sobie równoważne. Stąd

$$\frac{\Delta p}{L} = (1-\varepsilon) / \rho_s - \rho_c / g \quad /30/$$

Wstawiając równanie /30/ do równania /29/ oraz przyjmując $w_c = w$ / ruch cząstek w nieruchomym płynie /

$$w = \frac{d^2 / \rho_s - \rho_c /}{36 K^0 \eta_c} \frac{\varepsilon^3}{1-\varepsilon} \quad /31/$$

Zgodnie z obserwacjami [4-B, 27-29] pewna ilość cieczy przylega do opadających cząstek i jest ona proporcjonalna do ich objętości.

Wobec tego Scott cytując za Gaudinam

$$\varepsilon = 1 - C_v \cdot z \quad /32/$$

gdzie
$$z = \frac{C_{v2} + C_v}{C_v} \quad /33/$$

Jeżeli ρ_{fluc} jest gęstością opadającej jednostki złożonej z ziarn i przylegającej cieczy to

$$w = \frac{d^2 / \rho_{fluc} - \rho_c / \rho}{36 K^0 \eta_0} \frac{(1 - \epsilon_v z)^3}{z \epsilon_v} \quad /34/$$

z bilansu masowego mamy

$$\rho_{fluc} - \rho_c = \frac{\rho_s - \rho_c}{z} \quad /35/$$

Wstawiając wzór /35/ do równania /34/ otrzymamy

$$w = \frac{d^2 / \rho_s - \rho_c / \rho}{36 K^0 \eta_0 z^2} \frac{(1 - z \epsilon_v)^3}{\epsilon_v} \quad /36/$$

Dla konkretnej zawiesiny w stałej temperaturze pierwsze wyrażenie we wzorze /36/ może być zastąpione stałą K

$$w = K \frac{(1 - z \epsilon_v)^3}{\epsilon_v} \quad /37/$$

gdzie w jest prędkością sedimentacji względem dna naczyń.

Gaudin pokazał, że dla efektywnego keplina ruch cieczy, wypychanej przez opadające cząstki z rzadziej agregaty cząstek wraz z osiadowaną cieczą, podlega dwóm różnym mechanizmom w zależności od stężenia C_v . Dla zawiesin rozcieńczonych ($C_v \sim 0,07 - 0,1$) zachodzi głównie przepływ cieczy między konglomeratami cząstek. Natomiast dla stężeń wyższych ciecz porusza się tylko wewnątrz porowatych agregatów. Gaudin opisał powyższy dwustopniowy model następująco:

$$s = R/1 - zC_v/2 + m/1 - zC_v/2$$

[38]

Wobec tego Scott zaproponował następujące równanie :

$$w = \frac{R/1 - zC_v/3}{C_v} + \frac{k/1 - zC_v/3}{C_v}$$

[39]

1.2.5 Zastawienie wzorów na prędkość sedymentacji i ich sprawdzenie doświadczalnie dla zawiesin polidyspersyjnych.

W tabl. 4 przedstawiono najczęściej upytane wzory na prędkość opadania skropowanego w zakresie $Re < 0,2$. Część z nich omówiono w poprzednim rozdziale, pozostałe cytowano ze bogatą w tej dziedzinie literaturą.

tabl. 4 Wzory na prędkość sedymentacji skropowanej.

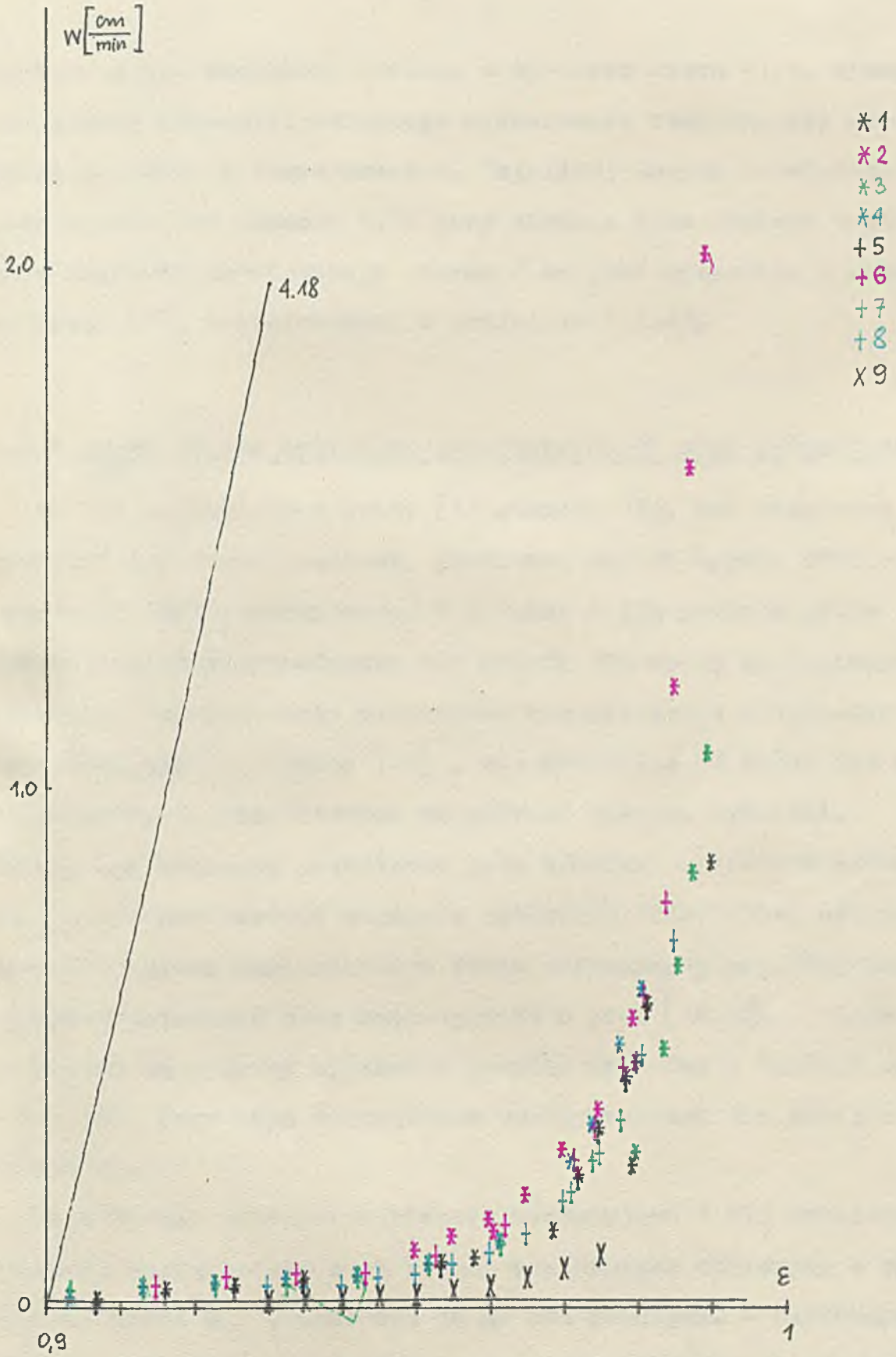
| Lp | Wzór | Autor i źródło |
|-----|--|-------------------|
| 4.1 | $w = w_0 / 1 - \alpha C_v /$ $\alpha = 2,5$ dla kul | Einstein [11] |
| 4.2 | $w = w_0 / 1 - 2,6 C_v^{0,5} /$ | Einstein [12] |
| 4.3 | $w = w_0 \varepsilon^2 \cdot 10^{-1,82/1 - \varepsilon} / \sqrt{1 - \varepsilon} = w_0 \varepsilon^2 \exp[-4,19 \cdot \varepsilon / \sqrt{1 - \varepsilon}]$ | Steinour [13, 31] |
| 4.4 | $w = w_0 \frac{1 - \varepsilon - b/2}{1 - b} \cdot 10^{-\frac{1,82/1 - \varepsilon}{1 - b}}$ | Steinour [25] |
| 4.5 | $w = \frac{k d^2 / \rho_s - \rho_c / g}{\eta}$ | Robinson [13] |
| 4.6 | $w = \frac{\varepsilon d^2 / \rho_s - \rho_c / g}{\eta}$ | Markeley [13] |

| Lp | Wzór | Autor i źródło |
|------|--|------------------------------|
| 4.7 | $w = K \frac{\sqrt{1-2G_v}^{1/3}}{G_v} + k \frac{\sqrt{1-2G_v}^{1/3}}{G_v}$ | Scott [30] |
| 4.8 | $w = m / \sqrt{1-2G_v} + n / \sqrt{1-2G_v}^2$ | Gaudin [30] |
| 4.9 | $w = w_0 / \sqrt{1-G_v}^n, \quad n = 4,65 + 19,5 \frac{d}{D}$ | Richardson i Zeki [18] |
| 4.10 | $w = w_0 \varepsilon^2 \exp \left(\frac{-2,5 G_v}{1 - \frac{39}{64} G_v} \right) \text{ dla kul}$ | Vand [32] |
| 4.11 | $w = w_0 / (1 - kG_v) / (1 - 0,75 G_v)^{1/3} /$ | Oliver [32] |
| 4.12 | $w = w_0 (1 + 0,75 G_v) / \sqrt{1 - \frac{B}{G_v} - 3/}$ | Brinkmann [32] |
| 4.13 | $w = w_0 \frac{\sqrt{1-B}^{1/3}}{2K^0 G_v} \quad K^0 = 5$ | Carpman - Kozeny [30, 32] |
| 4.14 | $w = w_0 \frac{3 - 4,5G_v^{1/3} + 4,5G_v^{5/3} - 3 G_v^2}{3 + 2 G_v^{5/3}}$ | Heppel [32] |
| 4.15 | $w = w_0 / (a_0 + a_1 G_v + a_2 G_v^2 + a_3 G_v^3 + a_4 G_v^4) /$ | Shannon [32] |
| 4.16 | $w = w_0 \frac{1 - G_v}{\sqrt{1 + 111 \frac{G_v^2}{1 - G_v}}}$ | School [20] |

| Lp | Wzór | Autor i źródło |
|------|---|----------------|
| 4.17 | $w = w_0 \frac{1 - C_v}{1 + \frac{1,2}{0,5 + \frac{1,2}{120 v}} - 0,5}$ | Brauer [5] |
| 4.18 | $w = w_0 \left(1 - \frac{C_v}{C_{v \max}} \right)^{1/3}$ | Iordache [25] |

gdzie w_0 = prędkość obliczona ze wzoru Stokesa [8/

Przedstawione powyżej wzory postanowiono sprawdzić doświadczalnie dla zawiesin polidyspersyjnych, których wybrane własności przedstawiono w załączniku I. W związku z tym, że w większości wzorów występuje prędkość w_0 , trzeba było określić wymiar i kształt cząstek. Ponieważ w wielu pracach np. w [25], proponuje się za wielkość obliczeniową przyjąć minimalny wymiar cząstek, postanowiono wykorzystać powyższą propozycję w obliczeniach. Z drugiej strony przyjęto za wymiar obliczeniowy rozmiar największego ziarna. W pracy [33] Tawelczyk stwierdził, że nie kula lecz sześcienn jest bliźni bryłom rzeczywistym. Wobec tego, założono, że opadające cząstki są sześciennymi. Obserwacje mikroskopowe potwierdziły słuszność tego założenia. Wyniki dla bardziej charakterystycznych przypadków przedstawiono na Rys. 8. Okazuje się, że dla wymiaru minimalnego szlętego jako wymiaru obliczeniowego, uzyskano wykresy praktycznie znajdujące się na osi odciętych. Natomiast wartości prędkości obliczonej dla największego ziarna znacznie przewyższają wartości doświadczalne. Wzory 4.7 i 4.8, w których występuje zmienna w_0 .



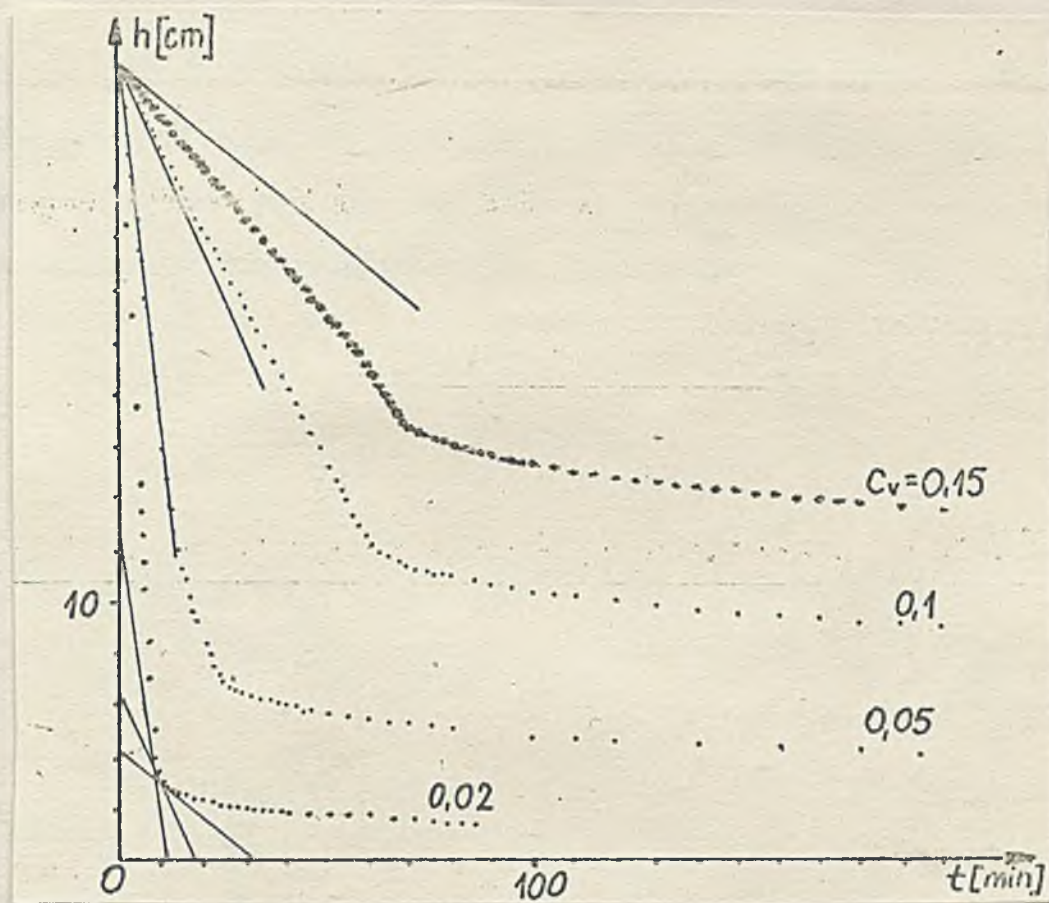
Kys. 8 Weryfikacja równań na prędkość opadania skrepowanego /numery jsek w załączniku I /

otrzymane dla zawiesziny kaolinu w wymiarze ziarn $4 \mu\text{m}$, wymagałyby dla każdej suspensji odrębnego wyznaczenia stałych, aby uzyskać dobrą zgodność z eksperymentem. Najbliżej danych doświadczalnych leży wykres dla formuły 4.18 przy obróceniu jako wymiaru obliczeniowego rozmiaru najbliższego ziarna / co jest sprzeczne z założeniami pracy [25] zreferowanymi w rozdziale 1.2.2/.

1.2.6 Uwagi własne dotyczące przedstawionych ujęć matematycznych.

1/ Jak wspomniano w pracy [1] stosuje się, bez wątpliwych rozważań nad ograniczeniami, graficzną metodę Kynchę również do suspensji polidystrybucyjnych. W związku z tym podjęto próbę doświadczelnego sprawdzenia tej metody dla wyżej wymienionych zawieszin. Doświadczenia prowadzono korzystając z urządzenia opisanego szczegółowo w pracy [34], rozpoczynając od badań dla stężeń najmniejszych, przy których uzyskano granicę płynności. Maksymalne stężenie początkowe było również określane doświadczalnie, miało ono wartość stężenia ostatniej jednorodnej zawiesziny uzyskanej przez wymieszanie w rurze sedymentacyjnej. Uzyskane wyniki doświadczeń oraz zaczerpnięte z prac [16,35] dane nanoszono na wykresy wysokości granicy metody w funkcji czasu $h = h(t)$, przy czym sporządzono osobny rysunek dla każdego typu zawiesziny.

Sprawdzenie metody przebiegało następująco: dla ustalonego stężenia początkowego oraz stężeń pomiarowych obliczono z równania /20/ wartości h_T , nanosząc je na osi rzędnych. Z uzyskanych punktów poprowadzono stycznie do krzywej sedymentacji dla ustalonego poprzednio stężenia początkowego. Tak narysowane styczne przenoszono równolegle do h_0 i porównywano z wykresami pomiarowymi. Przykładowe wyniki dla zawiesziny kredy przedstawiono na rys. 9



Rys. 9 Porównanie wyników doświadczalnych z uzyskanymi metodą Kyncha.

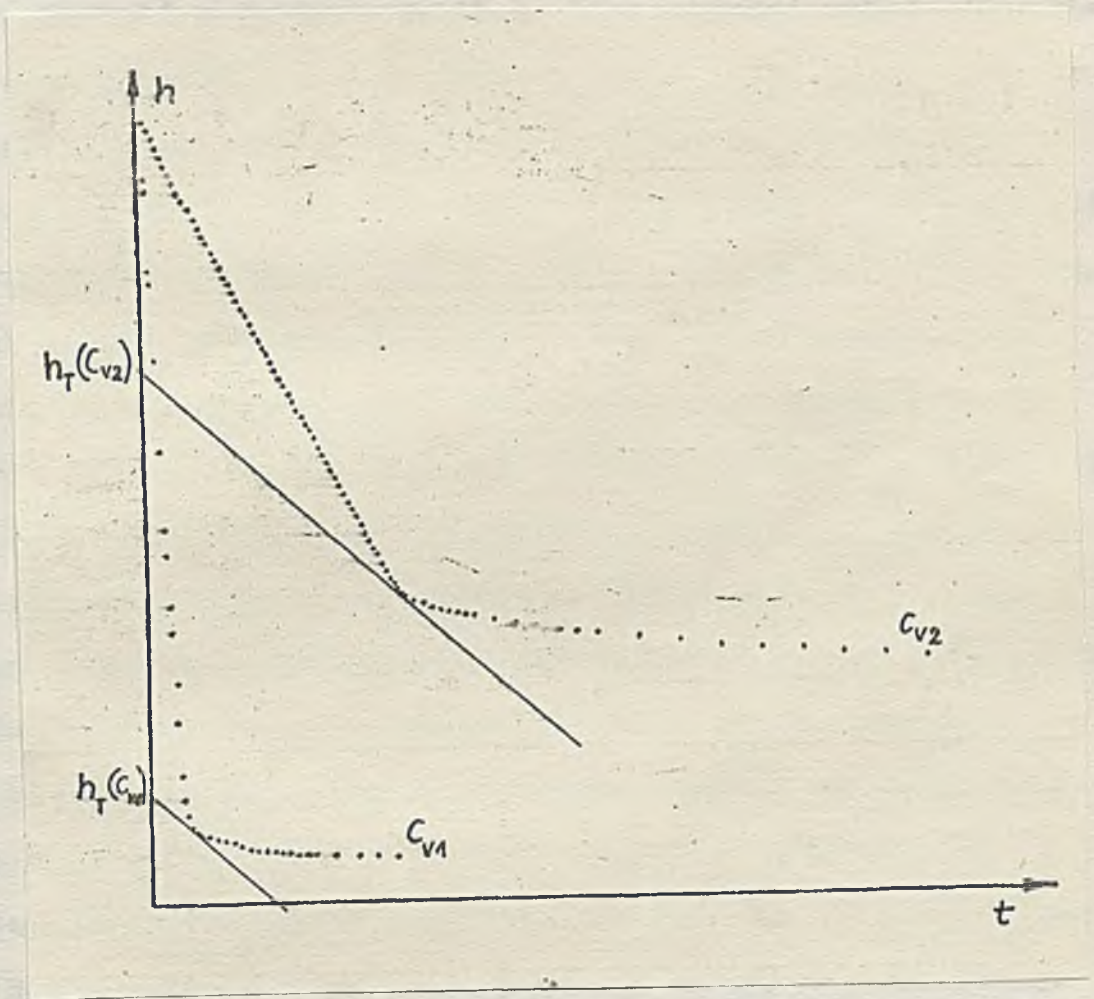
Można stwierdzić, że dla przebadanych zawiesin uzyskano dobrą zgodność powyższej metody z eksperymentem dla stężeń mniejszych od stężenia krytycznego. Z badań prowadzonych w BRD [19] nad sedymentacją włókien celulozy wynika podobny wniosek.

Dane z których korzystano przy powyższym sprawdzeniu metody Kyncha zamieszczono w załączeniu II. Uzyskane wyniki referowano szczegółowo w pracach [40 - 42].

Jak wspomniano w rozdz. 1.2.1 metody powyższej nie można stosować do zawiesin monodispersyjnych flokulujących, tworzących bardzo ściśnięte osady. Uwaga powyższa obowiązuje również na suspensje polidispersyjne, o czym świadczą wyniki uzyskane w pracy [43].

Wobec powyższego proponuje się, przed wykorzystaniem metody Kyncha do interesujących nas zawiesin dla szerszego zakresu stężeń przeprowadzenie jednej próby okresowej i analizę krajowej

sedymentacji pod kątem flokulacji. Wystąpienie tego zjawiska wyklucza zastosowanie omawianej metody. Jeżeli flokulacja nie zachodzi należy przeprowadzić następną próbę dla stężenia większego i wykonać sprawdzenie graficzne /Rys. 10/



Rys. 10 Sprawdzenie metody Snyche dla szerszego zakresu stężeń.

Operację tę wygodnie wykonać przedstawiając krzywe osiedlenia dla stężeń początkowych C_{v1} i C_{v2} na wspólnym wykresie wysokości w funkcji czasu $h = h(t)$.

Następnie należy obrabić koncentracje C_{vj} większą od C_{v1} i C_{v2} i dla niej obliczyć z równania /20/ wartości h_p dla C_{v1} i C_{v2} zaznaczając je na osi rzędnych. Z tak otrzymanych punktów poprowadzić styczne do krzywych pomiarowych, po czym przesunąć linię dla C_{v1} równoległe do punktu wyznaczonego przez h_p/C_{v2} . Pokrycie się pokreślonych odcinków, że zawiesina podlega teorii Lyndha w zakresie stężeń C_{v1} do C_{v3} . Zwiększając wartość C_{v3} można w ten sposób stwierdzić w jakim przedziale koncentracji metoda ta może znaleźć zastosowanie.

2/ Ujęcie teorii ruchu drogowego jest bardzo interesującą próbą zastosowania teorii zjawisk stochastycznych do osiedlenia. Sprawdzenie doświadczalnie tego podejścia przeprowadzone w rozdz. 1.2.5 potwierdza jego przydatność. Należy jednak odnieść się krytycznie do podstawowego założenia, sformułowanego przez autorów regułą oddziaływań między ziarnami. Reguła ta mówi, że oddziałujące ze sobą cząstki uzyskują tę samą prędkość minimalną, z którą porusza się wolniej niż w nich. Należy stwierdzić, że jest to sprzeczne z obserwacjami opadania dla zawiesin bardzo rozcieńczonych [27-29] oraz badaniami własnymi /patrz rozdz. następny/, nad suszanami polidyspersyjnymi, gdzie granica szybkości opadu znacznie szybciej niż wynosi prędkość opadania niezbędnego najmniejszego /czyli najwolniejszego/ ziarna, co świadczy o tym że oddziałujące cząstki uzyskują prędkość różną od minimalnej.

Autorzy cytowanych powyżej prac stwierdzają, że dla pewnych substancji w zawiesinach o ułamku objętościowym ciała stałego $C_v \approx 0,001$ prędkość opadania zaczyna różnić w stosunku do prędkości opadania niezbędnego. Odchyłka ta jest największa dla stężenia

$\sigma_v \approx 0,01$ a następnie maleje. Johns w artykule [27] próbował wyjaśnić to zjawisko przyglądając się pewnej ilości cieczości na opadającej cząstce /wzrost rozmiaru i masy ziarna/. Jednak proste przeliczenia przy założeniu, że objętość cieczości przyklepionej różna jest połowie objętości cząstki [4 - 8] dają zmniejszenie prędkości. Barford w pracy [28] wyjaśnia powyższy problem postulując konieczność istnienia sił kohesji do tworzenia się aglomeratów np. dwucząsteczkowych /opadających szybciej niż pojedyncza cząsteczka/.

3/ Weryfikacja doświadczalna wzorów na prędkość opadania skrópowanego przeprowadzona dla zawiesin polidyspersyjnych /rozdz. 1.2.5/ narzuca bardzo istotny wniosek : do opisu powyższych zawiesin, żaden z zestawionych w tabl. 4 wzorów nie nadaje się, gdy jako wymiaru obliczeniowego użyć rozmiaru najmniejszego lub największego ziarna.

1.3 Ujęcie własne prędkości opadania skrópowanego zawiesiny polidyspersyjnej.

Ponieważ przedstawiono kolejne fazy rozwoju modelu własnego, aż do końcowego wyniku tzn. równania opisującego prędkość sedimentacji skrópowanej zawiesiny polidyspersyjnej.

Analizując równanie /8/ opisujące opadanie pojedynczej cząstki kulistej dla $Re < 0,2$, można zauważyć, że występuje w nim czynnik d . Jest to po prostu średnica opadającej kuli. Jeśli opada zawiesina polidyspersyjna to nie wiadomo, którą ze średnic podstawić w miejsce d .

W dalszych rozważaniach, w których starano się wprowadzić zamiast średnicy d pewien wymiar średni, przyjęto następujące założenia :

- 1/ Opadają cząstki nieściśliwe i nieporowate,
- 2/ Wymiar cząstek $d \in \langle d_0, d_{max} \rangle$,
- 3/ Ziarna poruszają się ruchem jednostajnym w zakresie $Re \in 0,2$, czyli siła oporu ośrodka S_0 równoważy wypadkową sił ciężkości i wyporu $S_c - S_w$. Ponieważ w równaniu /1/ i /2/ występuje objętość cząstki, a w równaniu /3/ pole przekroju poprzecznego ziarna, i w liczbie Re średnica cząstki, postanowiono w miejsce tych wielkości wprowadzić do cytowanych równań wartości średnie otrzymane z funkcji rozkładu ziarnowego ciała stałego.

$$\lambda \frac{w_0^2}{2} \rho_0 \bar{V} = \bar{V} / (\rho_s - \rho_c) / g$$

$$\lambda = \frac{24}{Re} \quad Re = \frac{w_0 \bar{d} \rho_c}{\eta_c} \quad /40/$$

W związku z tym, że rzeczywiste funkcje rozkładu używane są na podstawie wartości dyskretnych wprowadzono następujące uproszczenia :

$$\bar{V} = \sum_{i=1}^k p_i V_i \quad /41/$$

$$\bar{f} = \sum_{i=1}^k p_i f_i \quad /42/$$

$$\bar{d} = \sum_{i=1}^k p_i d_i \quad /43/$$

$$\text{gdzie: } p_i = \frac{n_i}{\sum_{i=1}^k n_i} = \frac{\frac{m_i}{\rho_s v_i}}{\sum_{i=1}^k \frac{m_i}{\rho_s v_i}} = \frac{\frac{m_i}{v_i}}{\sum_{i=1}^k \frac{m_i}{v_i}} \quad /44/$$

gdzie n_i , m_i - ilość ziarn i masa i-tej frakcji ziarnowej

oraz

$$v_i = \frac{\pi}{12} / d_{iI}^3 + d_{iII}^3 / \quad /45/$$

$$f_i = \frac{\pi}{8} / d_{iI}^2 + d_{iII}^2 / \quad /46/$$

$$d_i = \frac{1}{2} / d_{iI} + d_{iII} / \quad /47/$$

gdzie d_{iI} i d_{iII} to średnice graniczne i-tej frakcji ziarnowej.

Mozna zdefiniować następujące średnie średnice :

$$d_v = \sqrt[3]{\frac{6 \bar{v}}{\pi}} \quad /48/$$

$$d_f = \sqrt{\frac{4 \bar{f}}{\pi}} \quad /49/$$

$$d_d = \bar{d} \quad /50/$$

Wtedy wprowadzając wartości średnie z równań /41-43/ i /48-50/ do równań /40/ otrzymamy

$$w_o = \frac{\bar{v} \bar{d}}{\bar{f}} \cdot \frac{/\rho_s - \rho_c/ \delta}{12 \eta_c} = \frac{d_v^3 d_d}{d_f^2} \cdot \frac{/\rho_s - \rho_c/ \delta}{18 \eta_c} \quad /51/$$

Porównując ostatni człon powyższego równania z równaniem Stokesa /5/ można napisać :

$$d_e = \sqrt{\frac{d_v^3 d_d}{d_f^2}}$$

/52/

Tak określone d_e pełni rolę średnicy ekwiwalentnej dla danego rozdrobnionego ciała stałego w opadaniu grawitacyjnym.

Przeprowadzono powyżej rozumowanie sprawdzone, rysując wykres

$$\frac{w}{w_0} = f(\varepsilon) \text{ dla danych doświadczalnych dotyczących zawieszin}$$

krety i olicality w wodzie [44].

Wykres ten przedstawiono na rys. 11.



Rys. 11 Sprawdzenie doświadczelne różnicia /51/

Otrzymany wykres śladowy /dla dwu różnych materiałów/ wskazuje na poprawność przedstawionej koncepcji, ma jednak zasadnicze mankamenty :

- 1/ wartość w/w_0 sięga 80 przy ε dającym do 1, /przy małej ilości pomiarów mogła budzić podejrzenie, że jest za wysokie /,
- 2/ mały zakres stężeń i tylko dwa różne ciała stałe nie pozwalają na uogólnienie.

W związku z tym podjęto próby uściślenia powyższego modelu opedale nie zawiesiny polidispersyjnej /zwiększając przedział stężeń i ilości substancji/, którego wyniki przedstawiono w pracy [41] .

Dodatkowo przyjęto następujące założenia :

Kontakt ziaren można opisać następująco :

$$V = \psi_v l^3, P = \psi_p l^2, f = \psi_f l^2$$

Parametry rozkładu ziarnowego $\bar{V}, \bar{f},$ i \bar{l} wyznaczono z równań /41-43/ a tym, że w miejsce "d" w równaniach /43, 45-47/ należy wstawić "l" np l_{II}, l_{III} - wymiar i-tej klasy ziarnowej.

Stąd w miejsce równania /51/ otrzymamy

$$w_0 = \frac{\bar{V}_1}{\bar{f}} \cdot \frac{\rho_s - \rho_c / 8}{12 \eta_c} = \frac{\psi_v}{\psi_f} L_0^2 \cdot \frac{\rho_s - \rho_c / 8}{12 \eta_c}$$

/53/

a przez analogię do równania /52/ można zapisać :

$$L_0 = \sqrt{\frac{\psi_f}{\psi_v} \frac{\bar{V}_1 \cdot \bar{l}}{\bar{f}}} = \sqrt{\frac{l_v^3 l}{l_f^2}} \quad /54/$$

Biorąc pod uwagę, że dla kuli obowiązują $\psi_v = \frac{\pi}{6}$ oraz $\psi_f = \frac{\pi}{4}$ uzyskamy ze wzoru /53/

$$w_0 = 1e^2 \frac{(\rho_s - \rho_c) / \lambda}{18 \eta_c} \quad /55/$$

formułę analogiczną do wzoru Stokesa /6/.

Tak poprawione rozumowanie sformułowano dla danych doświadczalnych, użytych w rozdziale 1.2.5 dotyczących zawiesin kredy, wadikalitu i kaolinu w wodzie i glicerynie. Wyniki przedstawiono na Rys. 12-15, umieszczając na nich wykresy śledzone $\frac{w}{w_0}$ w funkcji porowatości ε .

Rys. 12 wykonano wstawiając w miejsce w_0 wartości obliczone z równania /51/ /opadają cząstki kuliste/.

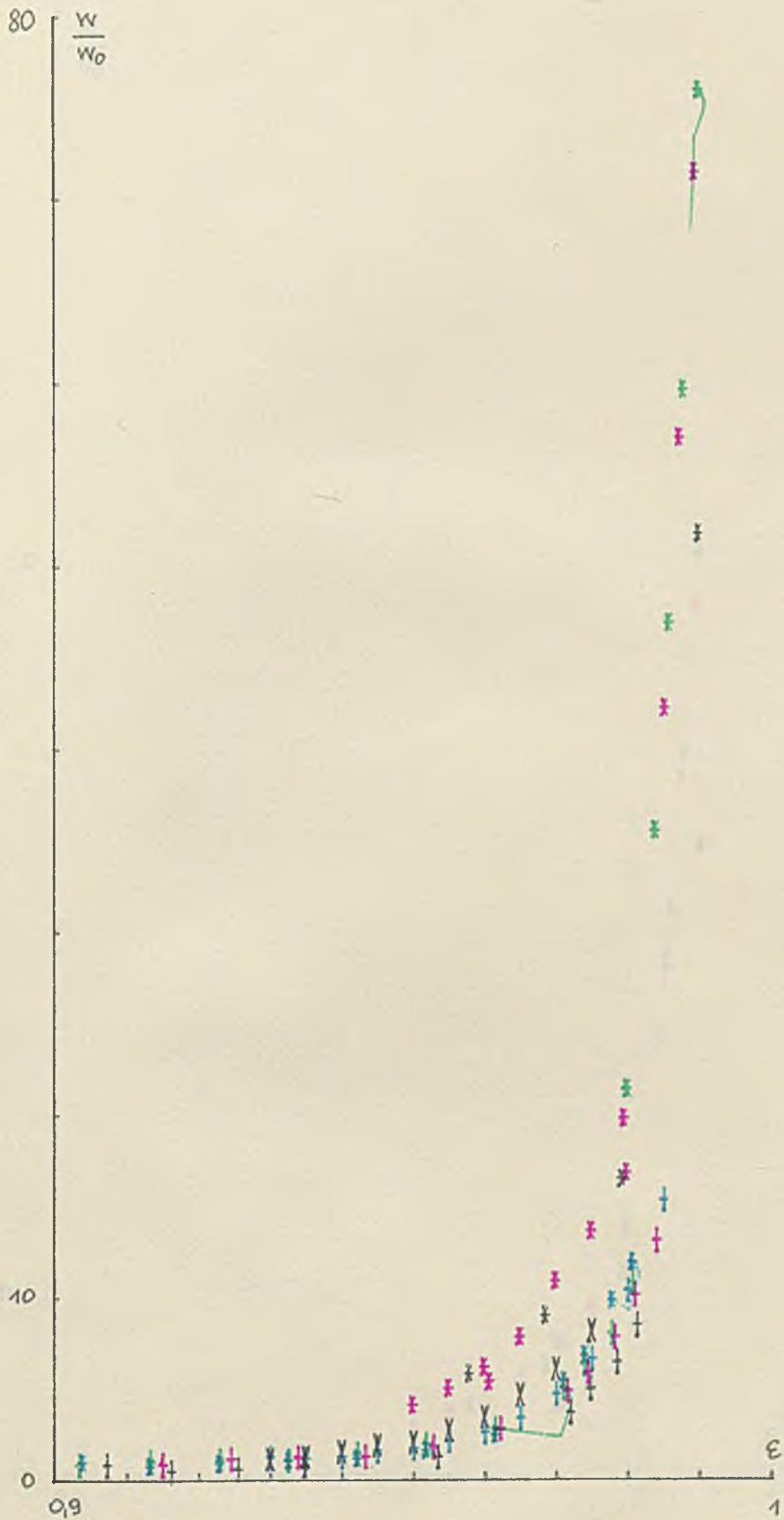
Rys. 13 otrzymano wyliczając w_0 ze wzoru /53/ przy założeniu $\psi_v = \psi_f = 1$ /opadają ziarna sześciennie/. Za takim wyborem przemawiają wnioski z pracy Fawczonek [33], który stwierdził, że najlepszym przybliżeniem byłł rzeczywistych jest sześciąt.

Rys. 14 wykonano korzystając ze wzorów zamieszczonych w pracach [9,10] dla założenia, że opadają cząstki sześciennie / $\psi_v = \psi_f = 1$ /.
Poniżej podano wykorzystane wzory :

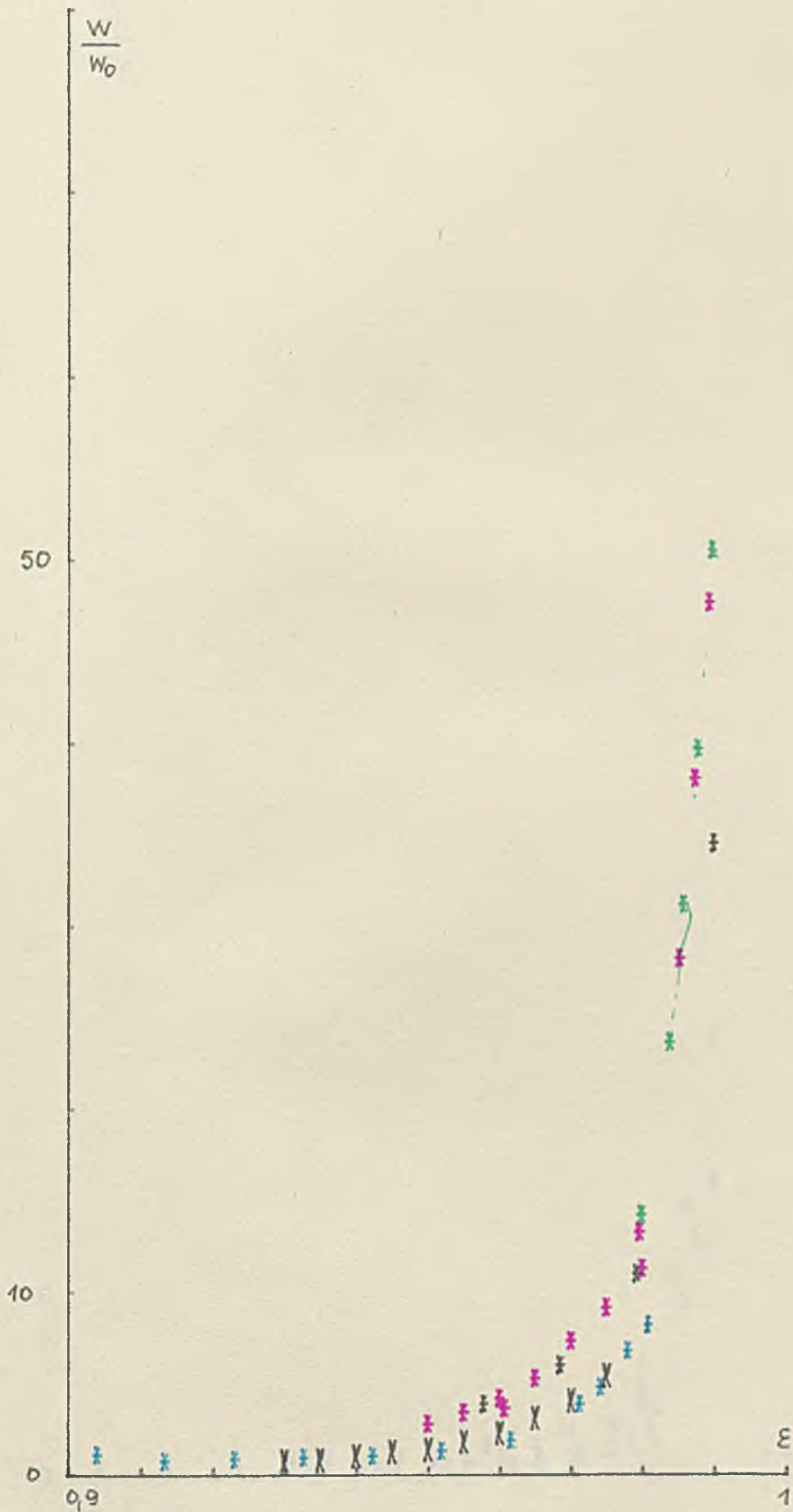
$$Re = \frac{w_0 d_e \rho_c}{\eta_c} \quad , \quad d_e = \sqrt[3]{\frac{6V}{\pi}} \quad , \quad \lambda = \frac{w}{Re} \quad , \quad \varepsilon = \frac{24}{0,843 \lg \frac{\psi}{0,055}}$$

$$\psi = \frac{\psi_F \left(\frac{\bar{V}}{\psi_v} \right)^{2/3}}{\bar{F}}$$

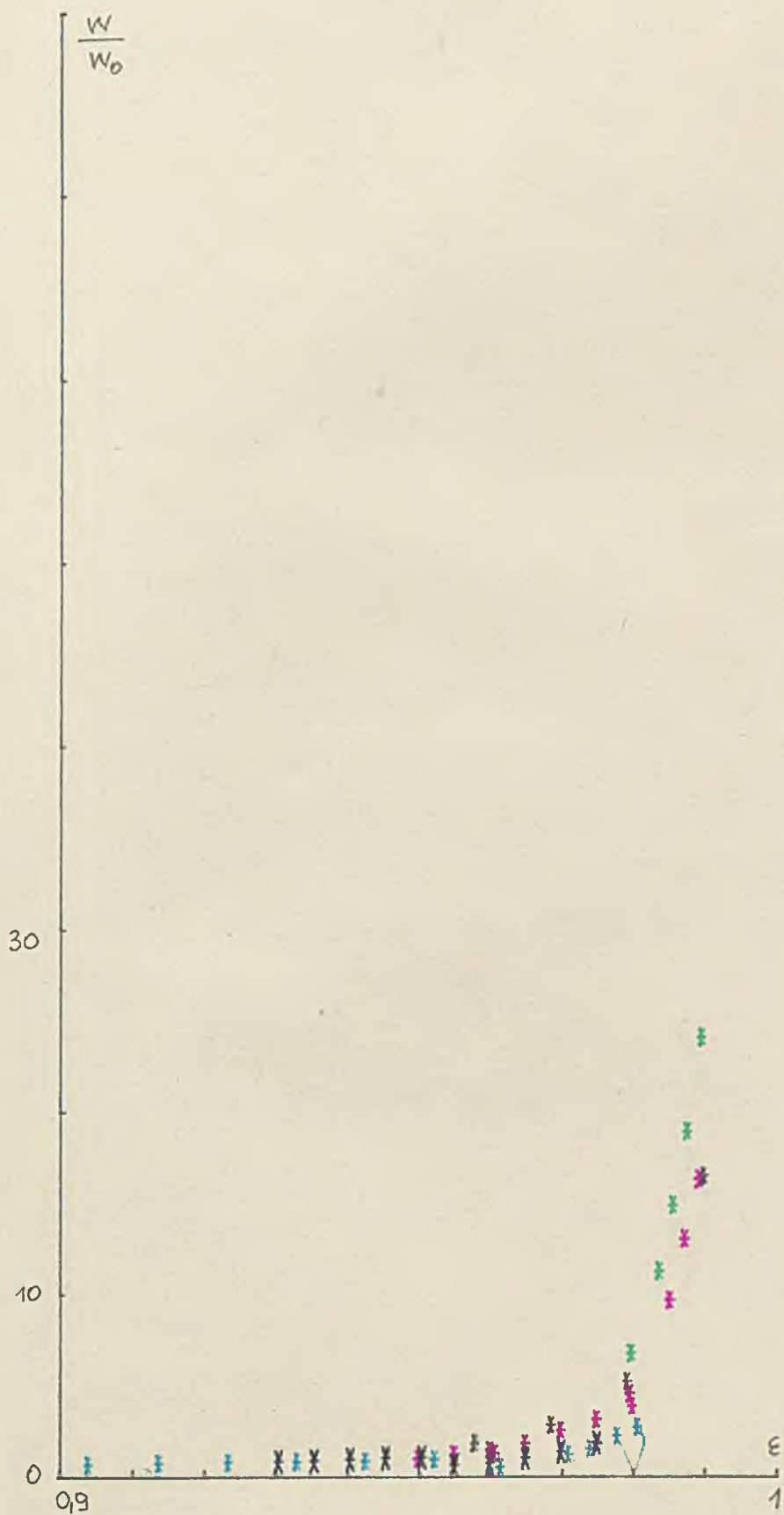
gdzie \bar{F} - średnie pole powierzchni całkowitej ziarna. Przejście, aby umieszczone w powyższych wzorach średnie \bar{V} wyznaczyć z równania /41/ natomiast \bar{F} analogicznie do /42/ z uwzględnieniem, że we wzorach /45-47/ w miejsce "d" wchodzi "l". Wtedy otrzymano



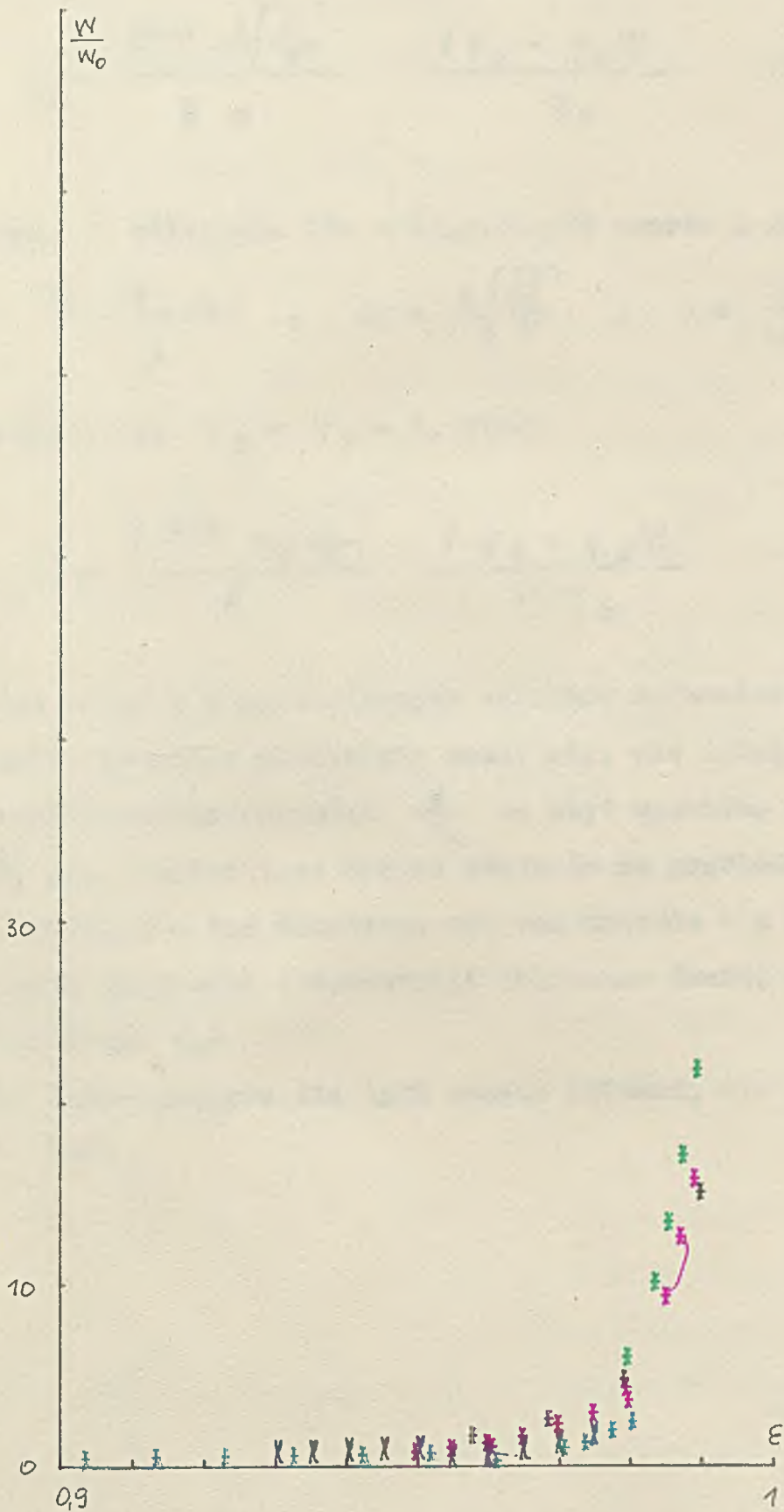
Rys. 12 Weryfikacja równania /51/ /oznaczenia jak na Rys.8/



Rys. 13 Weryfikacja równania /53/ w oparciu o dane doświadczalne.



Rys. 14 Sprawdzenie równania /56/



Rys. 15 Sprawdzenie równania /57/

$$w_0 = \frac{\bar{v}^{4/3} \cdot \sqrt[3]{\frac{6}{\pi}}}{\bar{f} \cdot a} \cdot \frac{(\rho_s - \rho_c) g}{\eta_c} \quad /56/$$

Rys. 15 otrzymano dla następujących wzorów z podręcznika [45]

$$Re = \frac{w_0 d_e}{\nu} \quad , \quad d_e = \sqrt[3]{\frac{6\bar{v}}{\pi}} \quad , \quad \lambda = \frac{24}{Re} \quad \text{oraż przy}$$

założeniu, że $\psi_v = \psi_f = 1$, wtedy

$$w_0 = \frac{\bar{v}^{4/3} \cdot \sqrt[3]{\frac{6}{\pi}}}{\bar{f}} \cdot \frac{(\rho_s - \rho_c) g}{12 \eta_c} \quad /57/$$

Jak widać z przedstawionych wykresów modernizacja powyższe zmieniła znacznie poprzednie rezultaty, ale istnieje podejrzenie, że mimo wszystko wartości $\frac{w}{w_0}$ są zbyt wysokie, gdyż otrzymane wzory nie uwzględniają wpływu stężenia na prędkość opadania.

W związku z tym óderoczno tok rozumowania: z doświadczalnych wartości prędkości sedymentacji obliczono średni wymiar ekwiwalentny l_e .

Próby takie podjęto dla tych samych założeń, dla których wykonano Rys. 12-15.

Dodatkowo wyliczono z równania Einsteina - Stokesa -

- Smoluchowskiego wymiar Browna :

$$l_B = \left(\frac{216 k T \eta_0}{t \pi / \rho_s - \rho_c / \epsilon^2 \gamma^2} \right)^{0,2} \quad /55/$$

W związku z tym, że udział cząstek o wymiarach mniejszych od l_B był niewielki, oraz że w ruchu swobodnym poruszają się one niezależnie / ruchy Browna / udział ich pominięto, a wyniki analiz siarnych przeliczono otrzymując nowe wartości \bar{v} , \bar{f} i \bar{l} .

Wyniki zamieszczone w tabl. 1- 9 w załączniku III otrzymano dla przypadku przedstawionego na Rys. 15, z korekcją na ruchy Browna. W tablicach oprócz obliczonych z równania /56/ wartości l_e , które oznaczono l_{e1} , przedstawiono poprawione wartości l_e w oparciu o kolejnościanę stosowane poprawki :

$$l_{e2} = \frac{l_{e1}}{\sqrt{\epsilon}} \quad /59/ - \text{uwzględnia wpływ strumienia wypierającego płynu [3,13]}$$

$$l_{e3} = \frac{l_{e1}}{\sqrt{\epsilon \cdot 10^{-1,82/(1-\epsilon)}}} \quad /60/ - \text{poprawka Steinsoura na zmianę lepkości i wpływ strumienia płynu}$$

$$l_{e4} = \frac{l_{e1}}{\epsilon^{4,79}} \quad /61/ - \text{poprawka Richardsona i Shabiego na zmianę współczynnika oporów przepływu, gdzie } l_e \text{ jest wartością}$$

oraz

$$b_j = \frac{l_{e1} - l_e}{l_{e1}} \cdot 100 \% \quad /62/ \text{ się obliczone z analizy siarnych}$$

Zaskakującym wynikiem jest to, że ^{dla} konkretnej zawiesziny zachodzi zmiana l_{e1} w zależności od stężenia. Widąc z tego, że wpływ stężenia jest o wiele silniejszy niż przewidyują powyższe poprawki.

Dalsze próby uściślenia opisu zjawiska polegały na poszukiwaniu takiej funkcji stężenia, która w połączeniu z /53/, /56/ czy /57/ najlepiej aproksymuje dane doświadczalne. Na Rys. 16 przedstawiono wyniki doświadczeń jako wykresy śladowe $w = w / \varepsilon /$ dla danych w załączniku I. Dla każdej zawiesziny obliczono w_0 z równanie /53/ i podstawiono do kolejnych wzorów z tabl. 4. Następnie rysowano wykres tak otrzymanej funkcji $w = w / \varepsilon /$ i porównywano z powyższymi wykresami śladowymi.

Na podstawie przeprowadzonych prób można stwierdzić, że wszystkie wzory z tabl. 4 dają wyniki zgodne z doświadczeniem dla stężeń większych od 5 % objętościowych. Natomiast dla stężeń mniejszych wyniki zgodne daje tylko wzór Germana /Rys. 16/.

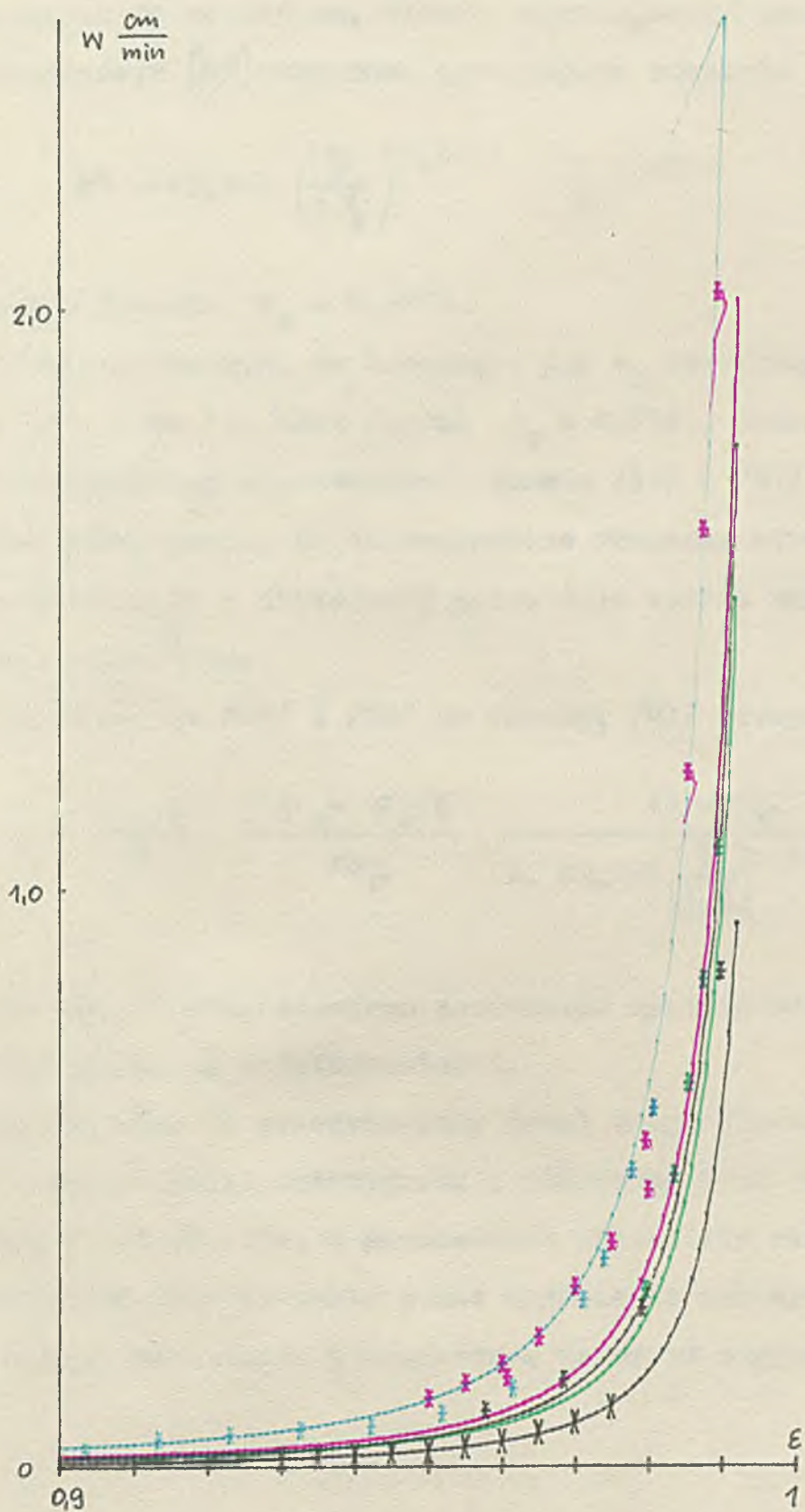
Wpominany wzór /4.13/ ma następującą postać:

$$w = w_0 \frac{1 + \frac{C_v}{K^0}}{2 K^0 C_v} \quad /63/$$

gdzie K^0 tzw. stała Germana. Z literatury [13, 46-49] wiadomo, że stała ta zależy od kształtu i wielkości ziaren oraz porowatości wypełnienia. W związku z tym z doświadczalnych wartości prędkości oraz własności zawiesziny obliczono wartości K^0 gdy w_0 określone jest wzorem /57/ oraz teoretycznie bardziej uzasadnionym równaniem /53/. Wyniki dla obu przypadków zamieszczone w tabl. 1-9 w załączniku IV i V. Jak widać wartości K^0 wahają się w drugim przypadku od ok. 0,9 do ok. 13. Dysponując tymi danymi liczbowymi postanowiono przeprowadzić próbę korelacji $K^0 = K^0 \left(\frac{\bar{v}}{f \cdot l}, C_v \right)$ przyjmując moduł $\frac{\bar{v}}{f \cdot l}$ jako miarę kształtu ziarn rozczyszcanych



Rys. 16 Sprawdzenie modelu własnego.



Rys. 17 Porównanie wartości obliczonych z równania /65/ z danymi doświadczelnymi.

zblizonych do sześciianu. Metodą najmniejszych kwadratów w ujęciu krakowienowym [50] otrzymano następujące równanie :

$$k^0 = 29,425 \left(\frac{\bar{v}}{\bar{v} - 1} \right)^{0,6423} \sigma_v^{0,8764} \quad /64/$$

z błędem średnim $s_0 = 0,3514$.

Należy zaznaczyć, że korelacja σ_v określona jest wzorem /57/ data w wyniku błęd średni $s_0 = 0,4141$. Wobec tego i z analizy teoretycznego wyprowadzenia wzorów /53/ i /57/ oraz wartości k^0 uznano ostatecznie, że zaproponowane równanie własne spośród przedstawionych w niniejszej pracy daje wyniki najbardziej zgodne z rzeczywistością.

Podstawiając /64/ i /53/ do formuły /63/ otrzymamy w końcu

$$w = \frac{\bar{v} \cdot \bar{1}}{\bar{f}} \frac{(\rho_n - \rho_0) \bar{z}}{12\eta_c} \frac{(1 - \sigma_v)^3}{2 \cdot 29,425 \left(\frac{\bar{v}}{\bar{v} - 1} \right)^{0,6423} \sigma_v^{1,8764}} \quad /65/$$

Na Rys. 17 przedstawiono porównanie wyników otrzymanych ze wzoru /65/ z danymi doświadczalnymi.

Wydaje się, że przedstawiony tutaj opis sedymentacji skropowanej zawiesin polidyspersyjnych i otrzymany wzór /65/ na prędkość opadania już obecnie, w przebadanym przedziale stężeń mogą służyć do obliczeń oraz stanowić punkt wyjścia do dalszych badań np. dla innych materiałów i w szerszym zakresie stężeń.

1.4 Wpływ średnicy aparatu na prędkość sedymentacji.

Dla określonego stężenia początkowego, zawiesina idealna powinna opaść niezależnie od średnicy aparatu, z tą samą prędkością.

Jednak obserwacje różnych autorów często stwierdzają wyraźny wpływ przekroju poprzecznego urządzenia na szybkość sedymentacji.

Vesilind [51] badając saliny peaktywacyjne z oczyszczalni biologicznych stwierdził wyraźny wpływ stężenia i średnicy naczyń na interesujący nas parametr /Rys. 18/.

Na wykresie tym podano zależność prędkości opadania w_1 mierzonej w cylindrze o średnicy $D = 0,915$ m podzielonej przez prędkość w_2 uzyskaną w cylindrze o mniejszym rozmiarze w funkcji średnicy cylindra mniejszego i stężenia. Wykres ten w formie niejasnej pokazuje, że dla stężeń mniejszych od 5000 g/m^3 ze wzrostem średnicy naczyń maleje prędkość sedymentacji, a dla stężeń większych, prędkość opadania rośnie.

Brown [9] podaje, że wpływ średnicy aparatu można opisać empirycznym współczynnikiem korekcyjnym

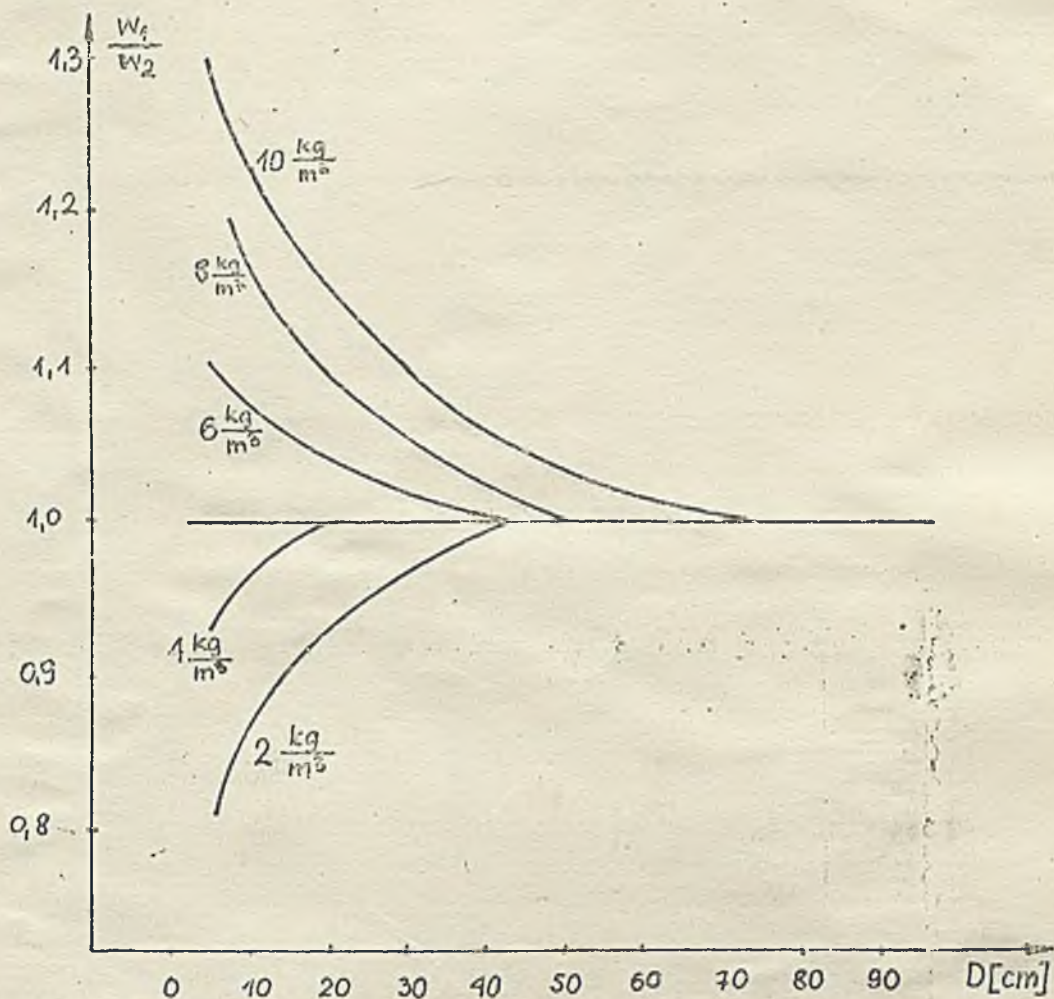
$$\frac{w}{w_0} = 1 - \frac{1}{D} \cdot 2,25 \quad /66/$$

gdzie: 1 - wykładnik cząstki, a D - średnica aparatu, czyli prędkość rośnie ze wzrostem średnicy urządzenia sedymentacyjnego.

Richardson i Zaki [13] podają następujący wzór tabl. 4 /4,9/

$$w = w_0 / 1 - C_v / D^n, \quad n = 4,65 + 19,5 \frac{1}{D} \quad /67/$$

Zgodnie z tym równaniem prędkość sedymentacji rośnie wraz ze wzrostem średnicy aparatu.



Rys. 18

Rys. 18 Wpływ stężenia i średnicy aparatu na prędkość sedymentacji szlamu powstającego.

Corr [52] zamierza wstóp Happela, który wiąże prędkość sedymentacji ze średnicą aparatu następująco :

$$\frac{w}{w_{\infty}} = \left[1 - \left(\frac{1}{D} \right)^2 \right] \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{1}{D} \right)^2 \right]^{1/2} \quad /68/$$

gdzie w_{∞} jest prędkością opadania w aparacie o nieskończonej powierzchni.

Wzór powyższy podobnie jak dotychczas przewiduje wzrost prędkości ze wzrostem średnicy aparatu.

Dane doświadczalne [16, 53-55] świadczą o wręcz przeciwnej tendencji tzn. ze wzrostem średnicy naczyń maleje szybkość sedymentacji.

Wobec tych sprzecznych informacji postanowiono wykorzystać dane z pracy [16] dotyczące opadania polidispersyjnych zawiesin kredy zielonej w wodzie, w naczyniach o różnej średnicy. Dane te zamieszczone w załączniku VI.

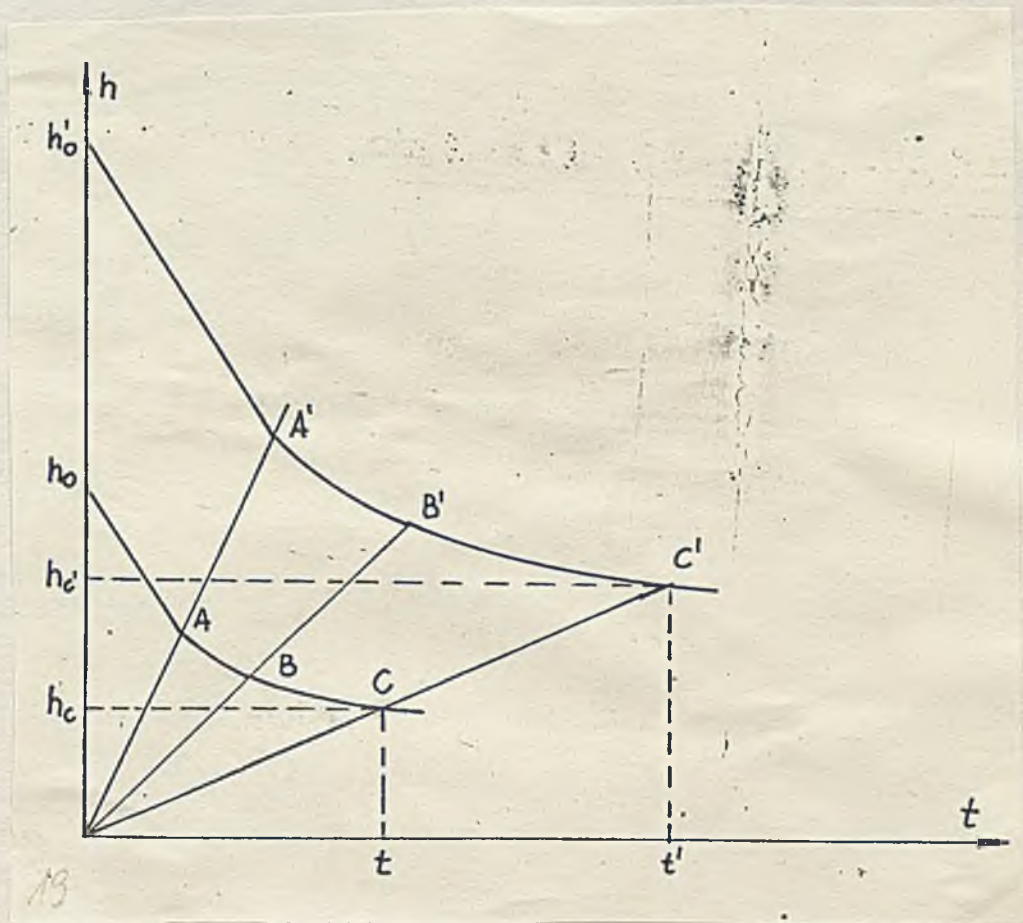
Analizując wspomniane powyżej dane można stwierdzić, że wpływ jakościowy średnicy aparatu na prędkość opadania jest podobny jak u Vesilinda natomiast ilościowo jest on trudny do uchwycenia z uwagi na niepełny materiał doświadczalny i dlatego do istniejących propozycji równań /55-58/ opisujących wpływ średnicy na powyższy parametr należy podchodzić z dużą ostrożnością.

Jednocześnie istnieją zawiesiny /np. dielit w wodzie/, u których wpływu takiego nie zaobserwowano.

1.5. Wysokość słupa zawiesiny a prędkość sedymentacji.

Z prac [3, 13, 14] wiadomo, że dla zawiesin monodispersyjnych można stosować metodę graficzną, pozwalającą sporządzić wykres krzywej sedymentacji dla zawiesiny o pewnej wysokości początkowej słupa suspcensji h'_0 . Jeżeli dany jest wykres tej krzywej dla h_0 , a $0,5 \leq \frac{h'_0}{h_0} \leq 2$, Istotę tego sposobu przedstawia

Rys. 19.



Rys. 19 Metoda graficzna Coulsaona Richardsons

Poprawne są następujące związki :

$$\frac{h_0'}{h_0} = \frac{OA'}{OA} = \frac{OB'}{OB} = \dots = k \quad /69/$$

$$t' = t \cdot k \quad h_{c'} = kh_c \quad /70/$$

a względnie linii wychodzących z początku układu współrzędnych zachodzi :

$$\varepsilon = \text{idem} \quad , \quad w = \text{idem} \quad /71/$$

Poprawność metody dla zawiesin polidyspersyjnych sprawdzono w pracy [16]. Niestety okazuje się, że zawiesiny sflokulowane bądź skongulowane wykazują silny wpływ wysokości na prędkość opadania [51, 57]. Wobec tego metodę tę można polecać jedynie dla substancji, których osady są mało ściśnięte. Do substancji tych można zaliczyć osady mineralne, nie należą do nich natomiast osady biologiczne czy żelaziste.

| Lp. | Zawiesina | Wysokość | Prędkość opadania |
|-----|-------------|----------|-------------------|
| 1. | Zawiesina 1 | 10 cm | 0,15 [16] |
| 2. | Zawiesina 2 | 20 cm | 0,12 [16] |
| 3. | Zawiesina 3 | 30 cm | 0,10 [16] |
| 4. | Zawiesina 4 | 40 cm | 0,08 [16] |
| 5. | Zawiesina 5 | 50 cm | 0,07 [16] |
| 6. | Zawiesina 6 | 60 cm | 0,06 [16] |

2. Powierzchnia sedymentacji.

2.1 Metody rachunkowe.

W literaturze fachowej można znaleźć wiele metod i wzorów do obliczenia powierzchni osadników, jednak nie wiadomo na ile są one pewne. W tabl. 5 zebrane najczęściej cytowane wzory na obliczenie powierzchni sedymentacji.

tabl. 5 Zestawienie wzorów na powierzchnię sedymentacji.

| Lp | Wzór oryginalny | Uwagi | Autor i źródło |
|------|---|--|------------------------------------|
| 5.1 | $A = \dot{V}_{oz} \frac{x_w - x_z}{w \cdot x_w}$ | $w = w_s$ | Kosetkin [58,59] |
| 5.2 | $A = 1,33 \cdot \dot{V}_{oz} \frac{x_w - x_z}{w \cdot x_w}$ | $w = w_s$ | Pswlow, Romankow Noskow [58,60] |
| 5.2a | $A = \frac{\dot{V}_{oz}}{w}$ | $w =$ Obserwowana prędkość rzeźczywiasta | Pikot [80] |
| 5.2b | $A = 1,33 \frac{\dot{V}_{oz}}{w} \frac{(x_w - x_z)}{(x_w - x_p)}$ | w obliczeniach szacunkowych $w = 0,5 w_s$ | |
| 5.3 | $A = K \frac{\dot{V}_{oz}}{w}$ | $w =$ rzeźczywiasta $K = 1,5 - 2,5$ | Anderson, Sparkman [58] |
| 5.4 | $A = 1,25 - 2,0 \frac{\dot{V}_{oz}}{v_{pwt}}$ | $\dot{V}_{pwt} =$ w rzeźczywiasta | Conway, Edwards [58] |
| 5.5 | | | |

| Lp | Wzór oryginalny | Uwagi | Autor i źródło |
|------|---|---|--------------------------------|
| 5.5 | $A = \frac{\dot{V}}{w} \frac{z}{C} \frac{q_E}{q_w}$ | w rzeczywistości | Kolinske [58] |
| 5.6 | $A = \frac{\dot{V}}{w} \frac{z}{C} \frac{C_{vE}}{C_{vw}}$ | w rzeczywistości | Spikins [58] |
| 5.7 | $A = K \frac{\dot{V}}{w} \frac{z}{C} \frac{C_{vE}}{C_{vw}}$ | w rzeczywistości K = 1-4 | Hazen [61] |
| 5.8 | $A = \frac{\dot{V}}{w} \frac{z}{C} \frac{C_{vw} - C_{vE}}{C_{vw}}$ | w = w / C _{vE} / | Battaglia [14] Spikins [58] |
| 5.9 | $A = \frac{\dot{V}}{w} \frac{z}{C} / 1 - \frac{C_{vE}}{C_{vw}}$ | w = w _s | Comings [58] |
| 5.10 | $A = \frac{\dot{V}}{w} \frac{z}{C}$ | w = $\frac{dh}{dt}$ z krzywej sedymen- tacji | Trawiński [58] |
| 5.11 | $A = \frac{\dot{V}}{w} \frac{z}{C} / 2 - \frac{q_E - q_D}{q_w - q_D}$ | w = prędkość opadania swobodnego największego ziarna w przelewie | Prieobratenski [14] |
| 5.12 | $A = K \frac{\dot{V}}{w} \frac{z}{C} \frac{w}{w}$ | w = w / C _{vE} / K=1,5-2 w budynkach ogrzewanych K=1,7-3 na zewn. budynków | Battaglia [14] |

| Lp | Wzór oryginalny | Uwagi | Autor i źródło |
|------|--|--|--|
| 5.13 | $A = \frac{\dot{V} \rho}{w - v}$ | $w = w/G_{vz} /$ a/ $v = 0,152 \cdot w$ b/ $v = 0,0282 \cdot$ $\cdot \frac{w}{h^{0,2}}$ | Szyszkina [62] |
| 5.14 | $A = \dot{G} \frac{m_z - m_w}{w c}$ | w liniiowej części krzywej sedymentacji | Brown [9] Gundelsch [58] Krekowski [63] |
| 5.15 | $A = 1,33 \dot{G} \frac{m_z - m_w}{\rho_c w}$ | w = jak wyżej | |
| 5.16 | $A = KG \left(\frac{p - p_{min}}{w} \right)_{max}$ | $w = w/P/$ $K=1,3-2$ | Leskowski [64] w oparciu o metodę AG Freiberg i [65] |
| 5.17 | $A = KG \frac{m_z - m_w}{w \rho_c} \max$ | w rzeczywistości | Leskowski [58] |
| 5.18 | $A = \dot{G} \frac{1}{\left(\frac{c w}{m - m_w} \right)_{min}}$ | $w = w/m/$ $m \in (m_w, m_z)$ | Coe Clevenger [15] |
| 5.19 | $A = G \frac{1}{c_z w}$ | $w = w / c_z /$ | Coe Clevenger [58] |
| 5.20 | $A = KG / \frac{m - m_w}{w} / \max$ | $w = w/m/$ $m \in (m_w, m_z)$ $K=1,5-2$ w budynkach ogrzewanych $K=1,7-3$ pozostałymi budynkami | Coe Clevenger [14] |

z powyższej tabeli zastosowano następujące oznaczenia :

$$\dot{G} = \dot{V}_{cz} \rho_c x_s = \dot{V}_z C_{vz} \rho_s \quad \dot{V}_s = \dot{V}_{cz} \frac{\rho_c}{\rho} / 1 + x_s / \quad /72/$$

w_s = prędkość obliczona ze wzoru Stokesa /8/

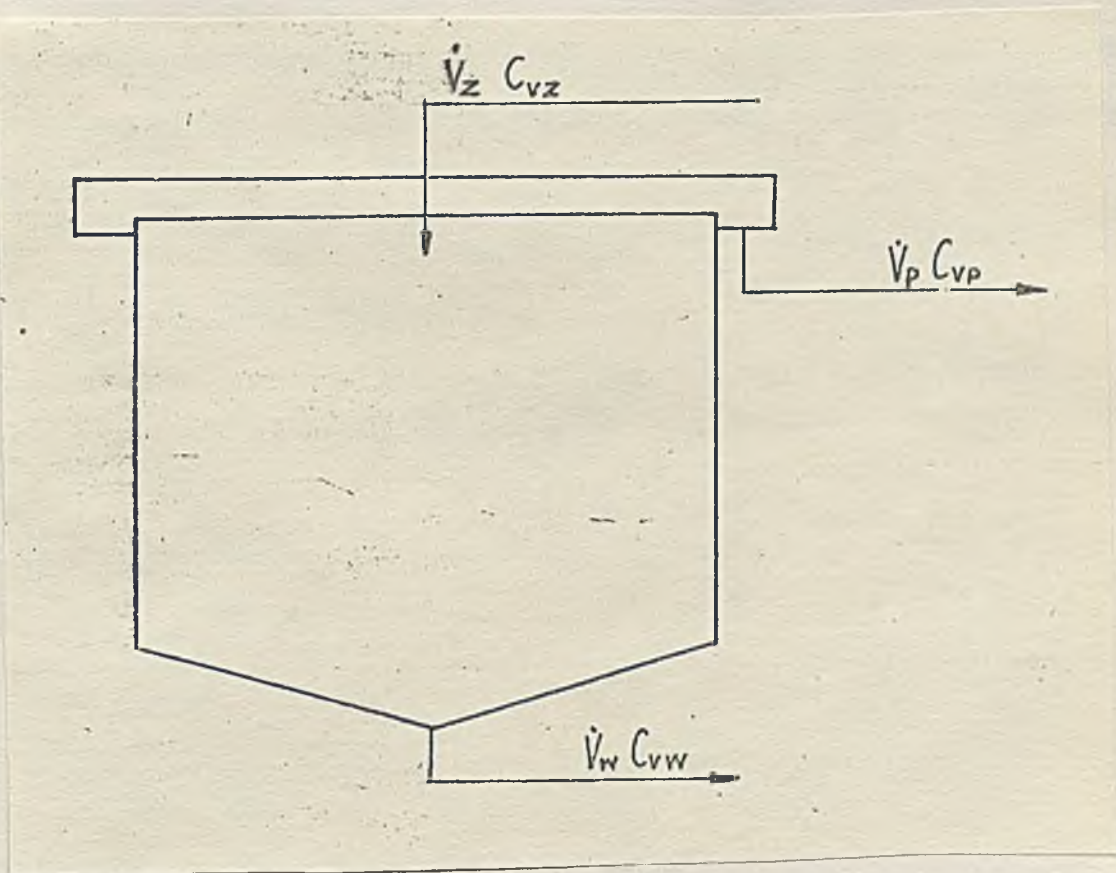
Obecny stan wiedzy upoważnia do analizy wzorów zawartych w tabl. 5.

Pracę osadnika ciągłego w stanie ustalonym można opisać następującymi równaniami bilansowymi :

$$\dot{V}_z = \dot{V}_p + \dot{V}_w \quad /73/$$

$$\dot{V}_z C_{vs} = \dot{V}_p C_{vp} + \dot{V}_w C_{vw} \quad /74/$$

Powyższe oznaczenia wyjaśnia Rys. 20



Rys. 20 Schemat osadnika ciągłego

W zależności od sformułowania celu pracy osadnika lub warunków w jakich ma działać, z równań /73,74/ można otrzymać związki do obliczenia powierzchni sedimentacji. I tak jeżeli dla zadanej zawiesiny zasilającej o \dot{V}_z i C_{vz} mamy uzyskać konkretny przelew o stężeniu C_{vp} to :

$$\dot{V}_p = \dot{V}_z \frac{C_{vw} - C_{vz}}{C_{vw} - C_{vp}} \quad /75/$$

$$\dot{V}_p = w \cdot A \quad /76/$$

wtedy

$$A = \frac{\dot{V}_z}{w} \frac{C_{vw} - C_{vz}}{C_{vw} - C_{vp}} \quad /77/$$

Teoretycznie rzecz biorąc prędkość w użyte do obliczenia powierzchni A powinna być równa rzeczywistej prędkości opadania granicy wętności w operacji.

Analizując tabl. 5 można stwierdzić, że wzory 5.1-5.3, 5.8, 5.9, 5.14, 5.15 i 5.17 są równoważne /77/.

Jeżeli weźnne jest czystość przelewu / $C_{vp} = 0$ / oraz żądane stężenie wylotu C_{vw} wtedy z /73/ i /74/ [58]

$$V_w = \dot{V}_z \frac{C_{vz}}{C_{vw}} \quad /78/$$

$$\dot{V}_w = A \cdot w \quad /79/$$

$$A = \frac{\dot{V}_z}{w} \frac{C_{vz}}{C_{vw}} \quad /80/$$

Analizując w dalszym ciągu tabl. 5 wiadeć, że wzory 5.5-5.7 odpowiadają równaniu /80/.

Przeprowadźmy pojęcie gęstości strumienia ciała stałego g_v przechodzącego przez dowolny przekrój poprzeczny osadnika. Coe i Clevenger na podstawie obserwacji doświadczalnych [15] podali następujący wzór :

$$g_v = \frac{w/C_v}{\frac{1}{C_v} - \frac{1}{C_{vw}}} \quad /81/$$

oraz sposób wykorzystania go do projektowania osadników. Propozycja ta jest następująca :

- 1/ Z doświadczeń okresowych należy wyznaczyć funkcję $w=C_v/$ / z prostoliniowych odcinków na krzywych opadania/
- 2/ Z równania /81/ obliczyć wartości g_v dla szeregu wartości stężeń $C_v = C_{v1}, C_{v2}, C_{vn} /$
- 3/ Jako powierzchnię osadnika wybrać tę, dla której g_v jest najniższe.

Powyższy wzór w formie /81/ został wyprowadzony matematycznie przez Kochiokę [21], natomiast wyprowadzenie uściślone podał Richardson [13].

Podstawą poniższego wyprowadzenia jest zastrzeżenie, że prędkość ruchu ciała stałego w kierunku wylotu z osadnika jest sumą prędkości sedymentacji i prędkości przepływu zawiesiny w dół aparatu /związanej z odbiorem wylotu/.

Jeżeli w to prędkość sedymentacji dla stężenia C_v , a $u = \frac{v}{A}$ to prędkość przepływu odbieranej zawiesiny, to gęstość strumienia ciała stałego w pewnym przekroju aparatu będzie równa :

$$g_v = C_v / w / C_v / + u / \quad /82/$$

Zapiszmy powyższe równanie dla warunków wylewu

$$E_v = C_{vw} / w / C_{vw} / + u / \quad /83/$$

Z równania /83/ obliczmy u i wstawmy do /82/

$$u = \frac{E_v}{C_{vw}} - w / C_{vw} / \quad /84/$$

$$E_v = C_v / w / C_v / + \frac{E_v}{C_{vw}} - w / C_{vw} / \quad /85/$$

Po przekształceniach otrzymamy

$$E_v = \frac{w / C_v / - w / C_{vw} /}{\frac{1}{C_v} - \frac{1}{C_{vw}}} \quad /86/$$

Jeżeli przyjąć, że $w / C_v / \gg w / C_{vw} /$ wtedy otrzymamy klasyczne równanie Coe i Clevengera /81/.

Do propozycji Coe i Clevengera można dodać pewne ułatwienie tzn. funkcję $w = w / C_v /$ wyznaczyć metodą graficzną Kyncha w tych przypadkach, kiedy jest to możliwe /patrz. rozdział 1.2.6/ zamiast wykonywania wielu doświadczeń okresowych dla różnych stężeń początkowych i odczytywania wartości $w / C_v /$ z początkowych odcinków na krzywych sedymentacji.

Kontynuując analizę tabl. 5 należy stwierdzić, że wzory 5.15, 5.18 i 5.20 odpowiadają /81/ i algorytmowi po nim opisanemu.

Większość wzorów w tabl. 5 zawiera jakiś rodzaj poprawki /stała K lub prędkość hamowania v /. Jest to związane z : przeniesieniem skali, nieidealnością zawiesiny, burzliwością przepływu, wpływami otoczenia /np. zmiany temperatury/ itp.

Trudno a priori stwierdzić, która formuła jest najlepsza do celów projektowych i dlatego zdecydowano się na weryfikację doświadczalną. W opracowaniu tym pominięto wzory, w których występuje prędkość opadania swobodnego, gdyż nadsię się one do obliczeń klarowników i jak stwierdzają obliczenia Rebla [56] nie obowiązują dla sedymentacji skrapowanej /zdrow opinia ich autorów/. Wybrane do weryfikacji równania z tabl. 5 po wyrażeniu w jednolitej formie przy użyciu stężeń objętościowych umieszczone w tabl. 6. tabl. 6 zestawienie przygotowanych do weryfikacji doświadczalnej wzorów na powierzchnię sedymentacji.

| Lp | Wzór przekształcony | Uwagi |
|-----|---|--|
| 6.1 | $A = K \frac{\dot{V}}{w} \frac{C_{vw} - C_{vs}}{C_{vw} - C_{vp}}$ | $w = w / C_{vs}$ $K = 1,5-2$ w budynkach ograniczonych $K = 1,7-3$ na zewnątrz budynków |
| 6.2 | $A = K \frac{\dot{V}}{w} \frac{C_{vs}}{C_{vw}}$ | $C_{vp} = 0$, $w = w / C_{vs}$ / lub $w = w / C_{vw}$ / $K = 1-4$ |
| 6.3 | $A = 1,25-2,0 \frac{\dot{V} / (1 - C_{vs})}{w}$ | $w = w / C_{vs}$ |
| 6.4 | $A = \frac{\dot{V}}{w}$ | $w = w / C_{vs}$ |
| 6.5 | $A = \frac{\dot{V}}{w-v} \frac{C_{vw} - C_{vs}}{C_{vw} - C_{vp}}$ | $w = w / C_{vs}$ $v = 0,152 \cdot w$ lub $v = 0,0282 \cdot \frac{w}{h^{0,2}}$ |

| Lp | Wzór przekształcony | Uwagi |
|-----|---|--|
| 6.6 | $A=K \cdot V \cdot \frac{C_{vz} - C_{vp}}{C_{vw} - C_{vp}} \cdot C_{vw} \left(\frac{\frac{1}{C_v} - \frac{1}{C_{vw}}}{W} \right)_{\max}$ | $C_v \in \langle C_{vz}, C_{vw} \rangle$, $w = W/C_v$, K jak w pkt. 1 |
| 6.7 | $A=K \cdot V \cdot \frac{C_{vz} - C_{vz}}{C_{vw} - C_{vp}} \cdot C_{vw} \left(\frac{\frac{1}{C_v} - \frac{1}{C_{vw}}}{W - W/C_v} \right)_{\max}$ | jak wyżej |

Sprzedażenie doświadczalne powyższych wzorów przeprowadzono w oparciu o dane pochodzące z instalacji przemysłowej [58], laboratoryjnej [16, 38, 56] oraz pilotującej [66].

Poniżej przedstawiono podstawowe wartości wielkości pomiarowych uzyskane z przemysłowego osadnika Borra /A = 295 m²/ z VEB Chemische Werke Buna [58]. Badano była zawiesina Ca(OH)₂ w wodzie o następujących parametrach:

$$\begin{aligned} \rho_g &= 2200 \text{ kg/m}^3 & \eta_c &= 4,858 \cdot 10^{-4} \text{ Pa}\cdot\text{s} \\ \dot{V}_{cz} &= 40 \text{ m}^3/\text{h} & x_g &= 0,021 \\ x_g &= 0,018 & x_w &= 0,0456 \\ w_{rz} &= 0,338 \text{ m/h} \end{aligned}$$

W Instytucie Inżynierii Chemicznej i Budowy Aparatury Politechniki Śląskiej wykonano badanie [16, 38, 56] na osadniku laboratoryjnym D = 0,345 m A = 0,09348 m²

W tabl. 7 i 8 zamieszczono dane z pracy [16], gdzie badano zawiesinę kredy mielonej w wodzie, $\rho_g = 2567,6 \text{ kg/m}^3$, $C_{vp} = 0$

tabl. 7 Dane bilansowe z pracy [15]

| Lp | $\dot{V}_z \left[\frac{\text{cm}^3}{\text{min}} \right]$ | C_{vz} | C_{vw} |
|----|---|----------|----------|
| 1 | 1610 | 0,035 | 0,0760 |
| 2 | 2695 | 0,035 | 0,0915 |
| 3 | 2280 | 0,035 | 0,0866 |
| 4 | 1380 | 0,05 | 0,106 |
| 5 | 2100 | 0,05 | 0,0643 |
| 6 | 2820 | 0,05 | 0,0573 |
| 7 | 555 | 0,10 | 0,216 |
| 8 | 1600 | 0,10 | 0,110 |
| 9 | 290 | 0,10 | 0,136 |

tabl. 8 Prędkość opadania krody mielonej w funkcji stężenia [16]

| C_v | 0,035 | 0,04 | 0,045 | 0,05 | 0,10 | 0,15 | 0,20 | 0,25 |
|---|--------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|
| $w \left[\frac{\text{cm}}{\text{min}} \right]$ | 2,3375 | 2,0111 | 1,7500 | 1,5273 | 0,375 | 0,1836 | 0,1059 | 0,0625 |

tabl. 9 Dane bilansowe z pracy [38]

| Lp | $\dot{V}_z \left[\frac{\text{cm}^3}{\text{min}} \right]$ | C_{vz} | C_{vw} |
|----|---|----------|----------|
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| 1 | 5000 | 0,035 | 0,043 |
| 2 | 2000 | 0,035 | 0,155 |
| 3 | 4000 | 0,035 | 0,054 |
| 4 | 2100 | 0,05 | 0,091 |

tabl. 9 o.d.

| 1 | 2 | 3 | 4 |
|----|------|-------|-------|
| 5 | 1500 | 0,05 | 0,124 |
| 6 | 2500 | 0,05 | 0,157 |
| 7 | 2500 | 0,05 | 0,125 |
| 8 | 2700 | 0,065 | 0,09 |
| 9 | 1300 | 0,065 | 0,198 |
| 10 | 2800 | 0,065 | 0,083 |

tabl. 10 Prędkości opadania skrępowanego w funkcji stężenia [38]

| C_v | 0,035 | 0,04 | 0,05 | 0,10 | 0,15 | 0,20 |
|---|-------|-------|------|-------|--------|--------|
| $v \left[\frac{\text{cm}}{\text{min}} \right]$ | 2,14 | 1,745 | 1,51 | 0,359 | 0,1923 | 0,1071 |

tabl. 11 Dane bilansowe dla kredy [56]

| lp | $v_z \left[\frac{\text{cm}^3}{\text{min}} \right]$ | C_{vz} | C_{vw} |
|----|---|----------|----------|
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| 1 | 3000 | 0,025 | 0,164 |
| 2 | 3000 | 0,025 | 0,142 |
| 3 | 3600 | 0,025 | 0,069 |
| 4 | 3600 | 0,025 | 0,061 |
| 5 | 4200 | 0,025 | 0,043 |
| 5 | 4200 | 0,025 | 0,041 |
| 7 | 4200 | 0,025 | 0,042 |
| 8 | 4800 | 0,025 | 0,038 |
| 9 | 4800 | 0,025 | 0,039 |

tabl. 11 c.d.

| 1 | 2 | 3 | 4 |
|----|------|-------|-------|
| 10 | 5400 | 0,025 | 0,035 |
| 11 | 5400 | 0,025 | 0,031 |
| 12 | 6000 | 0,025 | 0,031 |
| 13 | 6000 | 0,025 | 0,030 |
| 14 | 1200 | 0,057 | 0,210 |
| 15 | 1200 | 0,057 | 0,182 |
| 16 | 1680 | 0,057 | 0,106 |
| 17 | 2100 | 0,057 | 0,094 |
| 18 | 2100 | 0,057 | 0,088 |
| 19 | 2400 | 0,057 | 0,083 |
| 20 | 2400 | 0,057 | 0,077 |
| 21 | 3000 | 0,057 | 0,077 |
| 22 | 3000 | 0,057 | 0,071 |
| 23 | 3600 | 0,057 | 0,071 |
| 24 | 3600 | 0,057 | 0,065 |
| 25 | 4200 | 0,057 | 0,067 |
| 26 | 4200 | 0,057 | 0,066 |
| 27 | 4800 | 0,057 | 0,064 |
| 28 | 4800 | 0,057 | 0,061 |
| 29 | 5400 | 0,057 | 0,065 |
| 30 | 6000 | 0,057 | 0,062 |
| 31 | 6000 | 0,057 | 0,061 |
| 32 | 1200 | 0,084 | 0,134 |
| 33 | 1680 | 0,084 | 0,112 |
| 34 | 2100 | 0,084 | 0,104 |
| 35 | 2400 | 0,084 | 0,092 |
| 36 | 2400 | 0,084 | 0,094 |
| 37 | 3000 | 0,084 | 0,090 |

tabl. 11 c.d.

| 1 | 2 | 3 | 4 |
|----|------|-------|-------|
| 38 | 3000 | 0,084 | 0,092 |
| 39 | 3600 | 0,084 | 0,091 |
| 40 | 4200 | 0,084 | 0,090 |
| 41 | 4200 | 0,084 | 0,089 |

tabl. 12 Dane kinetyczne dla kredy [56]

| | | | | | | | |
|---|-------|------|-------|-------|-------|-------|------|
| C_v | 0,025 | 0,03 | 0,057 | 0,06 | 0,084 | 0,09 | 0,12 |
| $w \left[\frac{\text{cm}^3}{\text{min}} \right]$ | 2,744 | 2,20 | 0,90 | 0,867 | 0,412 | 0,342 | 0,2 |

tabl. 13 Dane bilansowe dla dicalitu [56]

| L_p | $\dot{V}_s \left[\frac{\text{cm}^3}{\text{min}} \right]$ | C_{vz} | C_{vW} |
|-------|---|----------|----------|
| 1 | 4140 | 0,037 | 0,041 |
| 2 | 4640 | 0,037 | 0,038 |
| 3 | 5244 | 0,037 | 0,038 |
| 4 | 3696 | 0,037 | 0,039 |
| 5 | 2988 | 0,037 | 0,0375 |
| 6 | 4740 | 0,037 | 0,038 |

tabl. 14 Dane kinetyczne dla dicalitu [56]

| | | | | |
|---|-------|-------|--------|-------|
| C_v | 0,03 | 0,037 | 0,06 | 0,08 |
| $w \left[\frac{\text{cm}^3}{\text{min}} \right]$ | 0,293 | 0,173 | 0,0457 | 0,025 |

tabl. 15 Dane bilansowe dla zawieszin krzemionki [66]

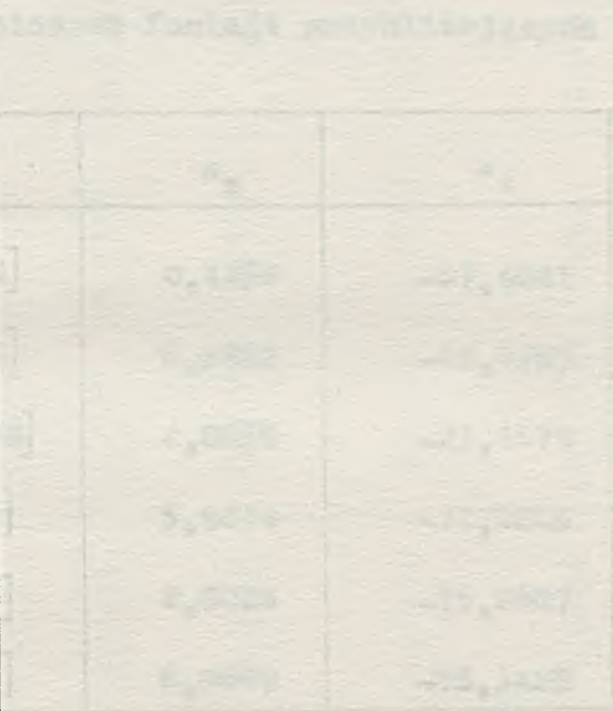
| lp | $\dot{V}_z \left[\frac{\text{cm}^3}{\text{min}} \right]$ | C_{VZ} | C_{VW} |
|----|---|----------|----------|
| 1 | 59140 | 0,0279 | 0,0885 |
| 2 | 43170 | 0,0279 | 0,1212 |
| 3 | 59770 | 0,0194 | 0,1406 |
| 4 | 28260 | 0,0521 | 0,1363 |
| 5 | 20210 | 0,0618 | 0,1467 |
| 6 | 15740 | 0,0836 | 0,1539 |
| 7 | 101360 | 0,0121 | 0,1212 |
| 8 | 90300 | " | 0,1284 |
| 9 | 105030 | " | 0,1309 |
| 10 | 99550 | " | 0,1333 |
| 11 | 94010 | " | 0,1345 |
| 12 | 95830 | " | 0,1575 |
| 13 | 95830 | " | 0,1599 |
| 14 | 97690 | " | 0,1685 |
| 15 | 101360 | " | 0,1696 |

tabl. 16 Prędkość opadania krzemionki w funkcji stężenia zawiesziny [66]

| | | | | | | | |
|---|---------|---------|---------|---------|---------|--------|---------|
| C_v | 0,02339 | 0,03544 | 0,04677 | 0,05812 | 0,07088 | 0,0822 | 0,09356 |
| $w \left[\frac{\text{cm}}{\text{min}} \right]$ | 3,042 | 1,768 | 1,062 | 0,6147 | 0,4166 | 0,3302 | 0,2845 |
| | 0,1569 | | | | | | |
| | 0,1753 | | | | | | |

tabl. 17 Wpółkoszyniki wiskoniomianów sproknyrnacylnych

| lp | material | Autor | s_0 | s_1 | s_2 | $s_3 \cdot 10^{-4}$ | $s_4 \cdot 10^{-4}$ | $s_5 \cdot 10^{-4}$ |
|----|-------------------|-------------|--------|---------|--------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 1 | Ge/ON/2 | Robel [58] | 0,23 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | CaCO ₃ | Kupka [16] | 6,2408 | -163,68 | 1826,7 | -1,0405 | 2,9652 | -3,3590 |
| 3 | CaCO ₃ | Usztył [38] | 6,3354 | -176,64 | 1989,0 | -1,0015 | 1,8537 | 0 |
| 4 | CaCO ₃ | Kreft [56] | 5,8674 | -173,40 | 2158,8 | -1,3471 | 4,1500 | -5,0174 |
| 5 | SiO ₂ | Kreft [56] | 3,286 | -219,92 | 5124,5 | -3,9317 | 0 | 0 |
| 6 | SiO ₂ | Scott [56] | 7,6861 | -277,80 | 3933,4 | -2,4674 | 5,7007 | 0 |



tabl. 18 Współczynniki wykładniowych funkcji przybliżających

| Lp | materiał | Autor | a_0 | a_1 |
|----|-------------------|-------------|--------|----------|
| 1 | Ca/CX/_2 | Robel [58] | 0,4450 | -57,4841 |
| 2 | CaCO_3 | Kupka [16] | 6,2482 | -28,1359 |
| 3 | CaSO_3 | Gazdys [38] | 4,8656 | -23,4679 |
| 4 | CaCO_3 | Kreft [56] | 5,9614 | -32,2206 |
| 5 | SiO_2 | Kreft [56] | 2,8024 | -75,2687 |
| 6 | SiO_2 | Scott [66] | 6,9009 | -38,3428 |

tabl. 19 Zestawienie wyników weryfikacji doświadczelnej wzorów na powierzchnię sedimentacji
/ w/C_v dane wielokrotnie /

| Lp | Wzór przekształcony | \bar{A}_w | σ | $A_w \text{ max}$ | $A_w \text{ min}$ | $\bar{\alpha}$ | n |
|----|---|------------------|------------------|--------------------|-------------------|-----------------|----------|
| 1 | $A = K \frac{V}{w} \frac{C_{vw} - C_{vz}}{C_{vw} - C_{vp}}$ | 0,7435 | 0,3949 | 2,4983 | 0,2138 | 1,558 | 82 |
| 2 | $A = K \frac{V}{w} \frac{C_{vz}}{C_{vw}}$ $w = w / C_{vz}$ $w = w / C_{vw}$ | 3,9141 5,5297 | 7,2815 7,7244 | 31,2350 31,8507 | 0,0549 0,5411 | 2,833 0,3498 | 81 81 |
| 3 | $A = K \frac{V}{w} / 1 - C_{vz}$ | 4,3492 | 7,2484 | 31,235 | 0,6189 | 0,5997 | 82 |
| 4 | $A = \frac{V}{w}$ | 4,5838 | 7,5975 | 32,4356 | 0,6312 | 0,5772 | 82 |
| 5 | $A = \frac{V}{w(1 - 0,0282/h^{0,2})} \frac{C_{vw} - C_{vz}}{C_{vw} - C_{vp}}$ | 0,7537 | 0,3935 | 2,5412 | 0,2173 | (1,5385) | 81 |
| 6 | $A = KV \frac{C_{vz} - C_{vp}}{C_{vw} - C_{vp}} C_{vw} \left(\frac{1}{C_{vw}} - \frac{1}{C_{vw}} \right)_{\text{max}}$ | 0,7622 | 0,3993 | 2,4983 | 0,1591 | 1,5801 | 82 |
| 7 | $A = KV \frac{C_{vz} - C_{vp}}{C_{vw} - C_{vp}} C_{vw} \left(\frac{1}{C_{vw}} - \frac{1}{w - w/C_{vw}} \right)_{\text{max}}$ | 3,0834 | 3,8450 | 18,3600 | 0,5672 | 0,5350 | 75 |

tabl. 20 Zestawienie wyników weryfikacji doświadczalnej wzorów na powierzchnię wedymentacji
 /w/C_v/ dane funkcja wykładniczą/.

| Lp | Wzór przekształcony | \bar{A}_w | σ | $A_{w \max}$ | $A_{w \min}$ | $\bar{\alpha}$ | n |
|----|--|-------------|----------|--------------|--------------|----------------|----|
| 1 | $A = K \frac{V}{W} \frac{C_{vw} - C_{vp}}{C_{vw} - C_{vp}}$ | 0,7361 | 0,3937 | 2,4975 | 0,2191 | 1,5656 | 82 |
| 2 | $A = K \frac{V}{W} \frac{C_{vz}}{C_{vw}}$ $w = w/C_{vw}$ $w = w/C_{vw}$ | 3,8107 | 7,2004 | 31,5731 | 0,0615 | 2,6513 | 82 |
| | | 8,9562 | 12,2223 | 50,5700 | 0,9878 | 0,2487 | 82 |
| 3 | $A = K \frac{V}{W} \frac{1 - C_{vz}}{C_{vw}}$ | 4,3105 | 7,2365 | 31,2266 | 0,6748 | 0,5928 | 82 |
| 4 | $A = \frac{V}{W}$ | 4,5426 | 7,5852 | 32,4264 | 0,6938 | 0,5698 | 82 |
| 5 | $A = \frac{V}{W} \frac{C_{vw} - C_{vz}}{1 - \frac{0,0282}{h \cdot 0,2}}$ $C_{vw} - C_{vp}$ | 0,7461 | 0,3918 | 2,5404 | 0,2227 | (1,5463) | 81 |
| 6 | $A = K \frac{V}{W} \frac{C_{vw} - C_{vp}}{C_{vw} - C_{vp}} \cdot C_{vw} \left(\frac{1 - \frac{1}{C_{vw}}}{W} \right)_{\max}$ | 0,8326 | 0,5007 | 3,2839 | 0,1591 | 1,5477 | 82 |
| 7 | $A = K \frac{V}{W} \frac{C_{vw} - C_{vp}}{C_{vw} - C_{vp}} \cdot C_{vw} \left(\frac{1 - \frac{1}{C_{vw}}}{W - W/C_{vw}} \right)_{\max}$ | 2,6859 | 2,8552 | 11,8949 | 0,3199 | 0,5909 | 82 |

W tabl. 8, 10, 12, 14 i 16 znajdują się wartości prędkości sedymentacji w funkcji stężenia początkowego zmierzane w doświadczeniach okresowych w rurach sedymentacyjnych, w pracach [16, 39, 56 i 66]. W tablicach 7, 9, 11, 13 i 15 umieszczono dane bilansowe z powyższych prac. Dla wszystkich punktów pomiarowych $C_{vp} = 0$.

W celu ułatwienia obliczeń na maszynie cyfrowej poszukiwano najdogodniejszej postaci funkcji $w=C/v$. Funkcje takie powinny być w miarę proste, a z drugiej strony dobrze aproksymować punkty doświadczalne. W końcu wybrano dwie funkcje:

$$w/C/ = a_0 + a_1 C_v + a_2 C_v^2 + a_3 C_v^3 + a_4 C_v^4 + a_5 C_v^5 \quad /87/$$

$$w/C/ = a_0 \cdot e^{a_1 C_v} \quad /88/$$

Stałe a_1 obliczono metodą najmniejszych kwadratów. Ich wartości przedstawiono w tabl. 17 i 18.

Algorytm obliczeń sprawdzających był następujący:

Ubrano wkr do weryfikacji /tabl.6/. Począwszy od tabl. 7

wczytywano kolejno punkty pomiarowe / $v_{zi}, C_{vzi}, C_{vwi}, C_{vpi}$ /

i obliczono $w/C_v/i$ zgodnie z uwagami z tabl. 6 według równanie

/87/. Następnie obliczono wartości A_i przy $K=1$ oraz $A_{wi} = A_i/A_{rz}$

i $\alpha_i = 1/A_{wi}$, aby umożliwić porównanie wyników uzyskanych dla aparatów o różnych rozmiarach. Równocześnie poszukiwano wartości

A_{\max} i A_{\min} .

Na zakończenie cyklu obliczeń drukowano wartości następujących zmiennych

$$\bar{A}_w = \frac{\sum A_{wi}}{n}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum A_{wi}^{-1/2}}{n-1}} \quad (89)$$

$$\bar{\alpha} = \frac{\sum \alpha_i}{n}$$

Następnie przechodzono do kolejnego wzoru z tabl. 6 i ponownie powtórzony cykl obliczeń. Po wyczerpaniu równań z tabl. 6 powtórzono obliczenia stosując równanie /88/ do określenia $w/C_v/1$.

Wyniki powyższych obliczeń przedstawiono w tabl. 19 dla prędkości w wyrażonej równaniem /87/ i w tabl. 20 dla w przedstawionej równaniem /88/.

Przedstawione w tabl. 19 i 20 wyniki cechują się generalnie dużym rozrzutem, co może być spowodowane wieloma czynnikami np. błędami pomiarów czy aproksymacji, przeprowadzeniem pomiarów zbyt wcześnie przed osiągnięciem stanu ustalonego, wykorzystaniem prędkości sedymentacji zmierzonej w teście okresowym do obliczeń urządzenia ciągłego lub pressa pod niepełnym obciążeniem posierazchni aparatu.

Porównując otrzymane wyniki można stwierdzić, że najlepszą zgodność z doświadczeniem wykazują wzory 6.1, 6.5 i 6.6 /tabl. 6/. Najpewniejszy z nich wydaje się wzór 6.1 /klasyczny/. Formuła 6.5 wymaga dodatkowej korekty np. poprzez K. Istotnym zastrzeżeniem jest to, że wzór 6.7, wyprowadzony teoretycznie, jest gorszy od, otrzymanego z niego przez wprowadzenie uproszczenia, wzoru 6.6. Jeżeli dane dotyczące funkcji $w/C_v/$ nie są wystarczająco dokładne, to w związku z obliczeniem wyrażenia $\left(\frac{\frac{1}{C_v} - \frac{1}{C_{vw}}}{w/C_v/} \right)$ otrzymane wyniki mogą być absurdalne /Stąd musi być zrezygnowano z wykorzystania danych Sklunda [22,67] do powyższych obliczeń przedstawiających/.

Chcąc do obliczeń postacie funkcji $w = w/C_v/$ - równania /87 i 88/ spełniły swoje zadanie. Wydaje się, że można wykorzystać do celów projektowych, ale pomiary wartości $w/C_v/$ należy przeprowadzić bardzo starannie.

2.2 Obliczenie powierzchni sedimentacji w oparciu o metody graficzne wykorzystujące dane z krzywych sedimentacji.

Podstawowymi parametrami przedstawionych poniżej metod są gęstość masowa ρ i gęstość objętościowa ρ_v strumienia opadającego ciała stałego /w sensie różnicy /82/ / bądź czas przebywania t_x . Sposób otrzymania wartości tych zmiennych jest specyficzną cechą poszczególnych metod.

Po ich wyznaczeniu, dalsze obliczenie prowadzi się następująco :

$$\begin{aligned}
 \rho &= \frac{q_s h_0}{t_x} & A_s &= \frac{1}{\rho} \\
 \rho_v &= \frac{C_{vz} h_0}{t_x} & A_v &= \frac{1}{\rho_v}
 \end{aligned}
 \tag{90}$$

$$A = \frac{\dot{Q}}{\rho} = \dot{Q} \cdot A_s = \frac{\dot{V} C_{vz}}{\rho_v} = \frac{\dot{V}}{z} C_{vz} A_v = \frac{\dot{V} t_x}{h_0}$$

gdzie A_s to powierzchnia potrzebna na osadzenie jednostki masy ciała stałego, a A_v to powierzchnia sedimentacji w odniesieniu do jednostki objętości ciała stałego.

2.2.1 Metoda Coe i Clevengera [15, 21, 68]

Metoda ta jest graficznym odbiciem wyproszczenia i sposobu wykorzystania do obliczenia powierzchni sedimentacji wzoru Coe i Clevengera /81/. W celu obliczenia powierzchni sedimentacji należy sporządzić wykres funkcji $\rho_v = \rho_v / C_{vz}$, podstawiając do wzoru /90/ odczytaną z wykresu wartość ρ_v min.

Sys. 21 przedstawia wykresy $\rho_v = \rho_v / C_{vz}$ dla danych z tabl. 7 i 8. Szukaną powierzchnię limituje koidorzczowo minimum ρ_v czyli w tym przypadku ρ_v / C_{vz} . Zderza się tak dość często, stąd Robel

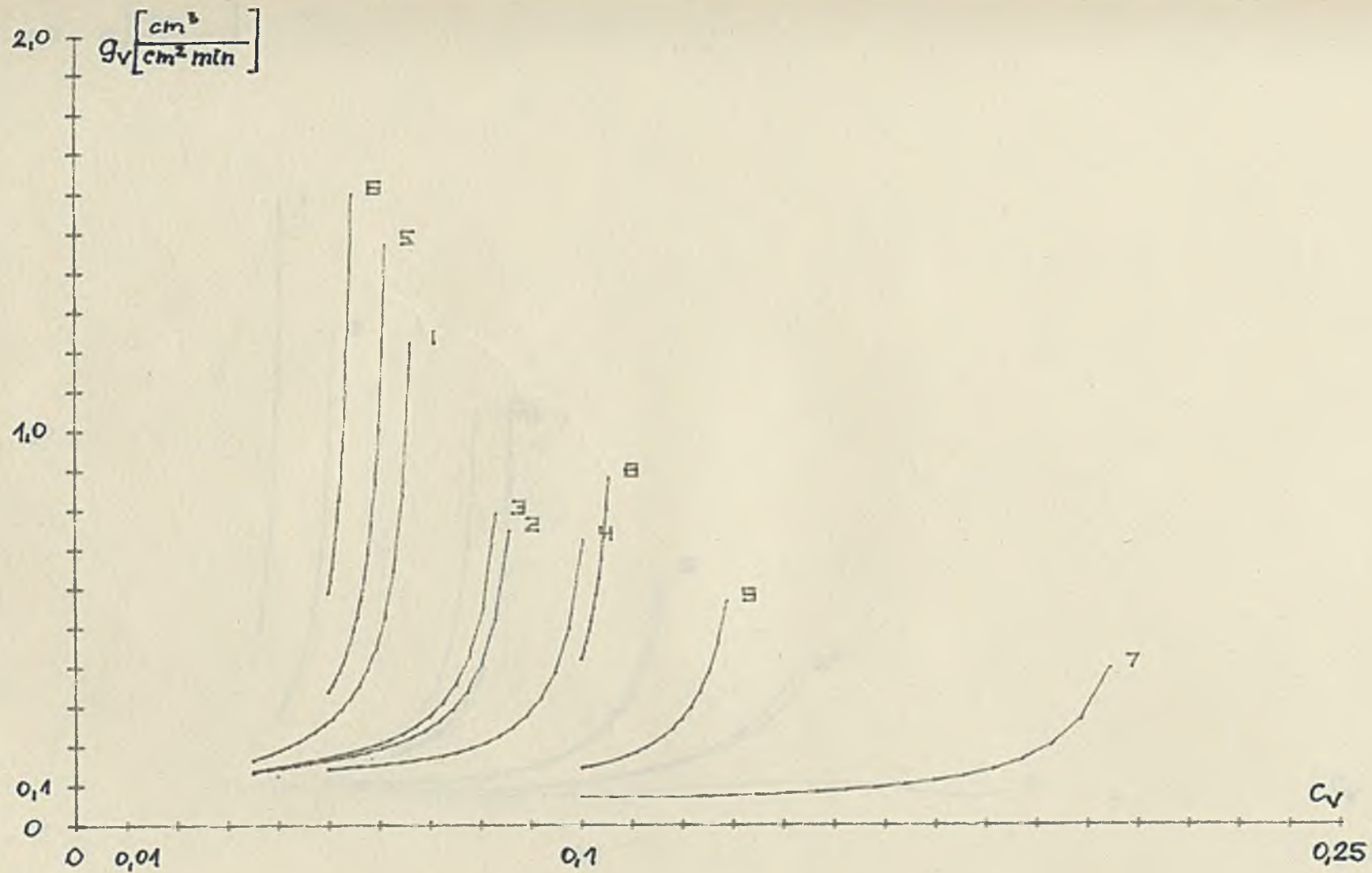
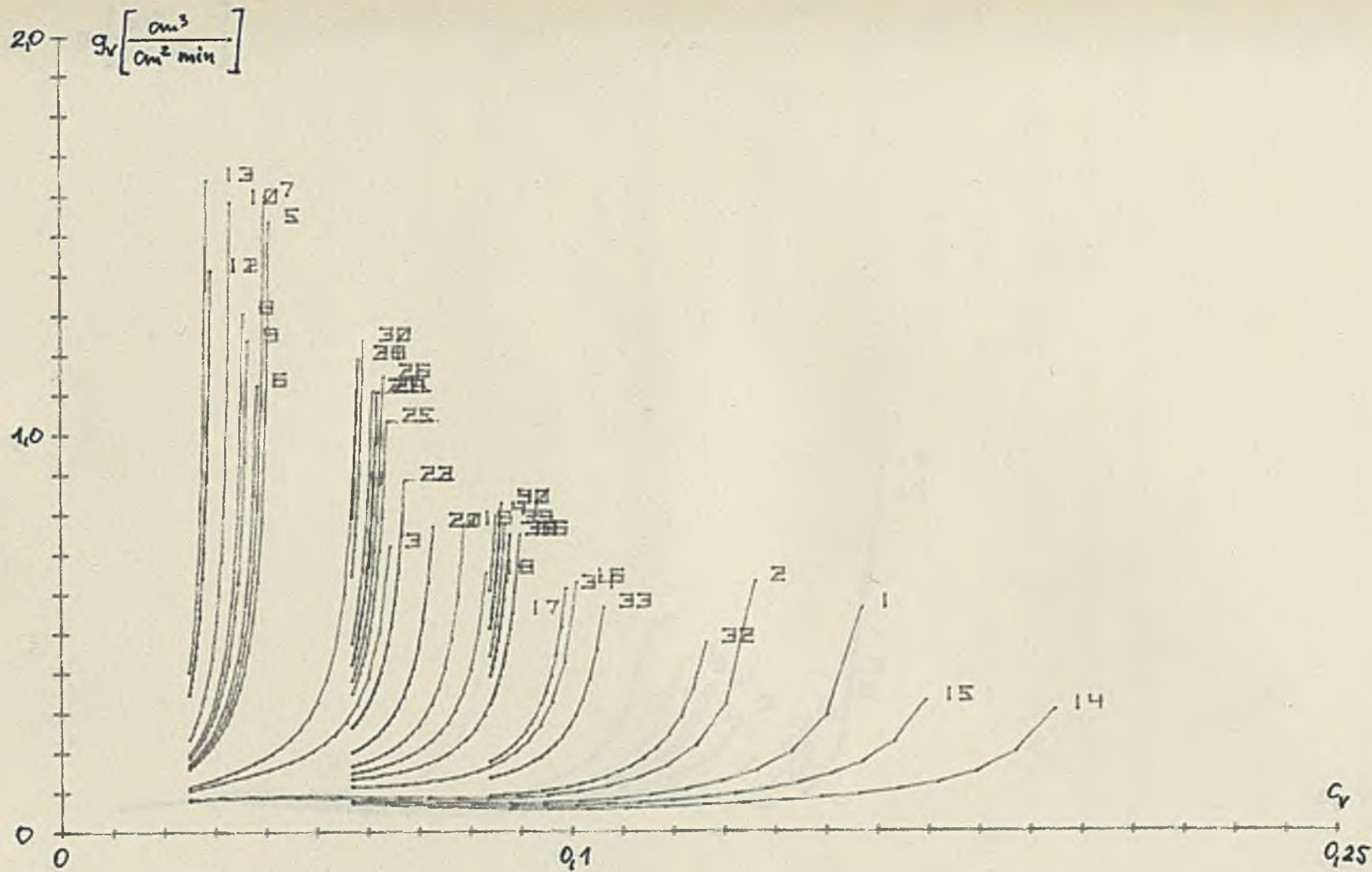
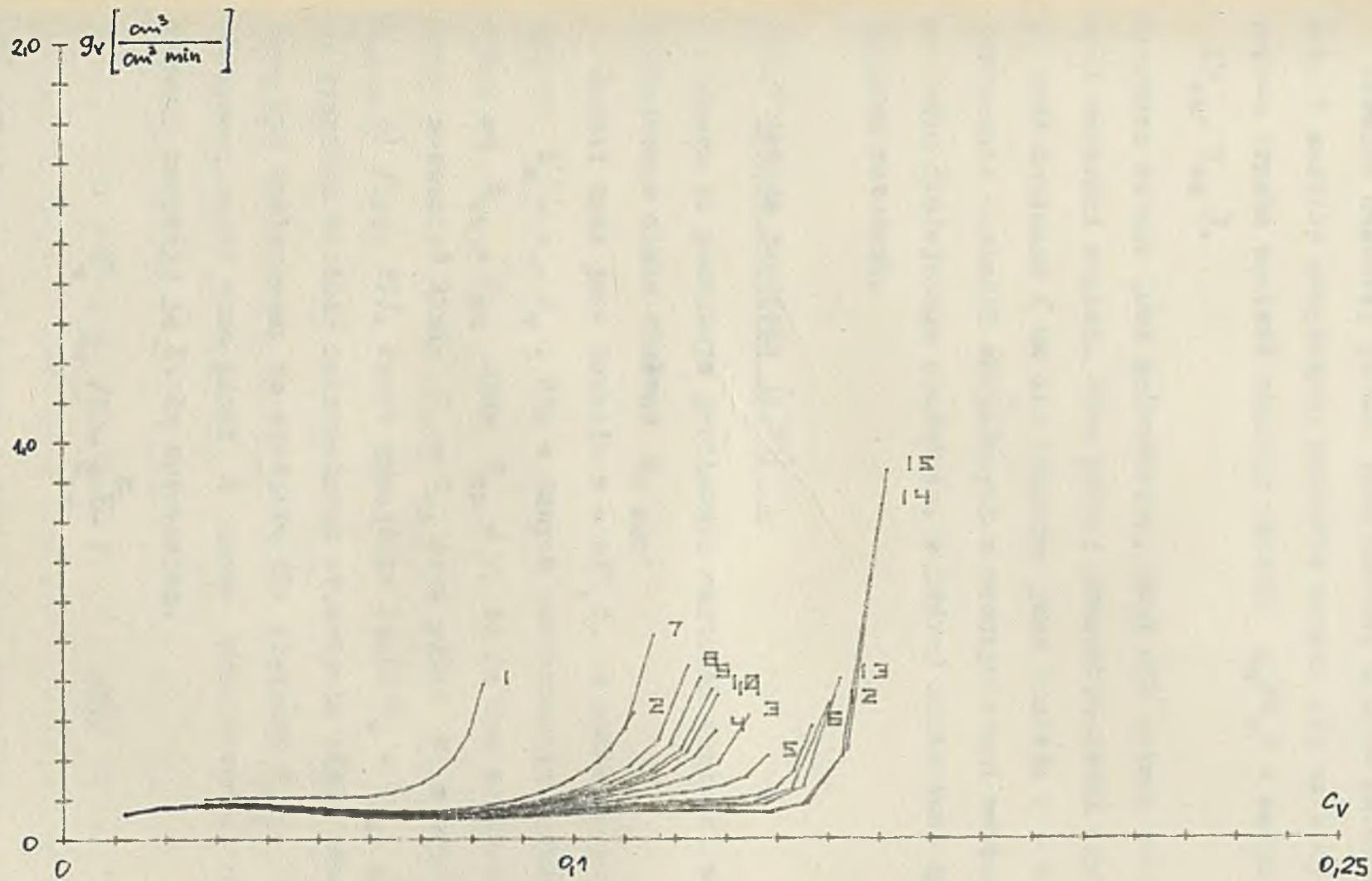


Рис. 21 Выкres g_v/C_v для данных табл. 7 и 8



Rys. 23 Wykresy g_v/C_v dla danych z tablicy 11 i 12



Rys. 24 Wykresy g_v/c_v dla danych z tabl. 15 i 16

58 zaleca stosowanie wzoru $S_v \min = E_v / C_{vz}$.

Jeszcze częściej jednak jest inaczej, o czym świadczy Rys. 22-24. Z analizy powyższych wykresów nasuwa się wniosek, że każdorazowo trzeba znaleźć minimum funkcji E_v / C_v w całym przedziale (C_{vz}, C_{vH}) .

Powyższa metoda jest uniwersalna, gdyż nie zależy od typu zawieszony i wartości stężeń. Mimo pewnej precyzyjności uzyskane wyniki są dość dokładne / na ile dokładne jest funkcje $w = w / C_v$ /.

Porównanie wartości obliczonych z rzeczywistymi zawiera tabl. 24 na końcu niniejszego rozdziału, w której zestawiono wyniki uzyskane różnymi metodami.

2.2.2 Metoda japońska [4,21]

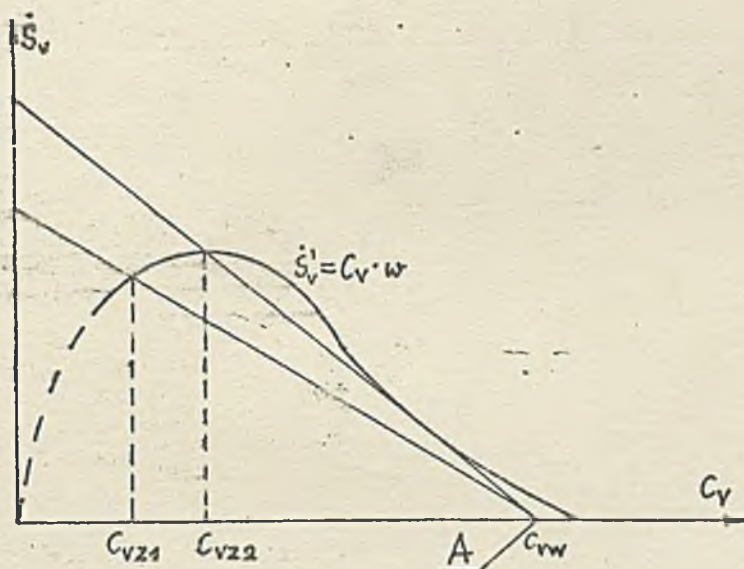
Metoda ta poszukuje graficznie wartości gęstości strumienia opadającego ciała stałego $S_v \max$.

Jeżeli dana jest funkcja $w = w / C_v$, to można sporządzić wykres $S'_v = w \cdot C_v$. Gdy z danych dostarczonych przez inwestora znane są C_{vz} , C_{vH} oraz $C_{vp} = 0$, to na tym samym wykresie można zaznaczyć linię $C_v = C_{vz}$ oraz punkt A o współrzędnych $(C_{vH}, 0)$ /Rys. 25/. Punkt przecięcia linii $C_v = C_{vz}$ z krzywą S'_v wyznacza wartość maksymalnego strumienia ciała stałego, który może być dostarczony do osadnika dla stężenia C_{vz} . Przez tak otrzymany punkt oraz punkt A można przeprowadzić prostą. Autorzy nazywają ją linią operacyjną.

$$S''_v = E_v / (1 - \frac{C_{vz}}{C_{vH}}) \quad /91/$$

Wzór /91/ przedstawia równanie prostej ruchomej.

Jeżeli $C_{vp} = 0$ to $S''_v = E_v$ czyli punkt przecięcia prostej z osią rzędnych wyznacza wartość E_v .

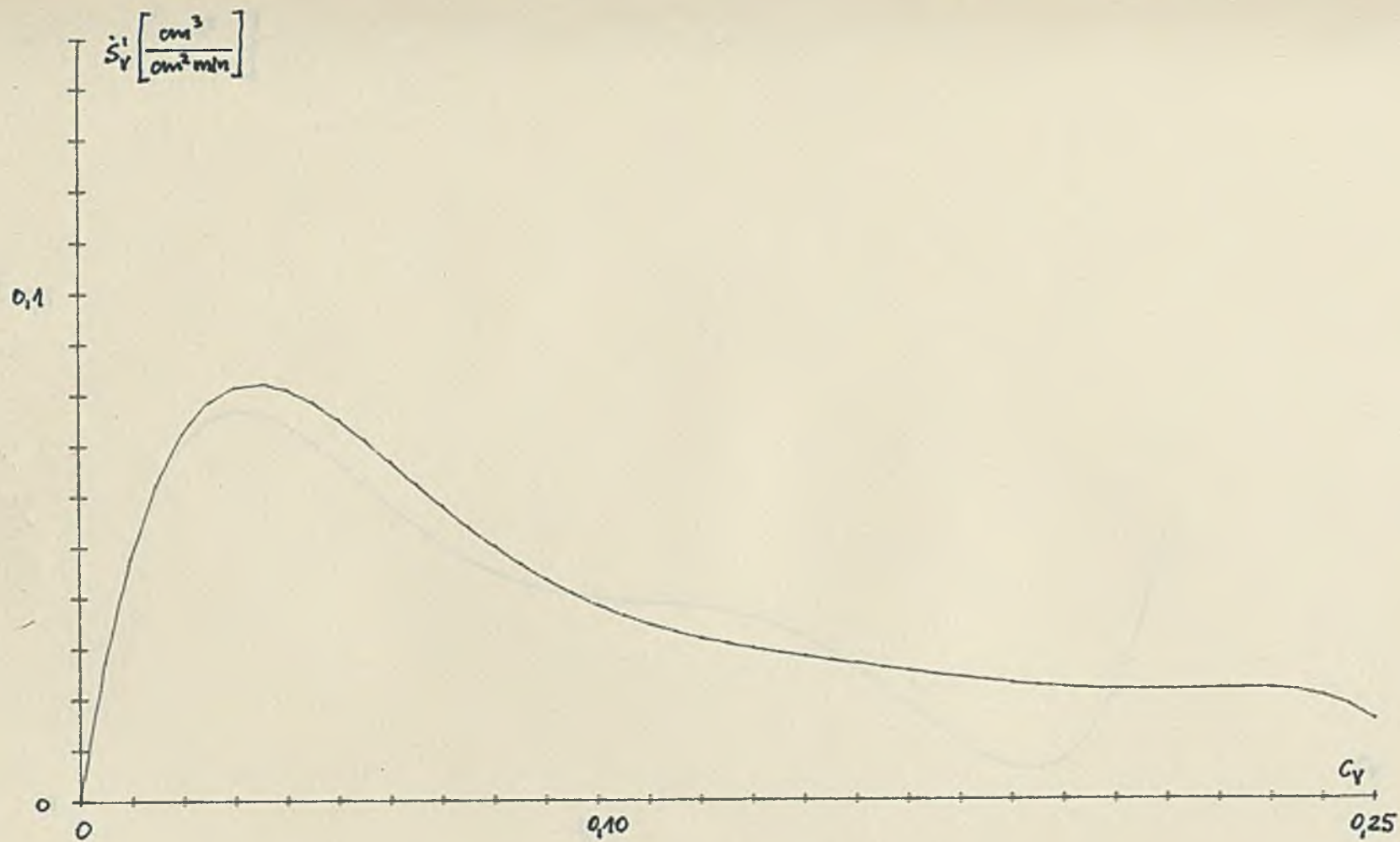


Ryz. 25 Konstrukcja metody japońskiej.

Aby osadnik mógł pracować w stanie ustalonym, wszystkie punkty prostej w przedziale stężeń $\langle C_{VZ} \cdot C_{VW} \rangle$ muszą leżeć w obszarze poniżej krzywej $\dot{S}'_V = w \cdot C_V$.

Stąd $z_{V \max}$ dla stężenia C_{VW} określa styczna do krzywej \dot{S}'_V . Jednak w przypadku przedstawionym na Ryz. 25 minimalne stężenie zasilania musi być zmienione do C_{VZ2} .

Metoda powyższa jest prostsza i łatwiejsza w interpretacji przy pomocy ołówka i linijki od metody Coe i Slevengera, gdyż krzywe \dot{S}'_V zależą tylko od własności zawiesziny. W związku z tym na jednym wykresie można rozpatrzyć różne układy wartości C_{VW} i z_V rysując odpowiednie proste rachowe.



Rys. 26 Krzywa $\dot{\gamma}/C_{\dot{\gamma}}$ dla danych z tabl. 6

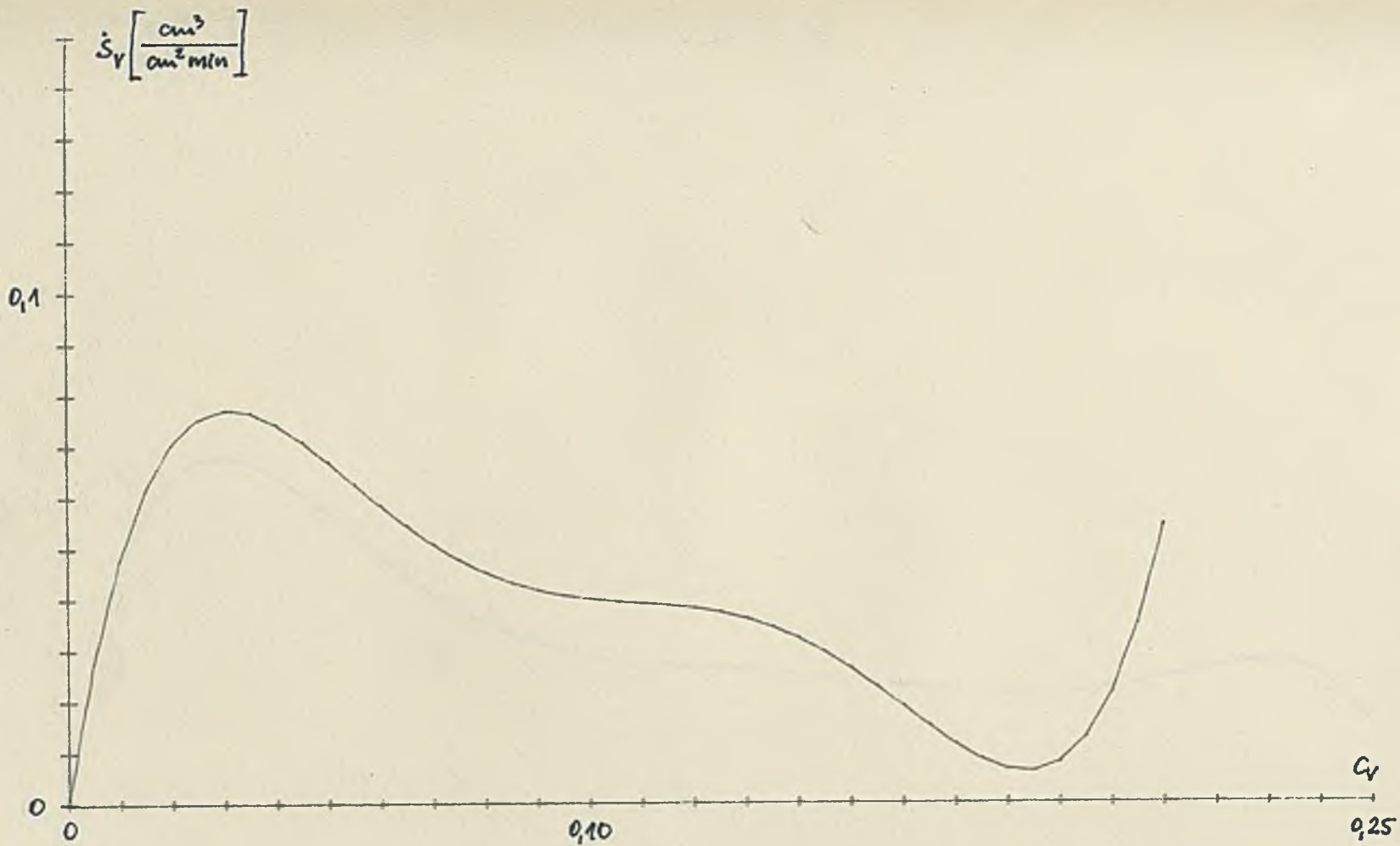
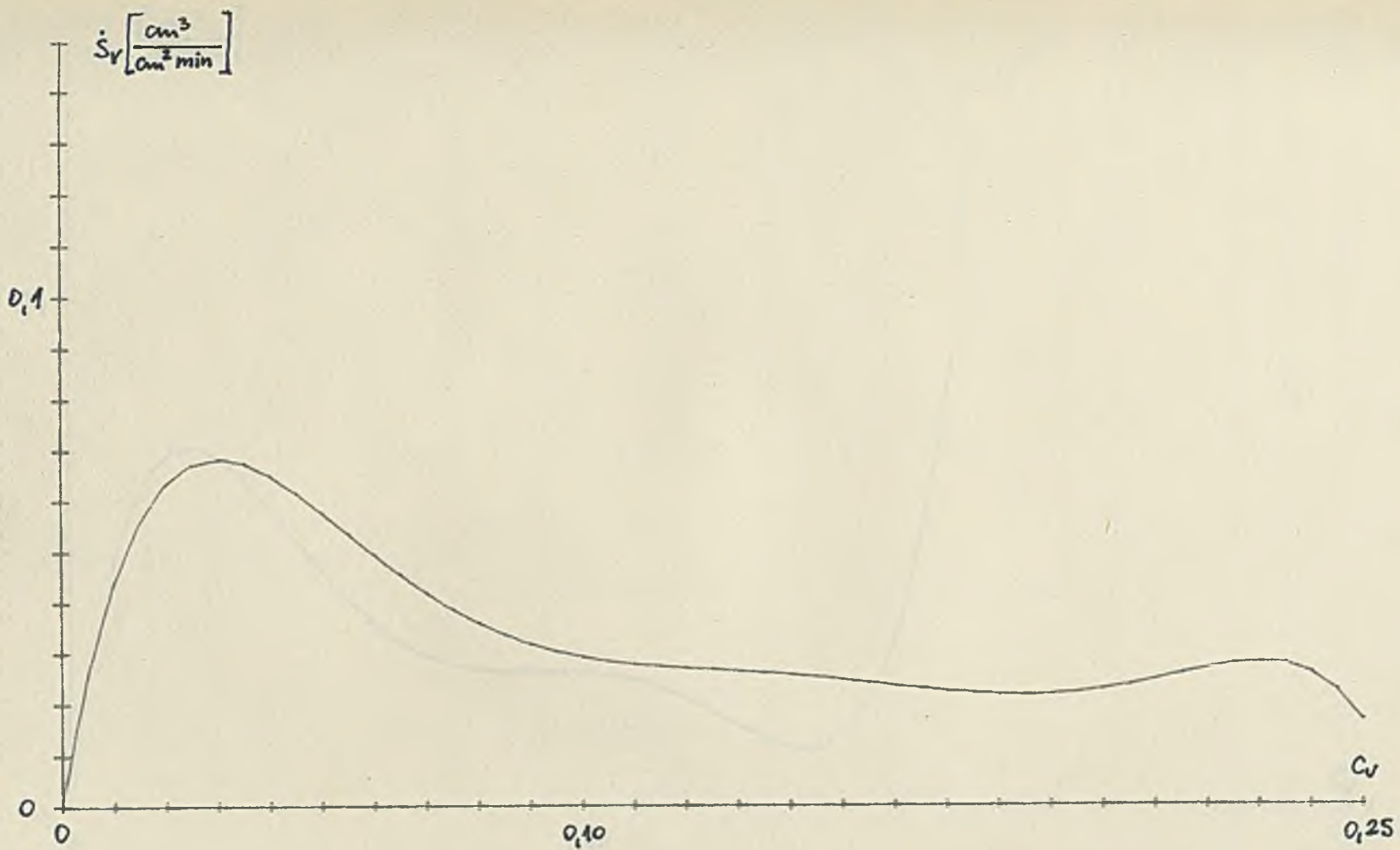
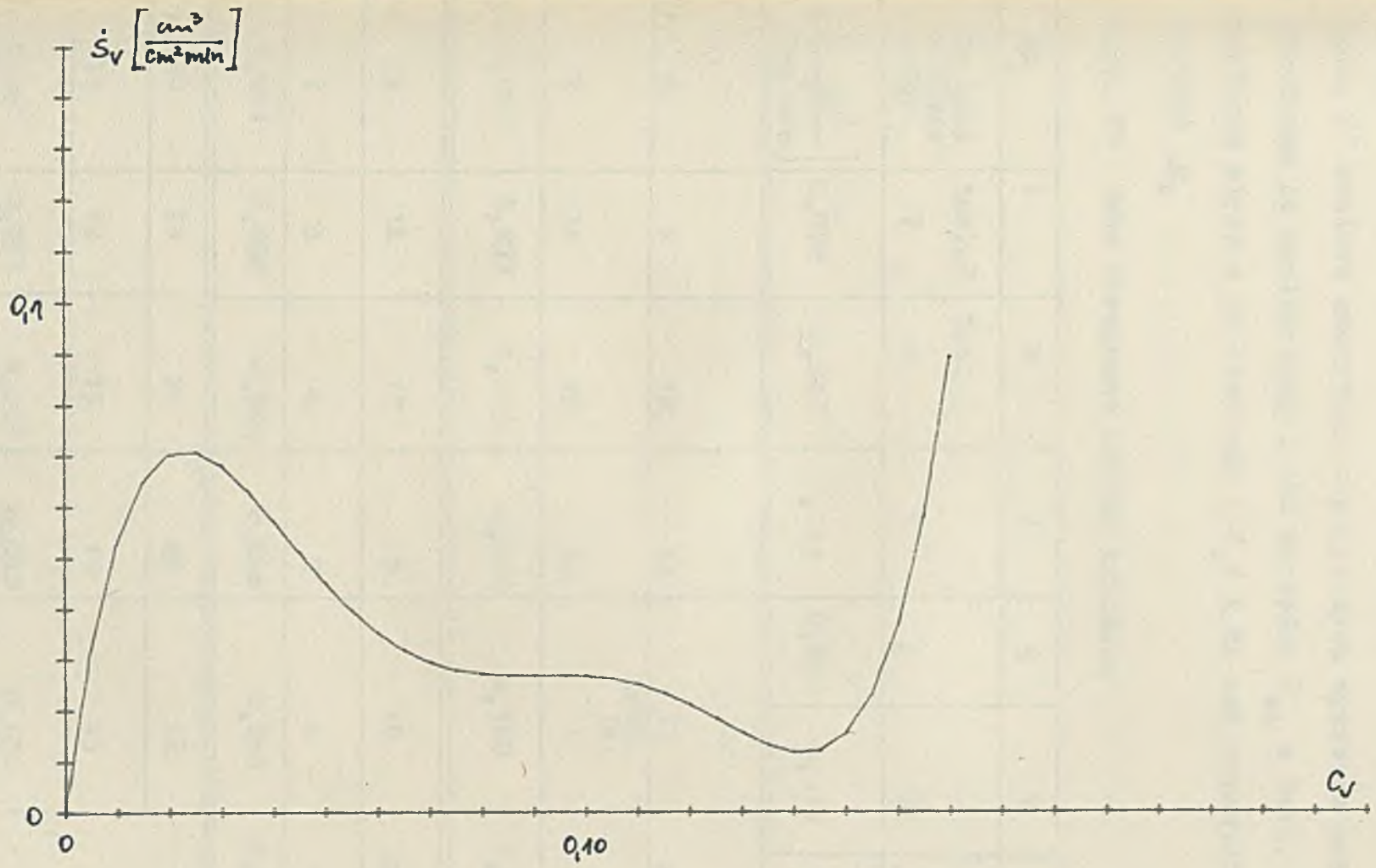


Рис. 27 Кривые \dot{S}_V/C_V для данных в табл. 10.



Rys. 28 Krzywa \dot{S}_v / C_v dla danych z tabl. 12



Rys. 29 Krzywa \dot{S}_V/C_V dla danych z tabl. 16

Rys. 26-29 prezentują krzywe S'_V/C_V dla danych z tabl. 8, 10, 12, i 16.

Tabl. 23 zawiera odczytane z powyższych wykresów wartości g_V .
Otrzymano je następująco : dla wartości C_{Vw} z tabl. 7, 9, 11 i 15
kreślono styczne do krzywych S'_V/C_V i na osi rzędnych odcinano
wartość g_V .

tabl. 21 Dane otrzymane metodą japońską

| | | | | | | | |
|--|--------------|--------------|-------|-------|---------------|-------|---------------|
| Lp | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| Nr tabl i obser wacji | tabl. 7 7 | tabl. 9 2 | 5 | 6 | 7 | 9 | tabl. 11 1 |
| $g_V \left[\frac{cm^3}{cm^2 \cdot min} \right]$ | 0,072 | 0,094 | 0,113 | 0,093 | 0,112 | 0,077 | 0,071 |
| Lp | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
| | 2 | 14 | 15 | 32 | tabl. 15 1 | 2 | 3 |
| g_V | 0,084 | 0,057 | 0,063 | 0,090 | 0,100 | 0,068 | 0,058 |
| Lp | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 |
| | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| g_V | 0,061 | 0,056 | 0,054 | 0,068 | 0,064 | 0,062 | 0,062 |
| Lp | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | | |
| | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | | |
| g_V | 0,061 | 0,053 | 0,052 | 0,050 | 0,050 | | |

Wyniki sprawdzenia doświadczelnego powyższej metody zawiera
tabl. 24 .

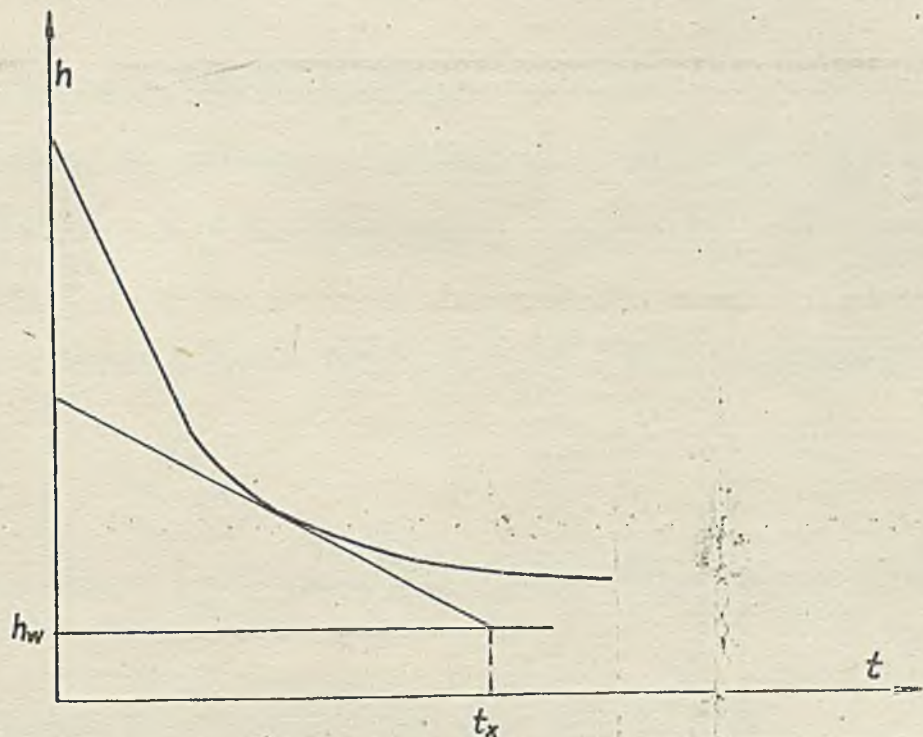
2.2.3 Metoda Kyncha [59] .

Poniższa metoda jest wykorzystywana głównie przez projektantów
z dziedziny inżynierii sanitarnej.

W celu określenia powierzchni osadnika należy wykonać pomiar
krzywej sedymentacji dla stężenia początkowego równego stężeniu
zasilania. Otrzymane wyniki przedstawić w postaci klasycznej
krzywej sedymentacji. /Rys. 30/ w punkcie najszybszej zmiany pochy-
lenia krzywej wykreślić styczną. Poprowadzić linię h_w równoległą
do osi czasu

$$h_w = \frac{h_0 C_0}{C_w} \quad /92/$$

Punkt przecięcia obu linii określi szukany czas t_x . Szukaną
powierzchnię sedymentacji obliczamy z równań /90/.



Rys. 30 Istota metody Kyncha

Do tek obliczonej powierzchni A autor [69] zaleca wprowadzenie współczynnika ^{przeniesienia} (skali) 1,2-1,5.

W tabl. 22 umieszczono wyniki pośrednie uzyskane z zastosowaniem powyższej metody dla danych odczytanych z wykresów /Rys. 31-33/

tabl. 22 Wyniki metody Kyncha*/

| Lp | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|-----------------------|--------------|--------------|---------------|-----|-----|----|
| Nr tabl. i obserwacji | tabl. 7 7 | tabl. 9 6 | tabl. 11 1 | 2 | 14 | 15 |
| h_w [cm] | 16 | 9,9 | 5,3 | 6,2 | 9,5 | 11 |
| t_x [min] | 14 | 4 | 9 | 5 | 3,5 | 28 |

* / Autor tej metody nazwał ją metodą Kyncha

Wyniki sprawdzenia doświadczalnego powyższej metody zawiera tabl. 24.

2.2.4 Metoda Talmage'a Fitcha [1,70].

Jeżeli spełnione są postulaty Kyncha, a stężenie C_w jest mniejsze od koncentracji w punkcie kompresji, to czas t_x można wyznaczyć następująco :

Wyznaczyć krzywą sedymentacji dla h_o i C_o /Rys. 34/. Obliczyć

$$h_w = \frac{h_o C_o}{C_w}$$

Punkt przecięcia linii h_w i krzywej sedymentacji wyznacza wartość t_x/h_w /.

* tabl. 23 przedstawiono wyniki odczytane z Rys. 31-34.

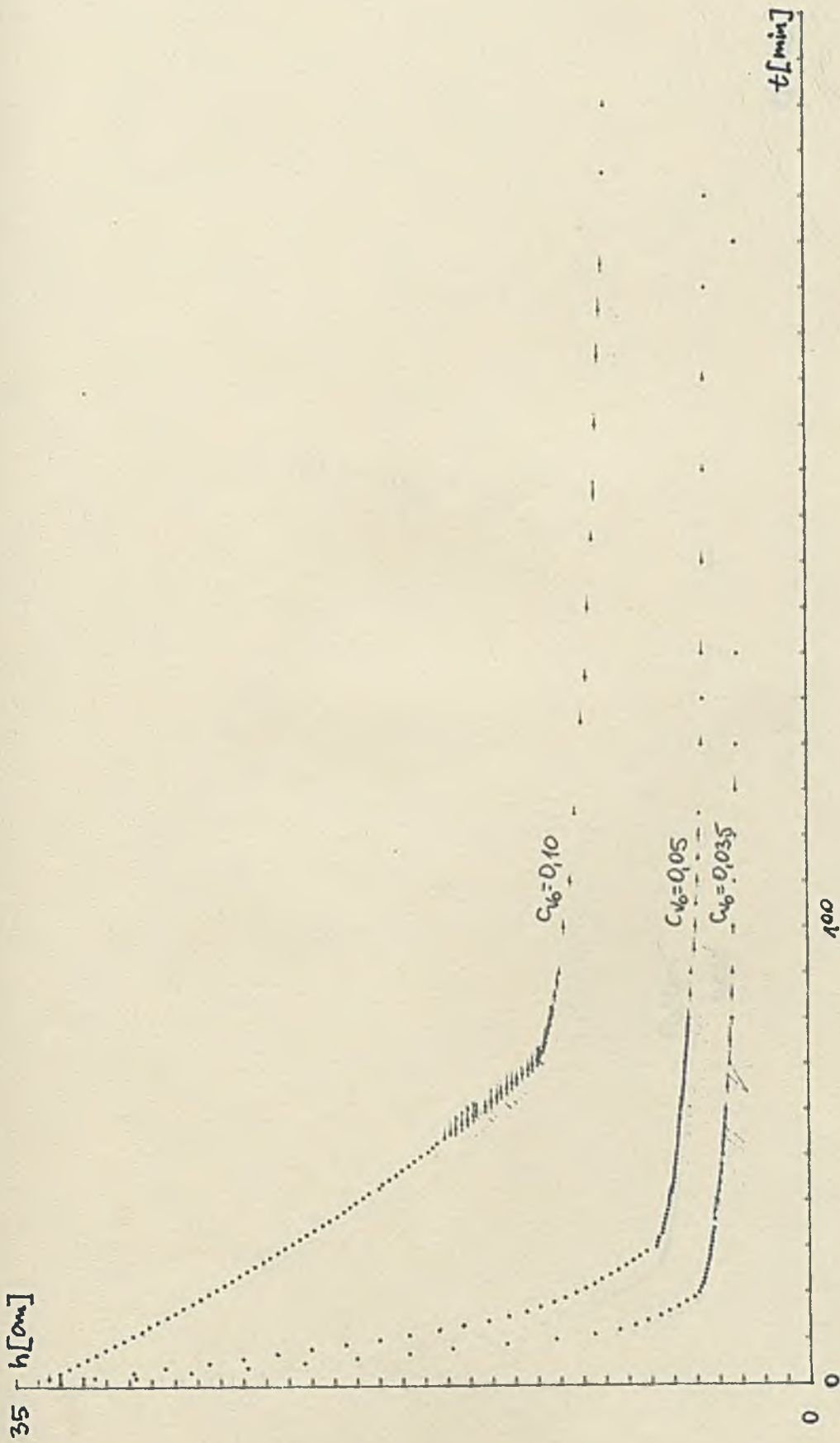
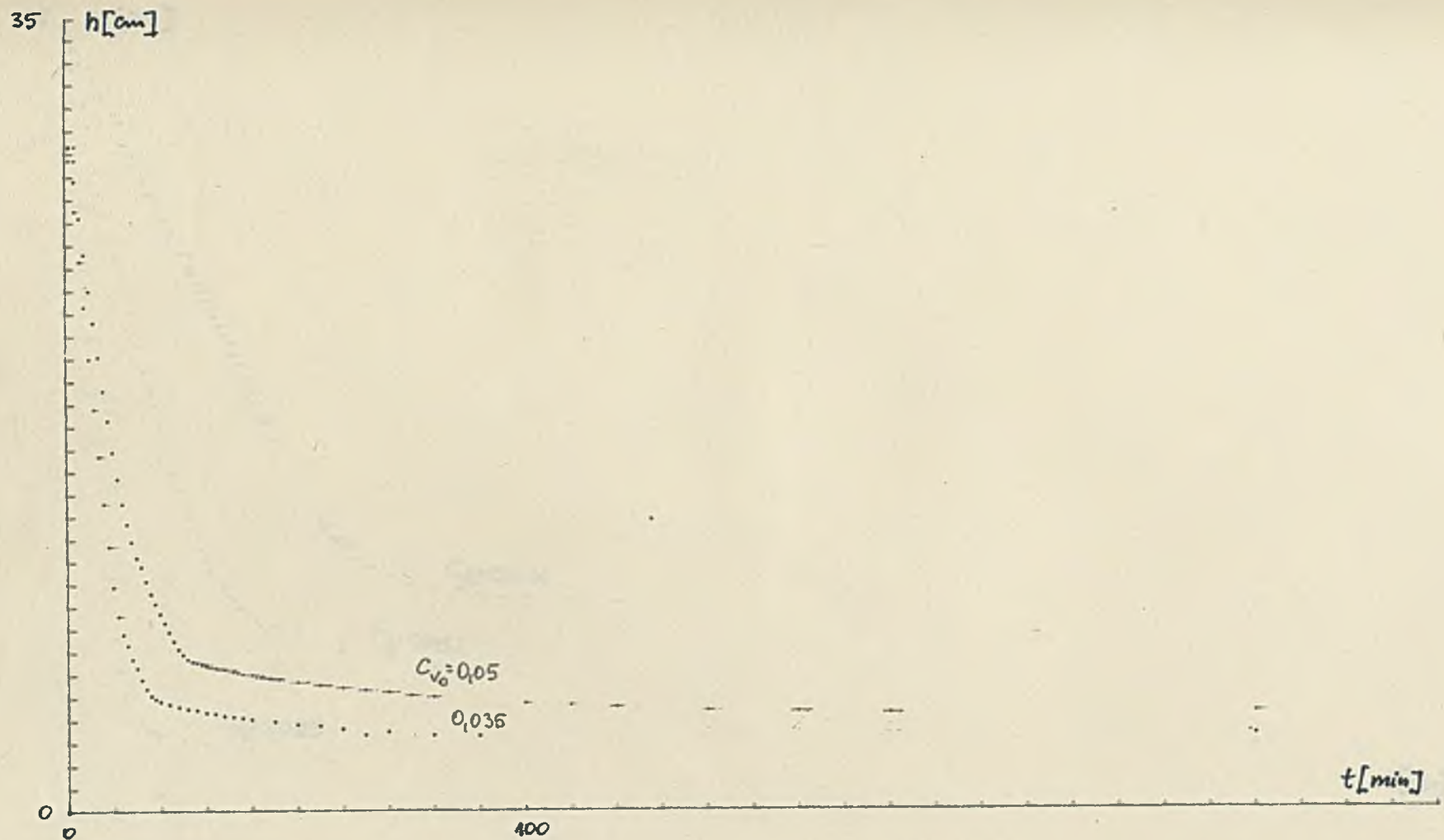
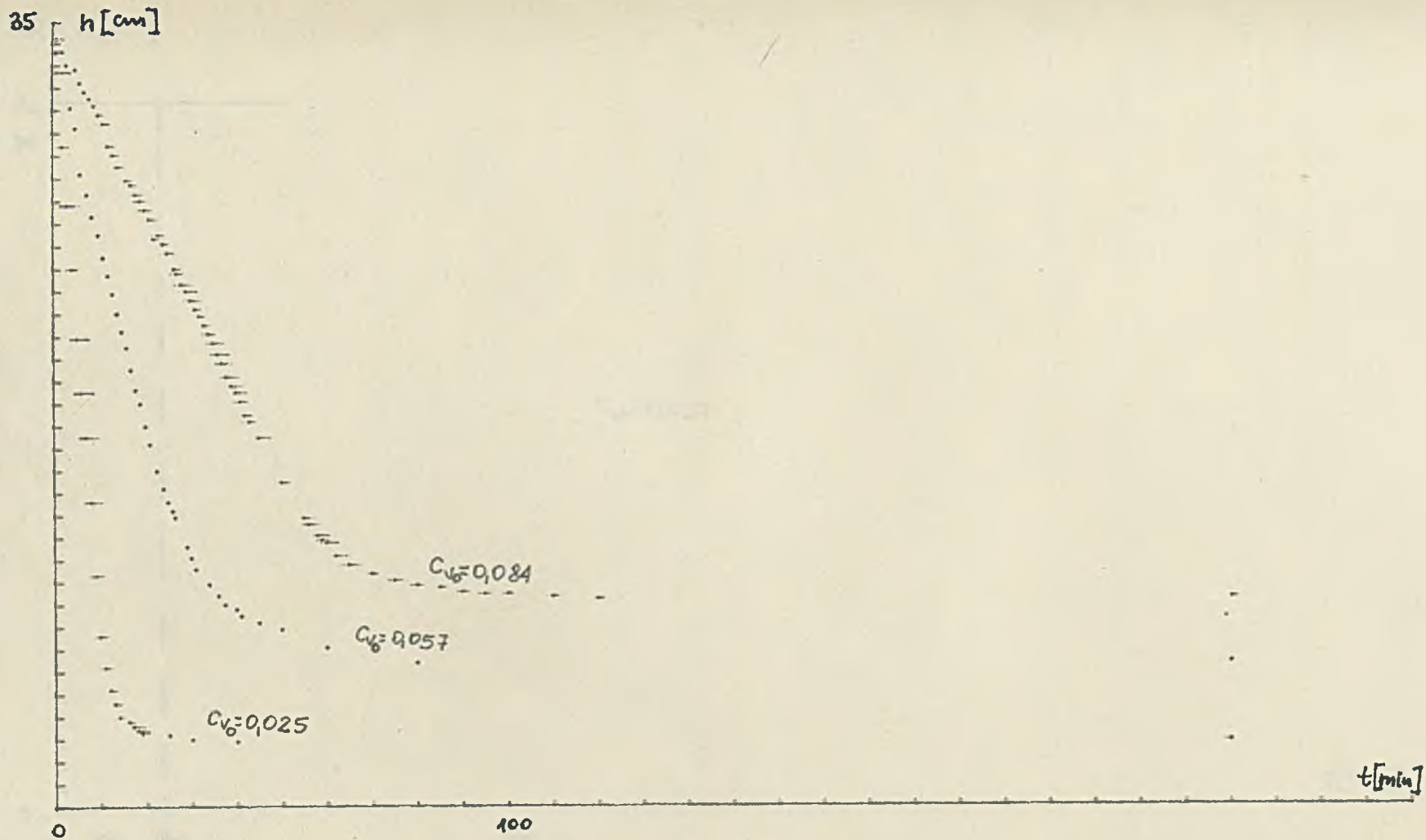


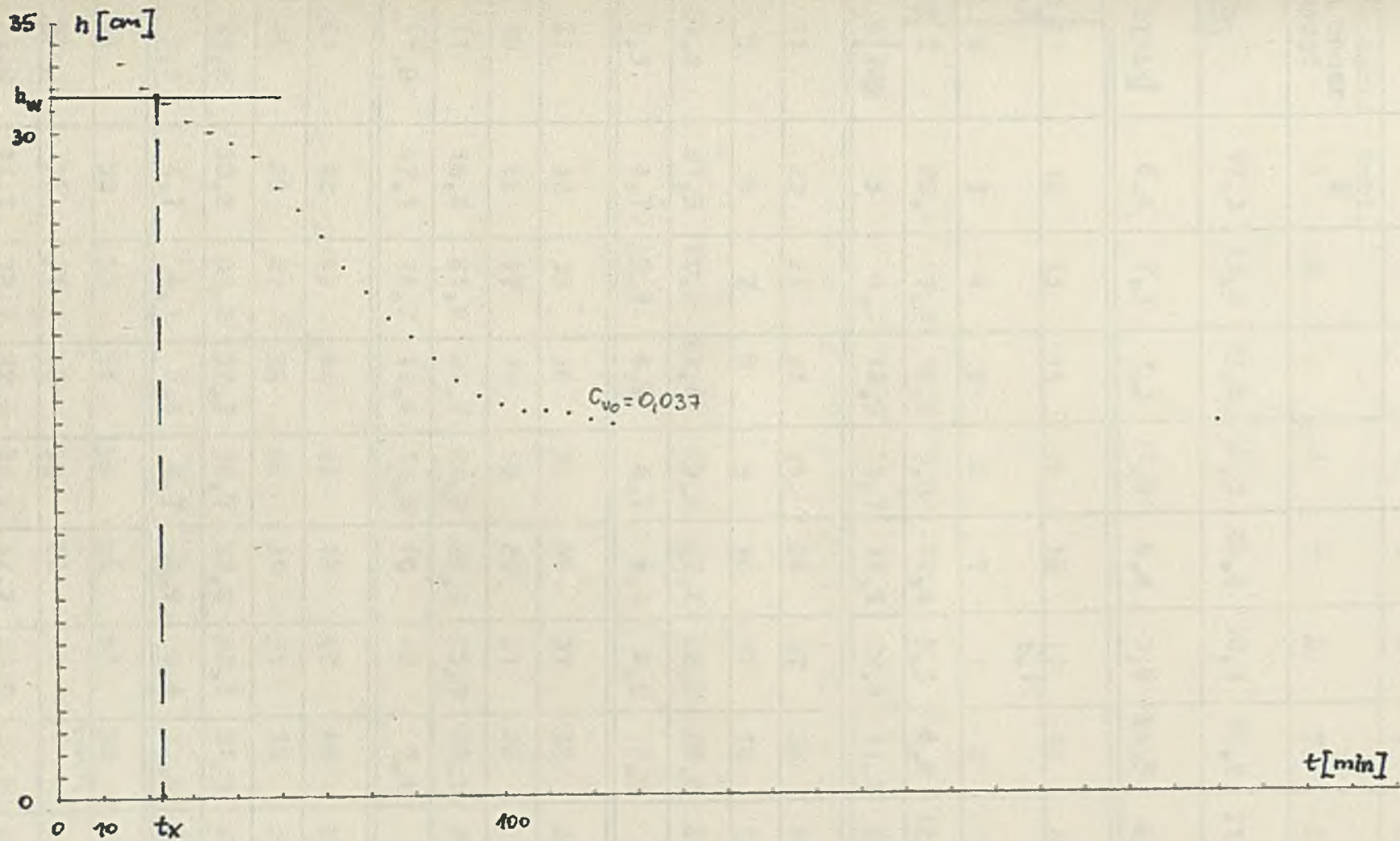
Рис. 31 Кривые седиментации [16]



Rys. 32 Wykresy krzywych sedimentacji dla [38]



Rys. 33 Wykresy krzywych sedymentacji dla [56] krede



Rys. 34 Krzywa osiedlenia dla zawiesiny diesla w wodzie [56]

tabl. 23 Wyniki uzyskane metoda Talmage'a Fitcha.

| Lp | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|-----------------------|------|---------|------|------|------|------|---------------|------|------|------|
| Nr tabl. i obserwacji | | tabl. 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| h ₀ [cm] | | 17,3 | 13,2 | 13,6 | 16,3 | 26,8 | 30,1 | 16,0 | 31,4 | 25,4 |
| t _x [min] | | 6,4 | 7,3 | 7,3 | 11,8 | 6,4 | 3,6 | 54,5 | 6,4 | 20,9 |
| 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
| t. 9 | | | | | | | t. 11 | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 25,2 | 7 | 20,1 | 17,0 | 12,5 | 9,9 | 12,4 | 5,3 | 6,2 | 12,7 | 14,3 |
| 2,6 | 125 | 5 | 8,3 | 12,5 | 16,7 | 12,5 | 12,4 | 11,2 | 8,2 | 7,6 |
| 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | |
| 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | |
| 20,4 | 21,3 | 20,8 | 22,4 | 25,0 | 28,2 | 28,2 | 28,2 | 29,2 | 29,2 | 9,5 |
| 5,3 | 4,7 | 5,3 | 4,7 | 4,7 | 4,1 | 2,9 | 2,9 | 2,4 | 2,4 | 38,8 |
| 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 | 38 | 39 | 40 | |
| 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | |
| 11 | 18,8 | 21,2 | 22,7 | 24,0 | 25,9 | 25,9 | 28,1 | 28,1 | 30,7 | |
| 31,8 | 17,1 | 14,7 | 12,4 | 11,8 | 10 | 10 | 7,1 | 7,1 | 4,7 | |
| 41 | 42 | 43 | 44 | 45 | 46 | 47 | 48 | 49 | 50 | |
| 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | |
| 29,8 | 30,2 | 31,2 | 32,7 | 30,7 | 32,2 | 32,7 | 21,9 | 26,3 | 28,3 | |
| 5,3 | 4,7 | 4,1 | 2,4 | 4,7 | 2,9 | 2,4 | 33,5 | 21,8 | 15,9 | |
| 51 | 52 | 53 | 54 | 55 | 56 | 57 | 58 | 59 | 60 | |
| 35 | 36 | 37 | 38 | 39 | 40 | 41 | tabl. 43 1 | 2 | 3 | |
| 32,0 | 31,3 | 32,7 | 32,0 | 32,3 | 32,7 | 33,0 | 31,6 | 34 | 34 | |
| 7,6 | 9,4 | 5,9 | 7,6 | 6,5 | 5,9 | 4,7 | 25,9 | 10 | 10 | |

| | | |
|------|------|----|
| 61 | 62 | 63 |
| 4 | 5 | 6 |
| 33,2 | 34,5 | 34 |
| 15,3 | 5,9 | 10 |

Wyniki sprawdzenia doświadczalnego powyższej metody zawiera tabl.

24

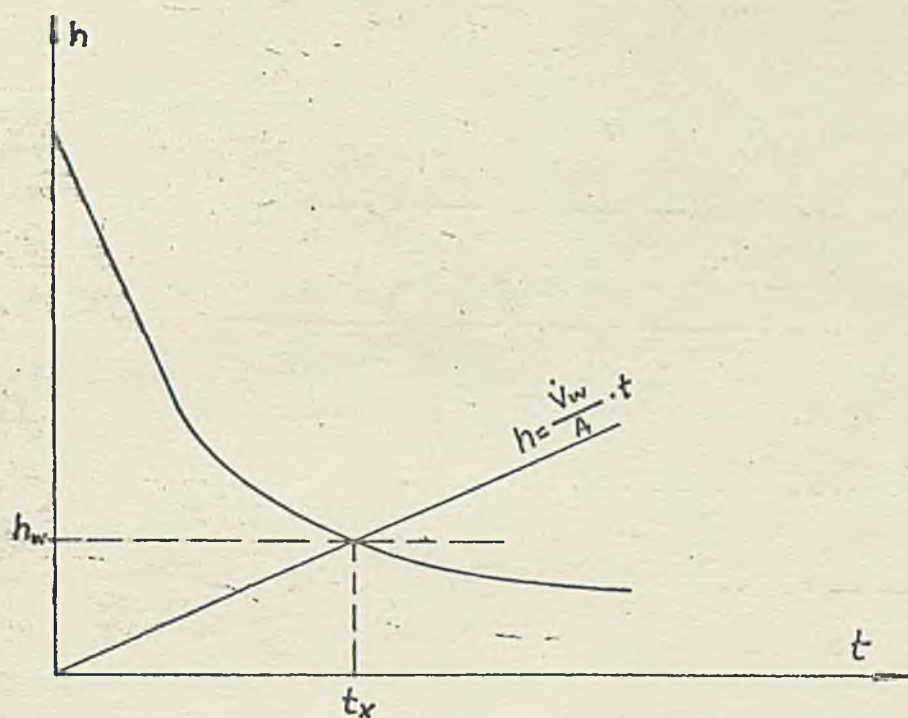
2.2.5 Metoda Merty, Zioly [71-73]

W celu obliczenia powierzchni osadnika należy znaleźć maksimum wprowadzonego przez autorów następującego wyrażenia :

$$A = \frac{\frac{\dot{V} \cdot C_z \cdot v_z}{C_{vw}} - \frac{\dot{V} \cdot z}{h_0} \cdot h/t/}{\frac{d h/t/}{dt}} + \frac{\dot{V} \cdot z}{h_0 \text{ max}}$$

gdzie t i $h/t/$ wyznacza krzywą sedymentacji. Ponieważ powyższa metoda jest bardzo precyzyjna, gdyż wymaga różniczkowania $\frac{dh}{dt}$ wzdłuż całej krzywej sedymentacji, której postać analityczna nie jest znana, autorzy przekształcili ją upraszczając znacznie procedurę. Czas t_x wyznacza punkt przecięcia się krzywej sedymentacji z linią $h_w = \frac{h_0 \cdot C}{C_w}$ lub linią $h/t/ = \frac{w}{A} \cdot t$ /Rys.35/

Metoda powyższa jest interesująca choćby z tego względu, że jej procedura jest jednakowa dla $C \leq C_{kr}$ i $C > C_{kr}$. W zakresie stężeń $C \leq C_{kr}$ tj. rozważonym w niniejszej pracy sprowadza się ona do metody Talmage'a Fitch'a.



Rys. 35 Rozwinięta metoda Merty, Zioly.

2.2.6 Porównanie metod obliczenia powierzchni osymentacji opar-
tych o procedury graficzne.

Porównanie ponizsze oparto na tych samych parametrach jak w rozdziale 2.1. Wzięto pod uwagę dane z tabl. 7, 9, 11, 13, 15 i 21-23. Uzyskane wyniki zamieszczono w tabl. 24. Rezultaty dotyczące metody Coe i Clevengera przepisano z tabl. 19 / tu pozycja 1a/ oraz z tabl. 20 / tu pozycja 1b /. Dodatkowo wykonano sprawdzenie metody Coe Clevengera dla tych samych punktów pomiarowych co dla metody japońskiej /pozycja 1c/

tabl. 24 Porównanie rezultatów metod wykorzystujących procedury graficzne.

| Lp | Metoda | \bar{A} | σ | A_{max} | A_{min} | $\bar{\alpha}$ | n |
|----|--------------------------------------|-----------|----------|-----------|-----------|----------------|----|
| 1. | Coe Clevenger'a a/ | 0,7622 | 0,3993 | 2,4983 | 0,1591 | 1,580 | 82 |
| | b/ | 0,8326 | 0,5007 | 3,2839 | 0,1591 | 1,548 | 82 |
| | c/ | 0,9106 | 0,2508 | 1,4598 | 0,6177 | 1,162 | 26 |
| 2. | japońska | 0,9043 | 0,2427 | 1,4378 | 0,6282 | 1,165 | 26 |
| 3. | Kyncha | 0,6649 | 0,5359 | 1,2837 | 0,2409 | 2,069 | 6 |
| 4. | Talmege s Fitcha /Werty Zięły/ | 0,8074 | 0,4953 | 3,2773 | 0,1879 | 1,550 | 63 |

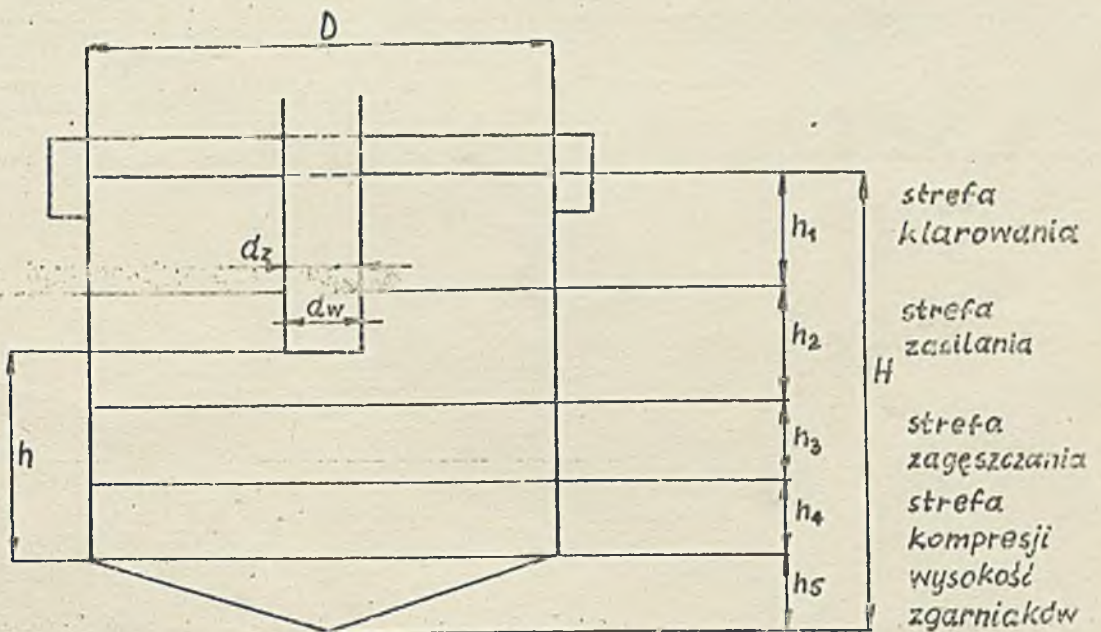
Na podstawie przedstawionych powyżej danych można spróbować wytłumaczyć przyczyny stosunkowo dużego rozrzutu σ zawręto w metodach rachunkowych jak i tzw. graficznych. Zasadnicze, to prace osadnika przy niecałkowitym wykorzystaniu powierzchni osyimentacji.

Wyeliminowanie tego powodu jak w metodzie japońskiej daje radykalną poprawę σ . Z kolei metoda ta eliminuje z rozważań ok. 60% realnie istniejących stanów stacjonarnych pracy osadnika. Należy zauważyć, że punkty doświadczalne, dla których można było zastosować metodę japońską, odpowiadają liniom, na wykresie Coe Clevengera, dla których minimum globalne występuje wewnątrz przedziału stężeń

$/C_{vz}, C_{vz}/$.

3. Wysokość osadnika.

Każdy pracujący osadnik ciągły wymaga do realizacji zachodzących w nim procesów odpowiedniej powierzchni i wysokości. O ile powierzchnię operatu wyznacza proces najwolniejszy, to wysokość musi być sumą wysokości poszczególnych stref aktualnie występujących w operacie oraz zawierać pewną rezerwę umożliwiającą elastyczną pracę urządzenia w razie wystąpienia zakłóceń. Na Rys. 36 przedstawiono schemat rozkładu stref w osadniku.



Rys. 36 Schemat rozkładu stref w osadniku.

Należy podkreślić, że w operacie pracującym w instalacji przemysłowej strefy przedstawione na powyższym rysunku mogą wytworzyć w innych proporcjach bądź nie wszystkie na raz.

Z rozważań teoretycznych Campa [1] czy Macheja [74] wynika, że dla idealnej zawiesziny w idealnym operacie wysokość strefy zagęszczenia nie ma wpływu na powierzchnię sedimentacji.

Natomiast wysokość strefy kompresji jest bardzo istotnym parametrem wpływającym na stężenie wylotowe / o ile ma być ono większe od stężenia punktu krytycznego / [4,71]

Zgodnie ze wstępem poniższe propozycje /tabl.25/ dotyczą przypadków gdy dla danych zawieszin zachodzi opóźnienie skrepowane z granicą metności. Część z nich oparta jest o doświadczenia ruchowe, część o rozważania teoretyczne, reszta o analizę podobieństwa i doświadczenia modelowe.

tabl. 25 Zestawienie wzorów na wysokość osadnika radialnego.

| No. | Wzór | Uwagi | Autor i źródło |
|-----|--|--|-----------------------------|
| 5.1 | $H = h_1 + h_4 + h_5 + h_6$ | $h_1 = 0,3-0,9$ m $h_5 = 0,3-0,6$ m $h_6 = 0,3-0,6$ m - w celu pokrycia przerw lub nierównomierności ze i rozładunku | Brown [9] [73] |
| 5.2 | $H = h_1' + h_2' + h_5$ | $h_1' = 0,45-0,75$ m - wysokość strefy opadania swobodnego $h_2' = \frac{R}{q}$, q średnie stężenie szlamu - h_5 - wysokość strefy szlamu | Pikoń [80] |
| 5.3 | $H = h_1' + h_2' + h_5'$ | $h_1' = 0,45-0,75$ - strefa op. swobodnego $h_2' = \frac{V}{A} \cdot \frac{t_x}{w} \cdot \frac{x}{z}$ - strefa zagęszczenia $h_5' = 0,146 \cdot \frac{D}{Z}$ - strefa szlamu | Bryszewski Firewicz [79] |
| 5.4 | $h_4 = \frac{\dot{G}}{A} / t_x - t_{kr} / \left(\frac{m_{kr} + m_w}{2} \rho_c + \frac{1}{\rho_s} \right)$ | $m = \frac{1}{x}$ | Dattaglia Taggart [14] |

25.5

$$H = K_1 \cdot \frac{V_c}{A} + K_2$$

$$K_1 = 1,75 \text{ m} \quad K_2 = 1,5-3 \text{ m}$$

$$V_c = \frac{\dot{V}_{z_{12}}}{\rho_B} / t_x - t_{kr} / + \frac{\dot{V}_{z_{12}}}{\rho_c} \int_{t_{kr}}^x \frac{m_c}{m_B} dt$$

Merts Ziolo [71]

25.5a

m_c - masa cieczy w strefie kompresji

m_B - masa ciała stałego w "

$$V_c = \frac{V_B}{h_0} / 2 \int_{t_{kr}}^x h dt + h_{kr} t_{kr} - h_x t_x /$$

25.6

$$h = d \cdot 0,572 \operatorname{Re}^a \left(\frac{H}{d} \right)^{-1,431} \left(\frac{h}{d} \right)^{2,341}$$

h - wysokość strefy zawirowań
osadnik z tarczą odbijającą

$$a = 0,180 \left(\frac{h}{H} \right)^{-0,675}$$

Niemiec [77]

$$h = d \cdot 0,987 \operatorname{Re}^a \left(\frac{H}{d} \right)^{-1,924} \left(\frac{h}{d} \right)^{2,487}$$

osadnik bez tarczy odbijającej

$$a = 0,194 \left(\frac{h}{H} \right)^{-0,675}$$

25.7

$$\frac{h}{d} = C_1 \left[\operatorname{Re}^{C_2} \cdot a \left(\frac{H}{d} \right)^{C_3} \left(\frac{h}{d} \right)^{C_4} \left(\frac{\eta}{\gamma_w} \right)^{C_5} \left(\frac{D}{d} \right)^{C_6} \right]^{0,15}$$

h - wysokość strefy zawirowań
osadnik z tarczą odbijającą

$$C_1 = 3,274, C_2 = 0,067, C_3 = -0,092$$

$$C_4 = 0,1417, C_5 = -0,0053, C_6 = -0,024$$

Kochaj, Pieg,
Wójcik [77]

| Lp | Wzór | Uwagi | Autor i źródło |
|--------------|---|---|----------------------------------|
| 25.7 o.d. | $\frac{h}{d} = C_1 \left[Re^{C_2 \cdot a} \left(\frac{H}{d}\right)^{C_3} \left(\frac{h}{d}\right)^{C_4} \left(\frac{\eta}{\eta_w}\right)^{C_5} \left(\frac{D}{d}\right)^{C_6} \right]^{\frac{H}{d}}$ | $a = 0,0277 \left(\frac{v}{v_0}\right)^{-0,529} \left(\frac{\eta}{\eta_w}\right)^{0,156}$ <p>v_0 - objętość jednostkowa</p> $v = \frac{\pi D^2}{4} \cdot n \quad Re = \frac{4 \dot{V}_z \rho}{\pi d \eta}$ <p>osadnik bez tarczy odbijającej</p> <p>$C_1 = 1,003, C_2 = 0,0679, C_3 = -0,5182$ $C_4 = 0,1567, C_5 = -0,0081, C_6 = 0,3536$</p> | |
| 25.8 | $\frac{h}{d_e} = A_1 Re_z^{B_1} Re_p^{C_1 + A_2 Re_z^{B_2}} \left(\frac{h}{d_e}\right)^{D_2}$ | <p>h - wysokość granicy mytności</p> $Re_z = \frac{4 \dot{V}_z \rho}{\pi d \eta} \quad , \quad Re_p = \frac{4 \dot{V}_p \rho}{\pi (d_2 + D) \eta_c}$ <p>$d_e = D - d_z, \quad \frac{D}{d} = 11 \pm 1,8$</p> <p>$A_1 = 7,763 \cdot 10^{-4}, B_1 = 0,8404$ $C_1 = 7,973 \cdot 10^{-2}, D_1 = 1,369$ $A_2 = 0,09, B_2 = 0,10, D_2 = 0,06$</p> | <p>Kreft, Piekarski [56]</p> |

Jak widać z powyższej tabeli wzory 25.1-25.5 mają charakter orientacyjny. Wzory 25.6-25.8 pochodzą z badań cieczy czystych, stąd powinny dawać wyniki bezpieczne.

Obecnie najbardziej godnym polecenia spośród przedstawionych powyżej wydaje się wzór 25.8, gdyż oparty jest o analizę podobieństwa i badania modelowe oraz był sprawdzony dla zawieszin [56] .

Bardzo ważnym problemem wymagającym dalszych badań, jest rozwiązanie hydrauliki zasilania [75-78] . otrzymanych do tej pory rezultatów wynika, że najkorzystniejszym umiejscowieniem zasilania jest położenie centralne w aparacie, a optymalny stosunek średnicy osadnika do średnicy rury zasilającej równy jest $\frac{D}{d} = 11$.

W niniejszej pracy proponuje się następujący tok obliczeń wysokości osadnika :

1/Obliczyć powierzchnię sedymentacji

2/przyjąć $\frac{D}{d}$ ($\frac{D}{d} = 11$)

3/Z bilansu masyowego obliczyć wartości Re_z i Re_p

4/Zakładając wysokość wylotu rury centralnej h

5/Ze wzoru 25.8 obliczyć wysokość granicy mętności h'

6/Punkt 4 i 5 powtarzać tak długo dopóki $h' < h$

7/Zakładając wysokość strefy klarowania / z propozycji Browna [9]

$$h_1 = 0,3 - 0,9 \text{ m/}$$

8/Wysokość mieszadła h_2 obliczyć ze wzoru $h_2 = 0,146 \cdot \frac{D}{2}$

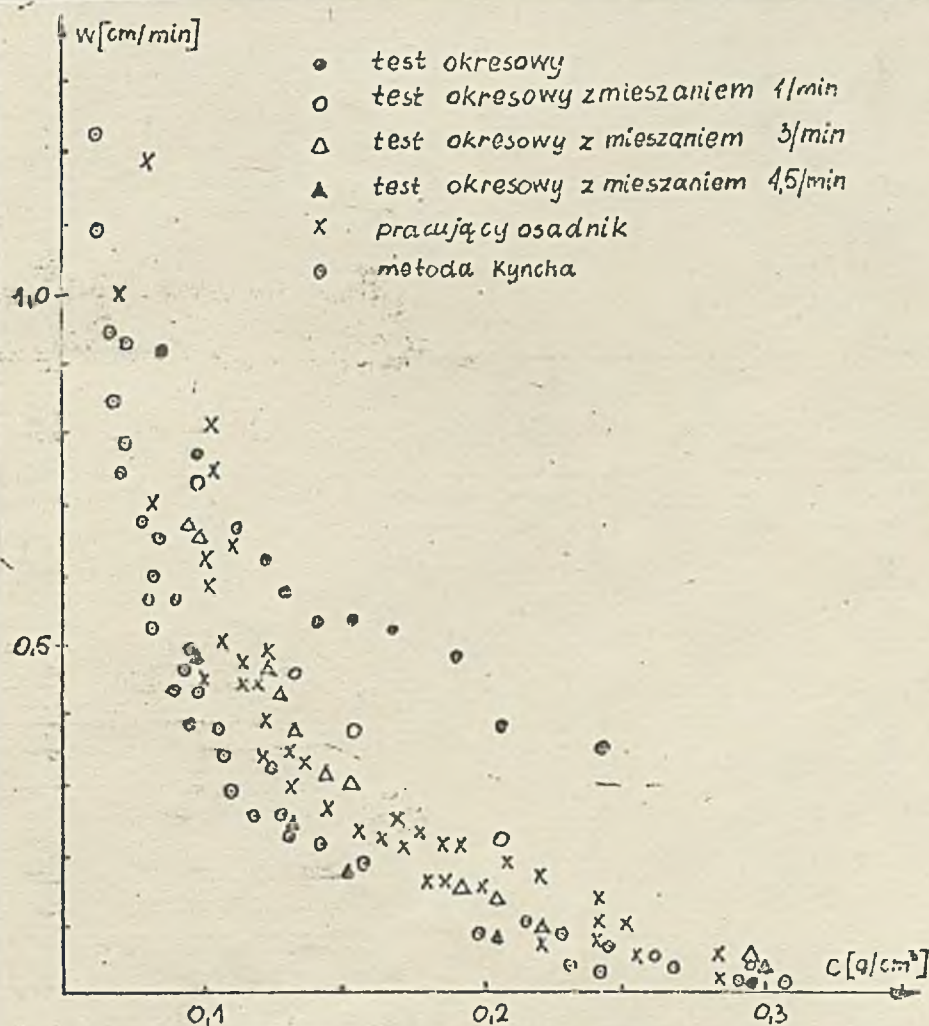
9/Całkowita wysokość osadnika jest równa $H = h' + h_1 + h_2$

4. Uwagi własne do projektowania osadników .

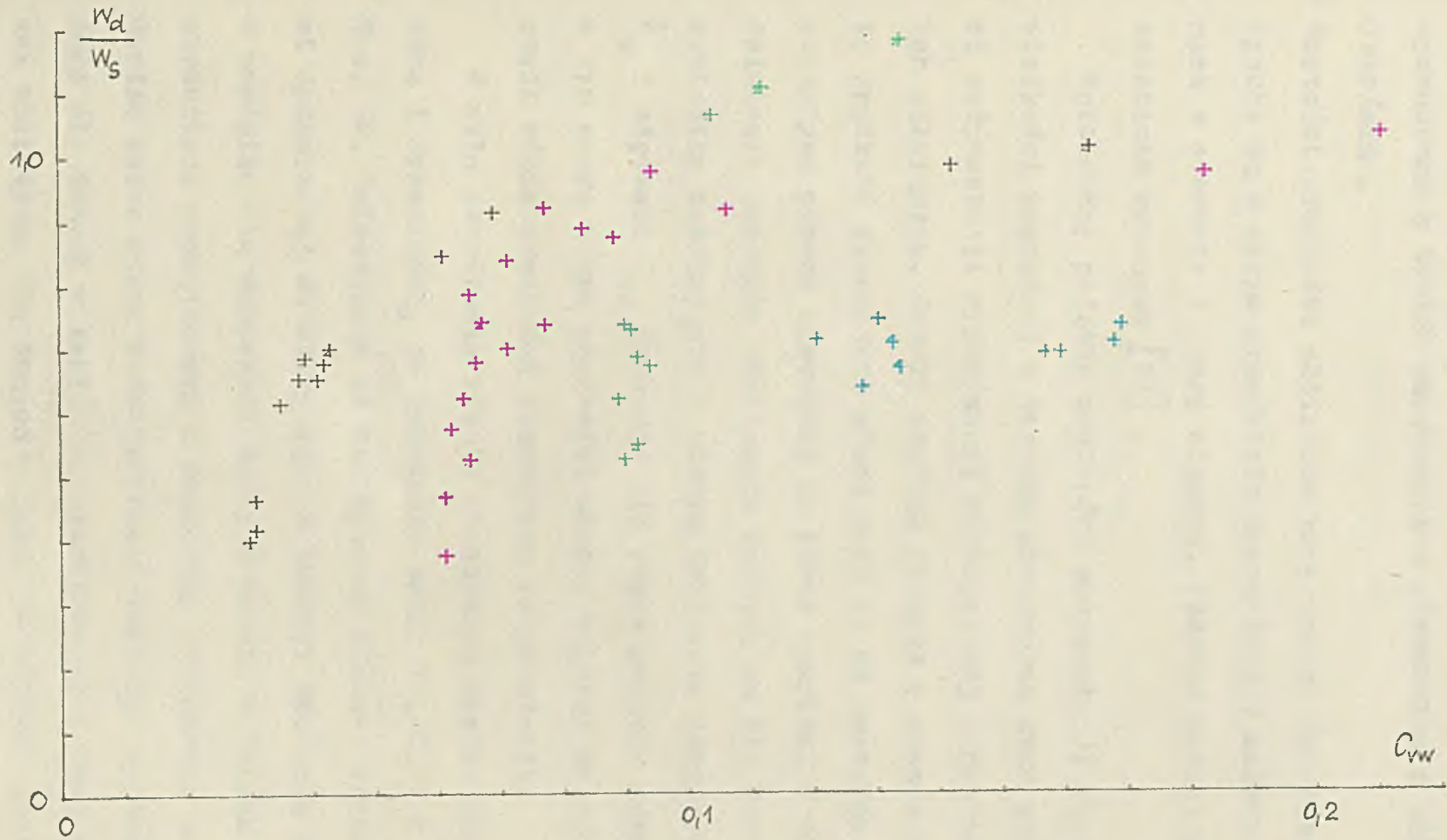
W celu obliczenia wartości pola powierzchni osadnika, w zakresie stężeń opadania skrapowanego, należy do wzoru 6.1 /tabl.6/ podstawić prędkość sedymentacji. Jeśli prawdziwe jest stwierdzenie, że parametr ten dla konkretnej zawiesiny zależy tylko od stężenia, to podstawianie do cytowanego wzoru wyników testów okresowych powinno dać dobre rezultaty. Jednak wyniki sprawdzenia doświadczalnego metod obliczenia powierzchni /rozdział 2/ sugerują naszym zdaniem istnienie innych wpływów na prędkość opadania.

Bardzo interesujące badania w tej dziedzinie przeprowadził Scott. [21] dla zawiesin pirofilitu. Porównał on wyniki testów okresowych z mieszaniem i bez mieszania, z wartościami otrzymanymi graficzną metodą Kyncha, i wynikami uzyskanymi dla pracującego osadnika ciągłego. Otrzymane przez autora rezultaty przedstawia

Rys. 37.



Rys.37. Prędkości sedymentacji zawiesin pirofilitu



Rys. 38 Wykres $\frac{W_d}{W_s}$ w funkcji stopnia wylewu

Z analizy tego rysunku wynika :

- 1/ Najbliższe prędkości występującej w osadniku jest prędkość wyznaczona z testów okresowych z mieszaniem z szybkością 3obr/min .
- 2/ Wartości prędkości obliczone przy pomocy graficznej metody kynchą są w całym przedziale koncentracji niższe od wyznaczonych w aparacie o pracy ciągłej. Podobne wyniki uzyskano w badaniach własnych [41] .

Wprowadźmy pojęcie prędkości sedymentacji statycznej jako wielkości mierzonej w testach okresowych oraz pojęcie prędkości sedymentacji dynamicznej występującej w osadniku ciągłym lub półciągłym. Jeżeli osadnik pracuje w stanie ustalonym, to prędkość dynamiczna równa jest co do wartości prędkości przepływu cieczy klarownej ku górze aparatu. Z obserwacji działania osadnika modelowego wynika, że dla konkretnej zawiesiny zasilającej o stałym natężeniu przepływu zasilania \dot{V}_z i stężeniu C_{vz} uzyskuje się różne poziomy granicy mętności a tym samym różne prędkości cieczy czystej ku górze aparatu czyli różne prędkości dynamiczne sedymentacji.

W celu określenia różnic liczbowych między prędkością statyczną i dynamiczną, na podstawie tabl. 11, 12, 15 i 16 wykonano Rys. 38. Umieszczone na nim wykresy śladowe stosunku prędkości dynamicznej do statycznej w funkcji stężenia na wylewie z osadnika dla suspensji kredy w wodzie o trzech różnych stężeniach początkowych i zawiesiny krzemionki w wodzie. Bardzo łatwo można zidentyfikować wartości stężenia początkowego dla danych z tabl. 11, przedłużając wykres w kierunku osi odciętych. Dla danych z tabl. 15 /Scott/ jest to ^{nie} możliwe z uwagi na zbyt mały zakres stężeń wylotowych.

Bardzo interesującym zjawiskiem zaobserwowanym podczas analizy Rys. 38 jest to, że prędkość dynamiczna może być większa od statycznej. Stwierdzenie to jest zgodne z wnioskiem wyolimpiętnym przez Scotta z analizy Rys. 37.

4.1 Propozycja algorytmu projektowania osadników.

Do obliczenia powierzchni sedimentacji najczęściej używa się jednej z metod rachunkowych opisanych w rozdziale 2.1 niniejszej pracy, wykorzystując zwykle wartości prędkości opadania uzyskane z pomiarów krzywej sedimentacji. Najszym zadaniem właściwym jest zastosowanie w tym przypadku metody japońskiej /rozdział 2.2.2/, która mimo korzystania z prędkości statycznej w pewien sposób śledzi dynamikę procesu, określając dopuszczalne obciążenie jednostki powierzchni opadania $G_v \max$. Jeżeli projektant ma do dyspozycji modelową instalację doświadczalną, a istnieje potrzeba uzyskania dużej dokładności wyników, wtedy w niniejszej pracy zaleca się wykorzystanie do projektowania omówionego w rozdziale 4 pojęcia dynamicznej prędkości sedimentacji.

4.1.1 Wstępne stadium projektowania /tzw.koncepcja/.

W projektowaniu można wyróżnić szereg etapów. Stadium koncepcji to etap wstępny, podczas którego odbywa się wybór typu aparatu do danej technologii oraz oszacowanie jego wymiarów. Dla tej części procesu projektowania w niniejszej pracy zaleca się następujący przybliżony sposób postępowania :

- 1/ Na podstawie danych doświadczalnych uzyskanych z pomiarów w rurze sedimentacyjnej lub metodą graficzną Kynch'a bądź też ze wzoru /65/ określić funkcję $w=w/C_v/$

2/ Wykreślić wykres $\dot{S}'_v = w \cdot C_v$ /jak na Rys.25-29/

3/ W zależności od zadanych parametrów projektowych zawieszony metodą japońską określić g_v i obliczyć powierzchnię

$$A = K_1 \frac{\dot{V} C}{E \cdot v_z} \quad \text{oraz} \quad A = K_2 \frac{\dot{V} E}{w \cdot C \cdot v_z} \cdot \frac{C_{vw} - C_{vz}}{C_{vw} - C_{vp}}$$

$$/K_1 = 1,3, K_2 = 1,6 /$$

Jako powierzchnię aparatu wybrać wartość A większą

4/ Wysokość osadnika obliczyć jak podano w rozdziale 3

Sposób powyższy ma tę zaletę, że już na wstępie procesu projektowania pozwala zorientować się w zakresie stężeń i obciążen aparatu, a otrzymany wynik jest dość dokładny.

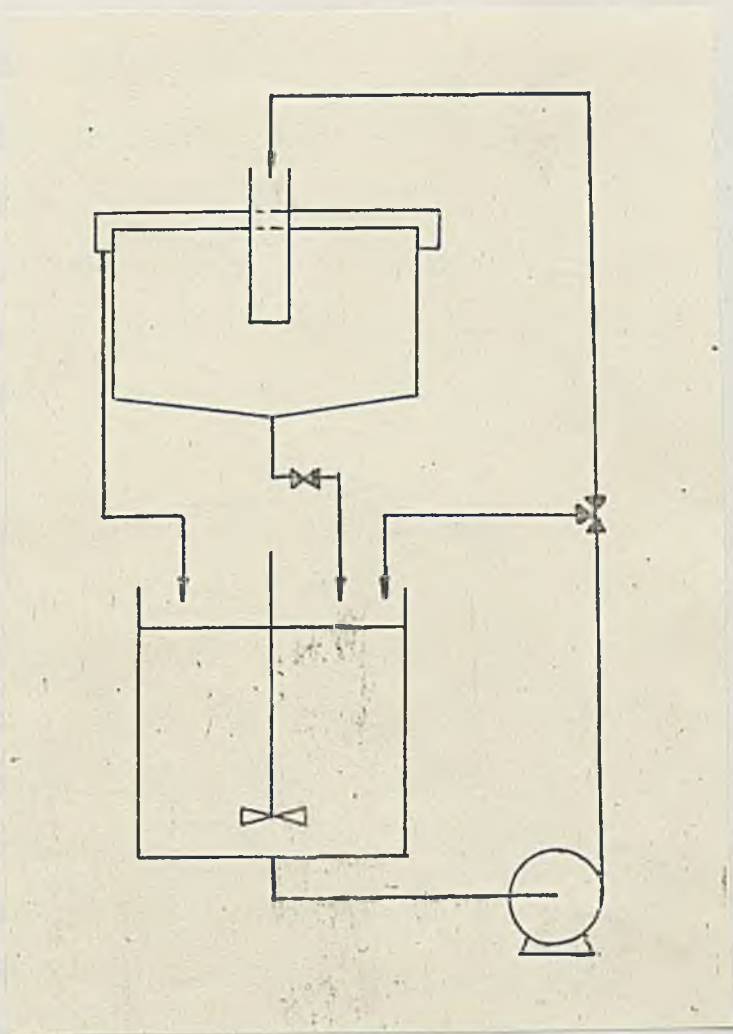
4.1.2 Etap założeń techniczno-ekonomicznych /ZTE/.

W tym stadium procesu projektowania min. określa się dokładnie wymiary aparatów, tak aby konstruktorzy mogli dokonać obliczeń wytrzymałościowych i aby mógł powstać rysunek ofertowy urządzenia.

Dla tego etapu procesu projektowania w niniejszej pracy zaleca się następujący sposób postępowania :

- 1/ Na instalacji laboratoryjnej jak na Rys.39 wykonać pomiary dynamicznej prędkości sedymentacji dla warunków podobnych jak w projektowanym aparacie tzn. w przedziale stężeń zawierającym stężenie robocze. Pomiarów należy dokonywać w stanie ustalonym /stałe natężenie przepływu i poziom granicy metności/. Każdy punkt pomiarowy należy zweryfikować poprzez bilans masowy. W razie niezgodności większej niż 10 % pomiar należy powtórzyć.

2



Rys. 39 Schemat instalacji pomiarowej.

2/ Z otrzymanych wyników pomiarowych wykonać wykres śladowy prędkości dynamicznej $w_d = \frac{\dot{V}}{A_{lab}}$ w funkcji stężenia wylewu dla ustalonego stężenia wlotowego. Wykres ten będzie miał ten sam charakter co Rys. 38. Z wykresu odczytać szukaną wartość prędkości.

3/ Powierzchnię osadnika obliczyć ze wzoru

$$A = 1,6 \frac{\dot{V} / C_{wz} - C_{wp} / C_{wp}}{w_d / C_{wz} - C_{wp} / C_{wp}}$$

4/ Wysokość aparatu wyznaczyć jak w rozdziale 3.

5. Podsumowanie i wnioski

W niniejszej pracy przedstawiono analizę metod projektowania osadników radialnych dla zawiesin polidispersyjnych o stężeniu zapewniającym opadanie skrępowane z granicą mętności.

Problem powyższy wiąże się z następującymi wielkościami projektowymi: prędkością sedymentacji, powierzchnią i wysokością aparatu.

W związku z tym sacytowano znane ujęcia matematyczne opisujące prędkość opadania skrępowanego i opatrzone je własnymi uwagami krytycznymi w oparciu o obliczenia porównawcze. Wyproszdzono przy pomocy wartości średnich parametrów rozkładu ziarnowego, oryginalny opis matematyczny prędkości sedymentacji skrępowanej.

Z przeprowadzonego sprawdzenia doświadczalnego wynika, że spośród przedstawionych ujęć własne w powiązeniu z równaniem Cermena-Kezény dają wyniki najbliższe rzeczywistości.

W oparciu o dane eksperymentalne, metodą najmniejszych kwadratów otrzymano korelację stałej Cermena K^0 w funkcji udziału objętościowego ciała stałego C_v i modułu $\frac{\eta}{\rho \cdot l}$. Otrzymany wzór na prędkość sedymentacji dobrze opisuje wpływ na tę wielkość parametrów składu ziarnowego i innych własności zawiesiny.

Odniesione również wpływ średnicy i wysokości urządzenia na prędkość opadania.

Rozważono bilans masy osadnika ciągłego i na jego podstawie przedstawiono uzasadnione teoretycznie wzory na obliczenie powierzchni aparatu. Z dwudziestu wymienionych w literaturze wzorów, po uporządkowaniu i wstępnej analizie, sześć poddano sprawdzeniu doświadczalnemu w oparciu o dane bilansowe i kinetyczne pracujących w sposób ciągły osadników promieniowych. Okazuje się,

że wzór klasyczny
$$A = K \frac{V}{w} \frac{C_{vw} - C_{vz}}{C_{vs} - C_{vp}}$$
 ze stałą $K=1,558 /$

jest najbardziej godny polecenia.

Przedstawiono również i sprawdzono eksperymentalnie metody wykorzystujące procedury graficzne do określenia powierzchni sedymentacji. Spośród nich godna polecenia do projektowania wydaje się metoda japońska jako względnie dokładna i dająca wstępne rozpoznanie w obzaryze stężeń roboczych, prędkości sedymentacji i jednoatkowego obciążenia powierzchni osadzenia.

Natomiast w dziedzinie określenia wysokości osadników należy prowadzić dalsze badania, szczególnie nad warunkami hydrodynamicznymi w strefie osadzenia, gdyż dostępne wzory do obliczeń wysokości poszczególnych stref są niestety tylko szacunkowe. Do czasu wprowadzenia dokładniejszego sposobu obliczania tego parametru, można korzystać z przedstawionej w niniejszej pracy metody przybliżonej.

Dla wstępnego etapu projektowania przedstawiono przybliżony sposób określenia gabarytów osadnika.

Na etapie zakoch techniczno-ekonomicznych, gdy wymagane wyniki powinny być dokładne, poleca się wykorzystanie do obliczeń wprowadzonego w niniejszej pracy pojęcia dynamicznej prędkości sedymentacji, która jest funkcją warunków panujących w osadniku ciągłym. Można ją otrzymać na bazie pomiarów na instalacji laboratoryjnej.

Z całokształtu przeprowadzonych rozważań, obliczeń i doświadczeń nasuwają się następujące oprócz wymienionych powyżej uwagi :

- 1/ W celu określenia funkcji prędkości opadania od stężenia zawiesiny dla układów nieflokulujących można stosować graficzną metodę Kyncha również do zawiesin polidyspersyjnych w takim zakresie stężeń jaki wynika z metody zaproponowanej w niniejszej pracy.

- 2/ Należy prowadzić dalsze badania nad zastosowaniem teorii zjawisk stochastycznych do sedymentacji.
- 3/ Dalszej analizie wymaga wpływ średnicy speratu na prędkość sedymentacji
- 4/ Trzeba kontynuować rozważania nad następującym problemem : dlaczego wyprowadzony bez uproszczeń wzór Coe i Clevengera daje gorsze wyniki od wzoru uproszczonego,
- 5/ Należy prowadzić próby matematycznego wyprowadzenia metody japońskiej.
- 6/ Dalszych badań i analiz wymaga problem przenoszenia skali od osadników modelowych do urządzeń przemysłowych.

Należy sądzić, że powyższe prace spełniła założone na wstępie zadanie podsumowania obecnego stanu wiedzy w dziedzinie projektowania osadników radialnych dla zawiesin polidispersyjnych o stężeniach, w których występuje opadanie skrępowane z granicą mętności oraz określiła konieczne kierunki dalszych badań w tej dziedzinie.

Literatura

- [1] E.B.Fitch - "Solid / Liquid Separation Equipment Scale Up Chpt.4 Gravity Separation Equipment, Clarification and Thickening" Edited by D.B. Furches Uplands Press LTD 1977
- [2] S.Mirza J.P.Richardson - "Sedimentation of Particles of Two or More Sizes" Chem.Eng.Sci. Vol 34 /1979/ 447-454
- [3] K.Maczej - "Ocena metod określenia prędkości sedymentacji skropowanej" Inż.Chem. IV,4,641-651 /1974/
- [4] R.Koch - "Procesy mechaniczne w inżynierii chemicznej" Wyd.III Wrocław 1984
- [5] H.Brauer - "Grundlagen der Einphasen - und Mehrphasenströmungen" Verlag Sauerländer Aarau 1971
- [6] L.Frandtl - "Dynamika przepływów" PWT Warszawa 1956
- [7] M.Zoog - "Neue Berechnungsunterlagen für die Sedimentation Kugelförmiger Teilchen" Chemische Rundschau, Sonderheft 1975,43-49
- [8] P.Grossmann "Physikalische Grundlagen der Verfahrenstechnik " Verlag Sauerländer Aarau und Frankfurt am Main 1970
- [9] G.G.Brown - "Operacje jednostkowe" PWT Warszawa 1960
- [10] K.Serwiński - "Zasady inżynierii chemicznej i procesowej" PWT Warszawa 1982
- [11] G.J.Kynch - "A theory of sedimentation" Trans. Faraday Soc. 1952, 48, 165-176
- [12] M.W. Djemurs - "Projektowanie tonkostajnych osadników" Kijew Budiwjalnik 1981
- [13] J.M.Coulson J.P.Richardson - "Chemical Engineering" Vol 2 Wys.III Pergamon Press London 1978

- [14] A. Battaglin "Odwadnianie produktów wzbogacania i obiegi wodne płuczek" #GH Katowice 1963 Wyd. II
- [15] H.S.Coe G.H.Clevenger - "Methods of Determining the Capacities of Slime-Settling Tanks" Trans AIME 55 /1915/ 356-384
- [16] A. Kupka W. Nowak - "Badanie sedymentacji w osadnikach : okresowym, półciągłym i ciągłym" Prace dypl. magisterskie Inst. Inż. Chem. i Bud. Apar. Pol. Śl. Gliwice 1963
- [17] F. Gierczyk A. Szczepański - "Wpływ składu ziarnowego i stężenia ciała stałego na przebieg sedymentacji" Prace dypl. magisterskie. Katedra Inż. i Bud. Apar. Chem. Politech. Śl. 1971
- [18] J.F. Richardson F.A. Shabi - "The Determination of Concentration Distribution in a Sedimentating Suspensions Using Radioactive Solids" Trans. Inst. Chem. Engrs. Vol 38, 1960, 33-42
- [19] J. Gwajns - "Analiza próbek kredy mielonej na mikroskopie skaningowym" Sprawozdanie Instytutu Inżynierii Materiałowej Politechniki Śląskiej Katowice 1984
- [20] R. Koch - "Procesy mechaniczne w inżynierii chemicznej" Wrocław 1979
- [21] N. Ioshioka I. Hotta, S. Iwano, S. Houto, S. Tsugami - "Continuous Thickening of Homogenous Flocculated Slurries" Kagaku Kagaku 21, 2/1957/ 66-74
- [22] L.G. Eklund - "The working conditions in a continuous pilot thickener at optimal load" Chem. Eng. Sci. 1976 Vol 31, 881-891

- [23] F.H. Tiller - "Revision of Kynch Sedimentation Theory" AIChE Journal Vol 27 No 5 1981, 823-829
- [24] R. Aris N.R. Amundson "Mathematical Methods in Chemical Engineering" Prentice-Hall INC. N.J. 1973
- [25] G. Iordache, J. Corbu - "A Stochastic approach of sedimentation" Chem. Eng. Sci Vol 41, No 10, 2589-2593, 1986
- [26] J. Ciborowski - "Inżynieria Chemiczna" PWT Warszawa 1952
- [27] R. John - "Einfluss der Konzentration einer monodispersen Suspension auf die Sinkgeschwindigkeit ihrer Teilchen" Chemie-Ing. Techn 38 Jahrg. 1966 Heft 4, 428-430
- [28] H. Barford - "Concentration Dependence of Sedimentation Rate of Particles in Dilute Suspensions" Powder Technology 6 /1972/ 39-43
- [29] J. Happel, H. Brenner - "Low Reynolds Number Hydrodynamics" Prentice - Hall Englewood Cliffs N.J. 1965
- [30] K.J. Scott - "Mathematical Models of Mechanism of Thickening" I BC Fund Vol 5 No 1, 1966, 109-113
- [31] P. Smolarek - "Porównanie różnych opisujących szybkość sedymentacji z geometryczną metodą Coultersona Richardsona". Zesr. Nauk. Pol. Śl. Chemia z 63, 1973 61-69
- [32] P.T. Shannon, E. Stroupe, E.E. Tory - "Batch and Continuous Thickening" I BC Fund Vol 2, No 3 1963
- [33] R. Pawełczyk - "Powierzchnie międzyfazowe przy barbotażu przez poziomą, podłużną szczelinę" Praca doktorska Zakład Inżynierii Chemicznej i Konstrukcji Aparatury PAN Gliwice 1969
- [34] K. Machej, P. Smolarek - "Urządzenie do badania sedymentacji i opracowywanie wyników pomiarowych" Inż.

- [35] M. Szubaka, A. Flisak - "Badanie sedymentacji przy ciągłym dopływie zawiesiny dla różnych wysokości naczyń sedymentacyjnych" Praca dypl. magisterska Inst. Inż. Chem. i Bud. Apar. Pol. Śl. Gliwice 1972
- [36] M. Gielmund, Z. Tomaszak - "Badanie pozornej krzywej opadania dla sedymentacji półciągłej. Praca dypl. magisterska Inst. Inż. Chem. i Bud. Ap. Pol. Śl. Gliwice 1973
- [37] J. Izwoźniak, I. Frocobiś - "Wpływ utępienia i składu ziarnowego fazy stałej na prędkość opadania" Praca dypl. magisterska Inst. Inż. Chem. i Bud. Ap. Pol. Śl. Gliwice 1982
- [38] B. Szaldyś, J. Martini - "Badanie sedymentacji w osadnikach okresowym i ciągłym" Praca dypl. magisterska Inst. Inż. Chem. i Bud. Ap. Pol. Śl. Gliwice 1984
- [39] J. Scheffer - Informacja osobista Regensburg 1985
- [40] A. Bartkowska - "Sprawdzenie teorii Kynch'a dla zawiesin polidyspersyjnych" Praca dypl. mag. Inst. Inż. Chem. i Bud. Ap. Politechniki Śląskiej Gliwice 1984
- [41] K. Machaj, J. Wójcik - "Prędkość opadania skrópowanego w zawiesinie polidyspersyjnej" II Ogólnopolskie Seminarium nt.: "Rozdzielanie zawiesin ciał stałych w płynach" rad. Warszawa 1984
- [42] K. Machaj, J. Wójcik - "Zastosowanie metody Kynch'a dla zawiesin polidyspersyjnych" Referat XII Ogólnopolska Konferencja Inżynierii Chemicznej i Procesowej, Poznań 1986

- [43] Z. Kohnen, S. Szaferczyński - "Badanie metodą izotopową procesu sedymentacji periodycznej" Inż. i Apar. Chem. Nr 4/1975, 8 - 12
- [44] A. Górnik, J. Wójcik - "Określenie średnicy zastępczej przy opadaniu skrępowanych i badanie dokładności" ansliwy ziarnowej" Praca dypl. magisterskie Inst. Inż. Chem. i Bud. Ap. Pol. Śl. G-ce 1978
- [45] Autoren Kollektiv - "Lehrbuch der Chemischen Verfahrenstechnik Leipzig 1969
- [46] H. Felice - "Ansliwa równań oporów przepływu przez wypełnienie porowate w ruchu laminarym" Inż. Chem. III, 4, 757-783 1973
- [47] H. Rumpf A. R. Gupte - "Einflüsse der Porosität und Korngrößenverteilung im Widerstandsgesetz der Porenströmung" Chemie-Ing. Techn 43 Jahrg. 1971/nr6 367-375
- [48] H. Rumpf - "Mechanische Verfahrenstechnik" Carl Hanser Ver München Wien 1975
- [49] O. Molerus, W. H. Pehl, H. Rumpf - "Die Porositätsfunktion in empirischen Gleichungen für den Durchströmungswiderstand im Bereich $Re \leq 1$ " Chemie. Ing. Techn. 43 Jahrg 1971/Nr 6 376-378
- [50] K. Wachej - "Wybrane metody matematyczne opracowanie wyników doświadczalnych w inżynierii chemicznej. Zakład Inż. Chem. i Konstr. Apar. PAN Gliwice 1965
- [51] P. A. Vesilind - "Treatment and Disposal of Wastewater sludges" Ann Arbor Science Pub. Inc Michigan 1974
- [52] C. Orr Jr - "Particulate Technology" The Macmillan Co New York 1966
- [53] J. Pikoń, J. Nehlmann - Informacja osobista 1985

- [54] I. Koss, D. Wolczyk - "Badanie wpływu kształtu naczyńa sedymentacyjnego na rozprzestrzenianie się samorzutnej cyrkulacji zawiesiny" Prace dypl. magisterskie Inst. Inż. Chem. i Bud. Ap. Pol. Śl. G-ce 1975
- [55] J. Pieg, F. Teborek - "Wpływ taczrywa i kształtu osadnika na szybkość sedymentacji" Zeszyty Naukowe Pol. Śląskiej z 87-1979
- [56] B. Kreft, G. Piekarski - "Badanie sedymentacji ciągłej w osadnikach laboratoryjnych" Prace dypl. magisterskie Inst. Inż. Chem. i Bud. Ap. Pol. Śl. Gliwice 1985
- [57] K. J. Scott - "Effect of factors other than solids Concentration on sedimentation" Trans. Inst. Min. Met. Sec. C. Vol 75, 1966, C 181- C 182
- [58] H. Rebel - "Vergleich der Berechnungsmethoden zur Bestimmung der Absetzfläche kontinuierlich arbeitender Klärgefäße und Eindicker" Chemische Technik 17 Jg Heft 7/1965/ 392-397
- [59] A. G. Kusatkin - "Podstawowe procesy i aparaty w technologii chemicznej" PWT Warszawa 1954
- [60] J. A. Pawłow, F. Kozanow, A. Monow - "Przykłady i zadania z zakresu aparatury i inżynierii chemicznej" PWT Warszawa 1981
- [61] K. Kuczej, W. Niemiec - "Cenne metod obliczenia powierzchni sedymentacji" Inż. Apar. Chem. Nr 6/1975, 16-18
- [62] Z. Szyszkina - "Kanalizacja" Wydawnictwo Budownictwo i Architektura Warszawa 1957

- [63] J. Krakowski - "Rozdzielenie i oddzielenie ciał stałych" PWT
Warszawa 1955
- [64] J. Laskowski - "Porównanie wsorów najczęściej stosowanych do
obliczenie powierzchni osadników o dzieżeniu
ciągłym" Przegląd górniczy 15/1959/525-529
- [65] H. Czarkowski - "Przeróbka rud" WGH Katowice 1958
- [66] A. J. Scott - "Experimental Study of Continuous thickening of a
floculated silica slurry" I & EC Fund Vol 7 No 4
1968, 582-595
- [67] L. G. Eklund - "A critical investigation of the working condi-
tions in a continuous pilot thickener at optimal
load" Dept. Chem. Eng. Lund Inst. of Technol.
Report No 75-F-4-1975
- [68] B. Fitch - "Current Theory and Thickener Design /1975/ Part 1.
Filtration and Separation July/August 1975 No4 Vol
12, 355-359
- [69] P. A. Schweitzer - "Handbook of Separation Techniques for Chemi-
cal Engineers" MC Graw Hill Book Co 1979
New York
- [70] B. Fitch - "Current Theory and Thickener Design /1975/ Part 3
Filtration and separation November/December 1975
No 6 Vol 12, 635-638
- [71] H. Marts, J. Zioko - "Calculation of thickener area and depth
based on the data of batch-settling test"
Chem. Eng. Sci. Vol 40 No 7, 1301-1303/1985/
- [72] H. Marts, J. Zioko - "On the method of thickener area calculation
based on the data of batch-settling test"
Chem. Eng. Sci. Vol 41 No 7 1988-1920/1986/
- [73] H. Marts, J. Zioko - "Graficzne wyznaczenie powierzchni osadnika"
Inż. i Apar. Chem. Nr 4/1986, 21-22

- [74] K. Machaj - "Uściślony model procesu sedimentacji w osadnikach o stałej prędkości opadania fazy stałej" *Int.Chem.* III, 3, 567-574 /1973/
- [75] L.G. Eklund, D.A. Barr - "Influence of feed conditions on continuous thickening" *Chem. Eng. Sci.* Vol 34, 1051-1063, 1979
- [76] L.G. Eklund - "Diskussion des nichtidealen Eindickerverhaltens" 21 Diskussion-tagung "Mechanische Flüssigkeit-abtrennung" Magdeburg 1985
- [77] K. Machaj, J. Pieg, J. Gójski - "Badania wstępne nad hydrauliką zaburzeń wlotowych w osadnikach radialnych" *Int.Chem.Proc.* 2,4, 815-824 /1981/
- [78] K. Machaj - Informacja osobista.
- [79] C. Bryazewski, H. Firawicz - "Przykłady i zadania z procesów mechanicznych w inżynierii chemicznej" Skrypt Pol. Wrocławskiej 1980
- [80] J. Pikoń - "Aparature chemiczne" 238 Warszawa 1976
- [81] K.J. Scott - "Theory of thickening : factors affecting settling rate of solids in flocculated pulps" *Trans.Inst.Min.Met.Sec.C.* Vol 77, 1963, 685-697 .

Załącznik I Wybrane własności badanych zawiesin

| p | Materiał | ρ_a [kg/m ³] | ρ_c [kg/m ³] | η_c [Pa.s] | Udział masowy frakcji | | | | | l_{max} [μm] |
|---|----------|----------------------------------|----------------------------------|--------------------|-----------------------|------------|-------------|--------------|---------|-------------------|
| | | | | | 0-2 μm | 2 μm- 5 μm | 5 μm- 10 μm | 10 μm- 20 μm | > 20 μm | |
| 1 | Kaolin | 2490 | 998 | 0,001 | 0,5 | 0,193 | 0,1375 | 0,1468 | 0,0227 | 60 |
| 2 | Dicalit | 2270 | 999 | 0,001 | 0,2046 | 0,0522 | 0,1892 | 0,4631 | 0,0909 | 60 |
| 3 | Kreda | 2310 | 999 | 0,001 | 0,5341 | 0,1364 | 0,1306 | 0,1364 | 0,0625 | 60 |
| 4 | Dicalit | 2270 | 999 | 0,001 | 0,0676 | 0,1626 | 0,3248 | 0,3059 | 0,1391 | 60 |
| 5 | Dicalit | 2270 | 999 | 0,001 | 0,0387 | 0,1291 | 0,4100 | 0,2990 | 0,1236 | 60 |
| 6 | Dicalit | 2270 | 999 | 0,001 | 0,0562 | 0,0958 | 0,2508 | 0,3935 | 0,2037 | 60 |
| 7 | Dicalit | 2270 | 999 | 0,001 | 0,0880 | 0,1030 | 0,3420 | 0,3046 | 0,1620 | 60 |
| 8 | Dicalit | 2270 | 999 | 0,001 | 0,0747 | 0,0995 | 0,4978 | 0,2796 | 0,0484 | 40 |
| 9 | Dicalit | 2270 | 1089,5 | 0,0035 | 0,0747 | 0,0995 | 0,4978 | 0,2796 | 0,0484 | 40 |

Załącznik II

Opadanie zawiesiny kaolinu w wodzie w rurze sedymentacyjnej

D = 4,6 cm

| h [cm] | t [min] | | | | |
|--------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | $C_v = 2,1\%$ | $C_v = 3,2\%$ | $C_v = 4,4\%$ | $C_v = 5,5\%$ | $C_v = 6,8\%$ |
| 40 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 39 | 2,65 | 6,30 | 19,10 | 21,40 | 32,50 |
| 38 | 5,25 | 13,15 | 30,40 | 34,65 | 61,65 |
| 37 | 8,10 | 20,15 | 40,40 | 46,25 | 81,10 |
| 36 | 10,80 | 27,30 | 50,90 | 57,75 | 99,75 |
| 35 | 13,50 | 34,40 | 60,25 | 68,00 | 116,10 |
| 34 | 16,25 | 41,65 | 72,30 | 80,40 | 131,80 |
| 33 | 19,10 | 48,90 | 83,15 | 91,00 | 145,65 |
| 32 | 21,75 | 56,25 | 93,65 | 102,25 | 152,10 |
| 31 | 24,65 | 63,10 | 102,75 | 111,15 | 168,25 |
| 30 | 27,90 | 70,90 | 112,40 | 122,30 | 178,40 |
| 29 | 31,10 | 78,00 | 122,15 | 132,25 | 187,10 |
| 28 | 34,40 | 85,25 | 131,75 | 141,10 | 214,90 |
| 27 | 37,75 | 92,25 | 141,00 | 150,30 | 258,00 |
| 26 | 41,50 | 99,50 | 150,90 | 158,25 | 325,50 |
| 25 | 45,15 | 106,90 | 161,75 | 166,65 | |
| 24 | 49,10 | 113,90 | 170,25 | 176,75 | |
| 23 | 53,00 | 121,55 | 177,25 | 192,65 | |
| 22 | 57,10 | 128,40 | 185,40 | 231,65 | |
| 21 | 61,15 | 135,60 | 193,65 | 310,75 | |
| 20 | 65,55 | 143,55 | 205,25 | | |
| 19 | 69,90 | 149,55 | 223,50 | | |
| 18 | 74,50 | 157,15 | 268,50 | | |
| 17 | 79,25 | 164,60 | | | |
| 16 | 84,25 | 172,25 | | | |
| 15 | 89,50 | 185,80 | | | |
| 14 | 94,75 | 228,60 | | | |
| 13 | 100,55 | 303,10 | | | |
| 12 | 106,40 | | | | |
| 11 | 112,65 | | | | |
| 10 | 123,25 | | | | |
| 9 | 189,50 | | | | |

Opadanie zawiesiny kredy w wodzie w rurze sedimentacyjnej

$D = 3,7 \text{ cm}$

$C_v = 0,015$

| $t[\text{min}] - h[\text{cm}]$ | $t[\text{min}] - h[\text{cm}]$ | $t[\text{min}] - h[\text{cm}]$ |
|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 1 - 31 | 14 - 1,85 | 28 - 1,5 |
| 2 - 27 | 15 - 1,8 | 30 - 1,49 |
| 3 - 22,5 | 16 - 1,75 | 32 - 1,48 |
| 4 - 17,5 | 17 - 1,72 | 34 - 1,45 |
| 5 - 14 | 18 - 1,7 | 40 - 1,4 |
| 6 - 10 | 19 - 1,68 | 45 - 1,39 |
| 7 - 6 | 20 - 1,65 | 50 - 1,38 |
| 8 - 2,5 | 21 - 1,62 | 55 - 1,35 |
| 9 - 2,2 | 22 - 1,6 | 60 - 1,35 |
| 10 - 2,05 | 23 - 1,58 | 65 - 1,35 |
| 11 - 2,0 | 24 - 1,55 | 70 - 1,35 |
| 12 - 1,95 | 25 - 1,53 | 80 - 1,3 |
| 13 - 1,9 | 26 - 1,52 | |

$C_v = 0,02$

| $t[\text{min}] - h[\text{cm}]$ | $t[\text{min}] - h[\text{cm}]$ | $t[\text{min}] - h[\text{cm}]$ |
|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 1 - 31,5 | 16 - 2,55 | 35 - 2,05 |
| 2 - 27,5 | 17 - 2,5 | 36 - 2,02 |
| 3 - 23,5 | 18 - 2,48 | 38 - 2,0 |
| 4 - 19,5 | 19 - 2,45 | 40 - 1,98 |
| 5 - 16 | 20 - 2,4 | 45 - 1,95 |
| 6 - 12,5 | 21 - 2,38 | 50 - 1,92 |
| 7 - 8,5 | 22 - 2,35 | 55 - 1,9 |
| 8 - 5,0 | 23 - 2,31 | 60 - 1,86 |
| 9 - 3,6 | 24 - 2,28 | 65 - 1,85 |
| 10 - 3,15 | 25 - 2,25 | 70 - 1,85 |
| 11 - 2,9 | 26 - 2,23 | 75 - 1,82 |
| 12 - 2,8 | 27 - 2,2 | 80 - 1,8 |
| 13 - 2,7 | 28 - 2,18 | 90 - 1,75 |
| 14 - 2,65 | 30 - 2,15 | |
| 15 - 2,6 | 32 - 2,12 | |

$$C_v = 0,025$$

| t [min] | h [cm] |
|---------|--------|
| 1 | 31,5 |
| 2,5 | 27 |
| 3 | 25,3 |
| 4 | 21,8 |
| 5 | 18,5 |
| 6 | 15,4 |
| 7 | 12,3 |
| 8 | 9,3 |
| 9 | 6,5 |
| 10 | 5,15 |
| 11 | 4,55 |
| 12 | 4,15 |
| 13 | 3,7 |
| 14 | 3,52 |
| 15 | 3,45 |
| 16 | 3,38 |
| 17 | 3,3 |
| 18 | 3,25 |

| t [min] | h [cm] |
|---------|--------|
| 19 | 3,2 |
| 20 | 3,15 |
| 21 | 3,1 |
| 22 | 3,0 |
| 23 | 3,5 |
| 24 | 3,01 |
| 25 | 2,99 |
| 26 | 2,95 |
| 27 | 2,92 |
| 28 | 2,9 |
| 29 | 2,88 |
| 30 | 2,85 |
| 31 | 2,8 |
| 32 | 2,8 |
| 34 | 2,75 |
| 36 | 2,7 |
| 38 | 2,68 |
| 40 | 2,65 |

| t [min] | h [cm] |
|---------|--------|
| 42 | 2,6 |
| 44 | 2,55 |
| 46 | 2,55 |
| 50 | 2,5 |
| 55 | 2,45 |
| 60 | 2,4 |
| 65 | 2,38 |
| 70 | 2,35 |
| 75 | 2,32 |
| 80 | 2,3 |
| 85 | 2,28 |
| 90 | 2,28 |
| 100 | 2,25 |
| 110 | 2,25 |
| 130 | 2,2 |
| 180 | 2,15 |

$$C_v = 0,03$$

| t [min] | h [cm] |
|---------|--------|
| 1 | 32 |
| 2 | 29 |
| 3 | 26 |
| 4 | 23 |
| 5 | 20,5 |
| 6 | 17,8 |
| 7 | 15,0 |
| 8 | 12,5 |
| 9 | 10 |
| 10 | 7,8 |
| 11 | 6,6 |
| 12 | 5,95 |

| t [min] | h [cm] |
|---------|--------|
| 13 | 5,5 |
| 14 | 5,0 |
| 15 | 4,65 |
| 16 | 4,3 |
| 17 | 4,25 |
| 18 | 4,15 |
| 19 | 4,05 |
| 20 | 4,0 |
| 21 | 3,95 |
| 22 | 3,9 |
| 23 | 3,85 |
| 24 | 3,8 |

| t [min] | h [cm] |
|---------|--------|
| 25 | 3,75 |
| 26 | 3,75 |
| 27 | 3,68 |
| 28 | 3,65 |
| 29 | 3,62 |
| 30 | 3,6 |
| 31 | 3,58 |
| 32 | 3,52 |
| 33 | 3,5 |
| 34 | 3,48 |
| 35 | 3,45 |
| 37 | 3,42 |

39 - 3,4
41 - 3,35
43 - 3,28
45 - 3,25
47 - 3,22
49 - 3,15

51 - 3,1
53 - 3,1
55 - 3,05
60 - 3,0
65 - 2,98
70 - 2,9

75 - 2,88
80 - 2,85
90 - 2,8
100 - 2,78
110 - 2,75

$$C_v = 0,035$$

t [min] - h [cm]

1 - 32
2 - 29,7
3 - 27,3
4 - 24,8
5 - 22,3
6 - 20,0
7 - 17,7
8 - 15,8
9 - 13,4
10 - 11,2
11 - 9,5
12 - 8,4
13 - 7,7
14 - 7,15
15 - 6,6
16 - 6,2
17 - 6,8
18 - 5,45
19 - 5,1
20 - 4,9

t [min] - h [cm]

21 - 4,8
22 - 4,7
23 - 4,65
24 - 4,6
25 - 4,55
26 - 4,5
27 - 4,45
28 - 4,5
29 - 4,38
30 - 4,35
31 - 4,3
32 - 4,28
33 - 4,25
34 - 4,2
36 - 4,18
38 - 4,15
40 - 4,05
42 - 4,0
44 - 3,95
46 - 3,9

t [min] - h [cm]

48 - 3,88
50 - 3,82
52 - 3,8
54 - 3,75
56 - 3,72
58 - 3,7
60 - 3,68
65 - 3,6
70 - 3,5
75 - 3,48
80 - 3,4
85 - 3,38
90 - 3,35
100 - 3,3
110 - 3,25
120 - 3,2
130 - 3,18
140 - 3,15
160 - 3,1

$U_v = 0,04$

| t [min] | - | h [cm] |
|---------|---|--------|
| 1 | - | 32,5 |
| 2 | - | 30,5 |
| 3 | - | 28,5 |
| 4 | - | 26,3 |
| 5 | - | 24,2 |
| 6 | - | 22,2 |
| 7 | - | 20,2 |
| 8 | - | 18,4 |
| 9 | - | 16,4 |
| 10 | - | 14,4 |
| 11 | - | 12,8 |
| 12 | - | 11,5 |
| 13 | - | 10,4 |
| 14 | - | 9,5 |
| 15 | - | 8,9 |
| 16 | - | 8,4 |
| 17 | - | 7,9 |
| 18 | - | 7,45 |
| 19 | - | 7,1 |
| 20 | - | 6,7 |
| 21 | - | 6,35 |
| 22 | - | 6,0 |
| 23 | - | 5,75 |

| t [min] | - | h [cm] |
|---------|---|--------|
| 24 | - | 5,55 |
| 25 | - | 5,45 |
| 26 | - | 5,35 |
| 27 | - | 5,3 |
| 28 | - | 5,25 |
| 29 | - | 5,2 |
| 30 | - | 5,15 |
| 31 | - | 5,1 |
| 32 | - | 5,05 |
| 33 | - | 5,0 |
| 34 | - | 4,98 |
| 35 | - | 4,95 |
| 36 | - | 4,92 |
| 37 | - | 4,9 |
| 38 | - | 4,88 |
| 39 | - | 4,85 |
| 40 | - | 4,8 |
| 42 | - | 4,75 |
| 44 | - | 4,7 |
| 46 | - | 4,65 |
| 48 | - | 4,6 |
| 50 | - | 4,55 |
| 52 | - | 4,5 |

| t [min] | - | h [cm] |
|---------|---|--------|
| 54 | - | 4,48 |
| 56 | - | 4,45 |
| 58 | - | 4,4 |
| 60 | - | 4,38 |
| 62 | - | 4,35 |
| 64 | - | 4,3 |
| 66 | - | 4,28 |
| 68 | - | 4,25 |
| 70 | - | 4,2 |
| 75 | - | 4,15 |
| 80 | - | 4,05 |
| 85 | - | 4,0 |
| 90 | - | 3,95 |
| 95 | - | 3,9 |
| 100 | - | 3,85 |
| 110 | - | 3,8 |
| 115 | - | 3,78 |
| 120 | - | 3,75 |
| 130 | - | 3,7 |
| 140 | - | 3,68 |
| 150 | - | 3,65 |
| 160 | - | 3,6 |
| 180 | - | 3,58 |

$U_v = 0,045$

| t [min] | - | h [cm] |
|---------|---|--------|
| 1 | - | 32,5 |
| 2 | - | 31,0 |
| 3 | - | 29,3 |
| 4 | - | 27,2 |
| 5 | - | 25,5 |
| 6 | - | 23,5 |
| 7 | - | 22,0 |

| t [min] | - | h [cm] |
|---------|---|--------|
| 8 | - | 20,2 |
| 9 | - | 18,5 |
| 10 | - | 17,0 |
| 11 | - | 15,5 |
| 12 | - | 14,0 |
| 13 | - | 12,8 |
| 14 | - | 11,8 |

| t [min] | - | h [cm] |
|---------|---|--------|
| 15 | - | 11,2 |
| 16 | - | 10,5 |
| 17 | - | 9,9 |
| 18 | - | 9,4 |
| 19 | - | 8,9 |
| 20 | - | 8,5 |
| 21 | - | 8,1 |
| 23 | - | 7,7 |
| 23 | - | 7,5 |
| 24 | - | 7,1 |

| | | |
|-----------|-----------|------------|
| 25 - 6,8 | 39 - 5,52 | 70 - 4,85 |
| 26 - 6,5 | 40 - 5,5 | 75 - 4,75 |
| 27 - 6,3 | 41 - 5,48 | 80 - 4,65 |
| 28 - 6,1 | 42 - 5,45 | 85 - 4,62 |
| 29 - 6,0 | 44 - 5,4 | 90 - 4,55 |
| 30 - 5,9 | 46 - 5,35 | 95 - 4,5 |
| 31 - 5,85 | 48 - 5,3 | 100 - 4,45 |
| 32 - 5,85 | 50 - 5,25 | 105 - 4,4 |
| 33 - 5,8 | 52 - 5,2 | 110 - 4,38 |
| 34 - 5,75 | 54 - 5,15 | 115 - 4,3 |
| 35 - 5,70 | 56 - 5,12 | 120 - 4,25 |
| 36 - 5,65 | 58 - 5,05 | 130 - 4,2 |
| 37 - 5,62 | 60 - 5,0 | 140 - 4,15 |
| 38 - 5,6 | 62 - 5,98 | 150 - 4,1 |
| | 64 - 5,92 | 170 - 4,0 |
| | 66 - 4,9 | 200 - 3,95 |
| | 68 - 4,88 | |

$$C_v = 0,05$$

| t[min] - h[cm] | t[min] - h[cm] | t[min] - h[cm] |
|----------------|----------------|----------------|
| 1 - 33 | 17 - 11,9 | 33 - 6,5 |
| 2 - 31,5 | 18 - 11,3 | 34 - 6,45 |
| 3 - 29,8 | 19 - 10,8 | 35 - 6,4 |
| 4 - 25,4 | 20 - 10,3 | 36 - 6,35 |
| 5 - 26,5 | 21 - 10,9 | 37 - 6,3 |
| 6 - 25 | 22 - 9,5 | 38 - 6,25 |
| 7 - 23,5 | 23 - 9,2 | 39 - 6,2 |
| 8 - 22,0 | 24 - 8,8 | 40 - 6,18 |
| 9 - 20,5 | 25 - 8,45 | 41 - 6,15 |
| 10 - 19,0 | 26 - 8,1 | 42 - 6,1 |
| 11 - 17,7 | 27 - 7,8 | 43 - 6,05 |
| 12 - 16,4 | 28 - 7,5 | 44 - 6,0 |
| 13 - 15,3 | 29 - 7,2 | 45 - 5,98 |
| 14 - 14,2 | 30 - 6,7 | 46 - 5,95 |
| 15 - 13,3 | 31 - 6,75 | 47 - 5,92 |
| 16 - 12,5 | 32 - 6,65 | 48 - 5,9 |

| | | |
|-----------|------------|------------|
| 50 - 5,85 | 72 - 5,42 | 115 - 4,85 |
| 52 - 5,8 | 74 - 5,38 | 120 - 4,82 |
| 54 - 5,78 | 76 - 5,35 | 125 - 4,8 |
| 56 - 5,75 | 78 - 5,32 | 140 - 4,7 |
| 58 - 5,7 | 80 - 5,3 | 150 - 4,65 |
| 60 - 5,68 | 85 - 5,20 | 160 - 4,65 |
| 62 - 5,60 | 90 - 5,18 | 180 - 4,6 |
| 64 - 5,55 | 95 - 5,05 | 200 - 4,55 |
| 66 - 5,5 | 100 - 4,98 | 220 - 4,5 |
| 68 - 5,48 | 105 - 5,95 | 240 - 4,45 |
| 70 - 5,45 | 110 - 4,89 | 260 - 4,4 |

$$C_v = 0,10$$

| t [min] - h [cm] | t [min] - h [cm] | t min - h cm |
|------------------|------------------|--------------|
| 2 - 33,5 | 23 - 25,48 | 44 - 18,85 |
| 3 - 33,0 | 24 - 25,15 | 45 - 18,55 |
| 4 - 32,6 | 25 - 24,8 | 46 - 18,25 |
| 5 - 32,2 | 26 - 24,45 | 47 - 18,0 |
| 6 - 31,8 | 27 - 24,1 | 48 - 17,7 |
| 7 - 31,4 | 28 - 23,8 | 49 - 17,45 |
| 8 - 31,0 | 29 - 23,45 | 50 - 17,15 |
| 9 - 30,6 | 30 - 23,15 | 51 - 16,85 |
| 10 - 30,2 | 31 - 22,8 | 52 - 16,62 |
| 11 - 29,8 | 32 - 22,5 | 53 - 16,45 |
| 12 - 29,4 | 33 - 22,2 | 54 - 16,1 |
| 13 - 29,1 | 34 - 21,85 | 55 - 15,85 |
| 14 - 28,7 | 35 - 21,5 | 56 - 15,6 |
| 15 - 28,3 | 36 - 21,2 | 57 - 15,35 |
| 16 - 27,95 | 37 - 20,85 | 58 - 15,1 |
| 17 - 27,6 | 38 - 20,55 | 59 - 14,85 |
| 18 - 27,2 | 39 - 20,3 | 60 - 14,7 |
| 19 - 26,85 | 40 - 20,0 | 61 - 14,30 |
| 20 - 26,5 | 41 - 19,7 | 62 - 14,05 |
| 21 - 26,15 | 42 - 19,45 | 63 - 13,8 |
| 22 - 25,8 | 43 - 19 | 64 - 13,6 |

| | | |
|------------|-------------|------------|
| 63 - 13,35 | 90 - 11,0 | 195 - 9,4 |
| 66 - 13,12 | 92 - 10,98 | 200 - 9,38 |
| 67 - 12,9 | 94 - 10,92 | 205 - 9,35 |
| 68 - 12,65 | 96 - 10,88 | 210 - 9,3 |
| 69 - 12,4 | 100 - 10,8 | 215 - 9,25 |
| 70 - 12,2 | 105 - 10,65 | 220 - 9,22 |
| 71 - 12,0 | 110 - 10,5 | 225 - 9,2 |
| 72 - 11,90 | 115 - 10,45 | 230 - 9,15 |
| 73 - 11,8 | 120 - 10,38 | 235 - 9,1 |
| 74 - 11,7 | 125 - 10,3 | 240 - 9,05 |
| 75 - 11,65 | 130 - 10,25 | 245 - 9,0 |
| 76 - 11,6 | 135 - 10,15 | 250 - 8,95 |
| 77 - 11,55 | 140 - 10,05 | 255 - 8,95 |
| 78 - 11,5 | 145 - 10,0 | 260 - 8,92 |
| 79 - 11,45 | 150 - 9,95 | 265 - 8,9 |
| 80 - 11,4 | 155 - 9,8 | 270 - 8,88 |
| 81 - 11,35 | 160 - 9,8 | 275 - 8,88 |
| 82 - 11,3 | 165 - 9,75 | 280 - 8,85 |
| 83 - 11,28 | 170 - 9,7 | |
| 84 - 11,25 | 175 - 9,65 | |
| 85 - 11,2 | 180 - 9,55 | |
| 86 - 11,18 | 185 - 9,5 | |
| 88 - 11,1 | 190 - 9,45 | |

$$C_v = 0,15$$

| t [min] - h [cm] | t [min] - h [cm] | t [min] - h [cm] |
|------------------|------------------|------------------|
| 1 - 34,3 | 11 - 32,3 | 21 - 30,5 |
| 2 - 34,0 | 12 - 32,1 | 22 - 30,3 |
| 3 - 33,8 | 13 - 31,9 | 23 - 30,15 |
| 4 - 33,6 | 14 - 31,75 | 24 - 30,0 |
| 5 - 33,4 | 15 - 31,55 | 25 - 29,8 |
| 6 - 33,35 | 16 - 31,4 | 26 - 29,65 |
| 7 - 33,05 | 17 - 31,2 | 27 - 29,4 |
| 8 - 32,85 | 18 - 31,0 | 28 - 29,2 |
| 9 - 32,75 | 19 - 30,85 | 29 - 29,05 |
| 10 - 32,45 | 20 - 30,70 | 30 - 28,9 |

| | | |
|------------|-------------|-------------|
| 31 - 28,75 | 68 - 22,05 | 104 - 16,5 |
| 32 - 28,5 | 69 - 21,9 | 105 - 16,45 |
| 33 - 28,3 | 70 - 21,75 | 106 - 16,4 |
| 34 - 28,1 | 71 - 21,6 | 107 - 16,35 |
| 35 - 27,95 | 72 - 21,4 | 108 - 16,3 |
| 36 - 27,75 | 73 - 21,25 | 109 - 16,25 |
| 37 - 27,55 | 74 - 21,1 | 110 - 16,2 |
| 38 - 27,35 | 75 - 20,9 | 111 - 16,15 |
| 39 - 27,25 | 76 - 20,75 | 112 - 16,15 |
| 40 - 27,0 | 77 - 20,6 | 114 - 16,05 |
| 41 - 26,8 | 78 - 20,45 | 116 - 15,95 |
| 42 - 26,65 | 79 - 20,25 | 118 - 15,9 |
| 43 - 26,5 | 80 - 20,1 | 120 - 15,85 |
| 44 - 26,3 | 81 - 19,9 | 122 - 15,8 |
| 45 - 26,15 | 82 - 19,75 | 124 - 15,75 |
| 46 - 25,95 | 83 - 19,6 | 126 - 15,7 |
| 47 - 25,75 | 84 - 19,4 | 128 - 15,65 |
| 48 - 25,65 | 85 - 19,25 | 130 - 15,6 |
| 49 - 25,4 | 86 - 19,05 | 134 - 15,5 |
| 50 - 25,25 | 87 - 18,9 | 136 - 15,45 |
| 51 - 25,05 | 88 - 18,7 | 138 - 15,4 |
| 52 - 24,95 | 89 - 18,55 | 140 - 15,35 |
| 54 - 24,5 | 90 - 18,35 | 142 - 15,32 |
| 55 - 24,34 | 91 - 18,2 | 144 - 15,25 |
| 56 - 24,2 | 92 - 18,0 | 146 - 15,2 |
| 57 - 24,0 | 93 - 17,8 | 148 - 15,18 |
| 58 - 23,8 | 94 - 17,65 | 150 - 15,15 |
| 59 - 23,65 | 95 - 17,5 | 152 - 15,12 |
| 60 - 23,5 | 96 - 17,3 | 155 - 15,05 |
| 61 - 23,3 | 97 - 17,1 | 160 - 15,0 |
| 62 - 23,15 | 98 - 16,95 | 165 - 14,9 |
| 63 - 22,95 | 99 - 16,85 | 170 - 14,8 |
| 64 - 22,8 | 100 - 16,75 | 175 - 14,75 |
| 65 - 22,6 | 101 - 16,7 | 180 - 14,65 |
| 66 - 22,4 | 102 - 16,65 | 185 - 14,6 |
| 67 - 22,2 | 103 - 16,55 | 190 - 14,5 |

195 - 14,45
200 - 14,4
205 - 14,3
210 - 14,25
215 - 14,2
225 - 14,1

230 - 14,02
235 - 13,95
240 - 13,09
245 - 13,88
270 - 13,75
275 - 13,7

280 - 13,65
285 - 13,6
290 - 13,55
300 - 13,5

$C_v = 0,20$

t [min] - h [cm]

1 - 34,2
2 - 34,0
3 - 33,9
4 - 33,85
5 - 33,85
6 - 33,8
7 - 33,75
8 - 33,7
9 - 33,65
10 - 33,6
11 - 33,55
12 - 33,5
13 - 33,4
14 - 33,35
15 - 33,2
16 - 33,15
17 - 33,0
18 - 32,85
19 - 32,7
20 - 32,6
21 - 32,45
22 - 32,35
23 - 32,25
24 - 32,15
25 - 32,0
26 - 31,85

t [min] - h [cm]

27 - 31,78
28 - 31,65
29 - 31,55
30 - 31,5
31 - 31,45
32 - 31,38
33 - 31,28
34 - 31,2
35 - 31,15
36 - 31,05
37 - 30,95
38 - 30,85
39 - 30,7
40 - 30,6
41 - 30,45
42 - 30,35
43 - 30,25
44 - 30,2
45 - 30,05
46 - 29,95
47 - 29,8
48 - 29,7
49 - 29,6
50 - 29,45
51 - 29,35
52 - 29,25

t [min] - h [cm]

53 - 29,15
54 - 29,05
55 - 28,95
56 - 28,8
57 - 28,65
58 - 28,5
59 - 28,4
60 - 28,25
61 - 28,15
62 - 28,0
63 - 27,9
64 - 27,8
65 - 27,7
66 - 27,55
67 - 27,35
68 - 27,25
69 - 27,15
70 - 27,0
71 - 26,9
72 - 26,75
73 - 26,65
74 - 26,5
75 - 26,4
76 - 26,25
77 - 26,15
78 - 26,0

| | | |
|-------------|-------------|-------------|
| 79 - 25,9 | 116 - 21,85 | 205 - 18,5 |
| 80 - 25,8 | 117 - 21,0 | 210 - 18,4 |
| 81 - 25,7 | 118 - 20,9 | 215 - 18,3 |
| 82 - 25,5 | 119 - 20,85 | 220 - 18,2 |
| 83 - 25,4 | 120 - 20,8 | 225 - 18,15 |
| 84 - 25,3 | 121 - 20,7 | 230 - 18,08 |
| 85 - 25,15 | 122 - 20,65 | 235 - 18,0 |
| 86 - 25,0 | 123 - 20,6 | 240 - 17,95 |
| 87 - 24,95 | 124 - 20,55 | 245 - 17,9 |
| 88 - 24,8 | 125 - 20,5 | 250 - 17,85 |
| 89 - 24,65 | 126 - 20,45 | 255 - 17,8 |
| 90 - 24,5 | 127 - 20,4 | 260 - 17,75 |
| 91 - 24,4 | 128 - 20,35 | 265 - 17,65 |
| 92 - 24,3 | 129 - 20,3 | 270 - 17,6 |
| 93 - 24,15 | 130 - 20,28 | 275 - 17,55 |
| 94 - 24,0 | 131 - 20,25 | 280 - 17,5 |
| 95 - 23,85 | 132 - 20,2 | |
| 96 - 23,75 | 133 - 20,18 | |
| 97 - 23,6 | 135 - 20,1 | |
| 98 - 23,5 | 136 - 20,08 | |
| 99 - 23,35 | 138 - 20,0 | |
| 100 - 23,2 | 140 - 19,92 | |
| 101 - 23,0 | 142 - 19,88 | |
| 102 - 22,85 | 144 - 19,8 | |
| 103 - 22,7 | 146 - 19,75 | |
| 104 - 22,6 | 148 - 19,7 | |
| 105 - 22,45 | 150 - 19,65 | |
| 106 - 22,3 | 155 - 19,5 | |
| 107 - 22,15 | 160 - 19,4 | |
| 108 - 22,0 | 165 - 19,3 | |
| 109 - 21,85 | 170 - 19,2 | |
| 110 - 21,75 | 175 - 19,1 | |
| 111 - 21,6 | 180 - 19,0 | |
| 112 - 21,45 | 185 - 18,9 | |
| 113 - 21,35 | 190 - 18,8 | |
| 114 - 21,25 | 195 - 18,7 | |
| 115 - 21,1 | 200 - 18,6 | |

| | | |
|-------------|-------------|------------|
| 200 - 22,35 | 225 - 21,8 | 250 - 21,3 |
| 205 - 22,2 | 230 - 21,7 | 255 - 21,2 |
| 210 - 22,1 | 235 - 21,6 | 260 - 21,2 |
| 215 - 22,0 | 240 - 21,65 | |
| 220 - 22,9 | | |

| | | |
|-----------|-----------|-----------|
| 10 - 22,7 | 35 - 21,7 | 60 - 21,7 |
| 15 - 22,6 | 40 - 21,6 | 65 - 21,6 |
| 20 - 22,5 | 45 - 21,7 | 70 - 21,6 |
| 25 - 22,4 | 50 - 21,6 | 75 - 21,7 |
| 30 - 22,3 | 55 - 21,5 | 80 - 21,6 |
| 35 - 22,2 | 60 - 21,5 | 85 - 21,6 |

$\sigma_y = 0,003$

| | | |
|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| $\sigma(100) - \sigma(50)$ | $\sigma(150) - \sigma(100)$ | $\sigma(200) - \sigma(150)$ |
| 5 - 22,5 | 25 - 22,2 | 50 - 22,2 |
| 10 - 22,4 | 30 - 22,1 | 55 - 22,2 |
| 15 - 22,3 | 35 - 22,1 | 60 - 22,2 |
| 20 - 22,2 | 40 - 22,1 | 65 - 22,2 |
| 25 - 22,1 | 45 - 22,1 | 70 - 22,2 |
| 30 - 22,0 | 50 - 22,1 | 75 - 22,2 |
| 35 - 21,9 | 55 - 22,1 | 80 - 22,2 |
| 40 - 21,8 | 60 - 22,1 | |
| 45 - 21,7 | 65 - 22,1 | |
| 50 - 21,6 | 70 - 22,1 | |

$\sigma_y = 0,003$

| | | |
|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| $\sigma(100) - \sigma(50)$ | $\sigma(150) - \sigma(100)$ | $\sigma(200) - \sigma(150)$ |
| 5 - 22,0 | 15 - 22,0 | 30 - 22,0 |
| 10 - 22,0 | 20 - 22,0 | 40 - 22,0 |
| 15 - 22,0 | 25 - 22,0 | 50 - 22,0 |
| 20 - 22,0 | 30 - 22,0 | 60 - 22,0 |
| 25 - 22,0 | 35 - 22,0 | 70 - 22,0 |
| 30 - 22,0 | 40 - 22,0 | 80 - 22,0 |
| 35 - 22,0 | 45 - 22,0 | |
| 40 - 22,0 | 50 - 22,0 | |
| 45 - 22,0 | 55 - 22,0 | |
| 50 - 22,0 | 60 - 22,0 | |
| 55 - 22,0 | 65 - 22,0 | |
| 60 - 22,0 | 70 - 22,0 | |
| 65 - 22,0 | 75 - 22,0 | |
| 70 - 22,0 | 80 - 22,0 | |

Opadanie zawiesiny dicalitu w wodzie w rurze
sedymentacyjnej $D = 4,6 \text{ cm}$

$$C_v = 0,02$$

| t [min] - h [cm] | t [min] - h [cm] | t [min] - h [cm] |
|------------------|------------------|------------------|
| 5 - 47,5 | 40 - 30,8 | 75 - 18,7 |
| 10 - 45,2 | 45 - 28,7 | 80 - 17,6 |
| 15 - 43,0 | 50 - 26,6 | 85 - 16,5 |
| 20 - 40,5 | 55 - 24,7 | 90 - 15,6 |
| 25 - 37,0 | 60 - 22,9 | 95 - 14,7 |
| 30 - 35,5 | 65 - 21,4 | 100 - 13,8 |
| 35 - 33,1 | 70 - 20 | 120 - 13,2 |

$$C_v = 0,025$$

| t [min] - h [cm] | t [min] - h [cm] | t [min] - h [cm] |
|------------------|------------------|------------------|
| 5 - 48,6 | 55 - 33,3 | 105 - 20,3 |
| 10 - 47,1 | 60 - 31,8 | 110 - 19,3 |
| 15 - 45,6 | 65 - 30,3 | 115 - 18,4 |
| 20 - 44,1 | 70 - 28,9 | 120 - 17,5 |
| 25 - 42,6 | 75 - 27,5 | 125 - 16,7 |
| 30 - 41,1 | 80 - 26,2 | 130 - 16,3 |
| 35 - 39,5 | 85 - 24,8 | 135 - 16,2 |
| 40 - 38,0 | 90 - 23,6 | |
| 45 - 36,4 | 95 - 22,5 | |
| 50 - 34,9 | 100 - 21,3 | |

$$C_v = 0,03$$

| t [min] - h [cm] | t [min] - h [cm] | t [min] - h [cm] |
|------------------|------------------|------------------|
| 5 - 49,0 | 65 - 36,4 | 125 - 23,7 |
| 10 - 48,0 | 70 - 35,3 | 130 - 22,8 |
| 15 - 47,0 | 75 - 34,3 | 135 - 21,9 |
| 20 - 46,0 | 80 - 33,2 | 140 - 21,0 |
| 25 - 45,0 | 85 - 32,0 | 145 - 20,2 |
| 30 - 43,9 | 90 - 30,9 | 150 - 19,5 |
| 35 - 42,9 | 95 - 29,8 | 155 - 19,4 |
| 40 - 41,8 | 100 - 28,8 | 160 - 19,4 |
| 45 - 40,7 | 105 - 27,7 | |
| 50 - 39,7 | 110 - 26,6 | |
| 55 - 38,6 | 115 - 25,6 | |

$C_v = 0,035$

t [min] - h [cm]

5 - 49,0
 10 - 48,3
 15 - 47,6
 20 - 46,9
 25 - 46,2
 30 - 45,5
 35 - 44,7
 40 - 44,0
 45 - 43,3
 50 - 42,6
 55 - 41,8
 60 - 41,0
 65 - 40,3

t [min] - h [cm]

70 - 39,9
 75 - 38,8
 80 - 38,1
 85 - 37,2
 90 - 36,5
 95 - 35,8
 100 - 35,0
 105 - 34,3
 110 - 33,5
 115 - 32,7
 120 - 32,0
 125 - 31,2
 130 - 30,4

t [min] - h [cm]

135 - 29,6
 140 - 28,8
 145 - 27,9
 150 - 27,1
 155 - 26,3
 160 - 25,3
 165 - 24,5
 170 - 23,6
 175 - 22,6
 180 - 22,2
 185 - 22,1
 190 - 22,1

$C_v = 0,04$

t [min] - h [cm]

5 - 49,5
 10 - 48,9
 15 - 48,4
 20 - 47,8
 25 - 47,3
 30 - 46,8
 35 - 46,2
 40 - 45,6
 45 - 45,0
 50 - 44,5
 55 - 43,9
 60 - 43,3
 65 - 42,7
 70 - 42,1
 75 - 42,1

t [min] - h [cm]

80 - 41,0
 85 - 40,4
 90 - 39,8
 95 - 39,2
 100 - 38,6
 105 - 38,0
 110 - 37,5
 115 - 36,9
 120 - 36,3
 125 - 35,7
 130 - 35,1
 135 - 34,5
 140 - 33,9
 145 - 33,3
 150 - 32,7

t [min] - h [cm]

155 - 32,1
 160 - 31,4
 165 - 30,8
 170 - 30,1
 175 - 29,5
 180 - 28,8
 185 - 28,2
 190 - 27,4
 195 - 26,7
 200 - 26,0
 205 - 25,3
 210 - 25,1
 215 - 25,1

$$C_v = 0,045$$

| t [min] - h [cm] | t [min] - h [cm] | t [min] - h [cm] |
|------------------|------------------|------------------|
| 5 - 49,6 | 80 - 42,8 | 155 - 35,8 |
| 10 - 49,2 | 85 - 42,4 | 160 - 35,3 |
| 15 - 48,7 | 90 - 41,9 | 165 - 34,8 |
| 20 - 48,3 | 95 - 41,4 | 170 - 34,3 |
| 25 - 47,8 | 100 - 41,0 | 175 - 33,8 |
| 30 - 47,3 | 105 - 40,5 | 180 - 33,3 |
| 35 - 46,8 | 110 - 40,0 | 185 - 32,8 |
| 40 - 46,4 | 115 - 39,6 | 190 - 32,3 |
| 45 - 45,9 | 120 - 39,2 | 195 - 31,7 |
| 50 - 45,5 | 125 - 38,7 | 200 - 31,1 |
| 55 - 45,1 | 130 - 38,2 | 205 - 30,5 |
| 60 - 44,6 | 135 - 37,7 | 210 - 29,8 |
| 65 - 44,2 | 140 - 37,2 | 215 - 29,0 |
| 70 - 43,8 | 145 - 36,8 | 220 - 28,3 |
| 75 - 43,3 | 150 - 36,3 | 225 - 28,2 |

$$C_v = 0,05$$

| t [min] - h [cm] | t [min] - h [cm] | t [min] - h [cm] |
|------------------|------------------|------------------|
| 5 - 49,5 | 85 - 43,9 | 195 - 35,8 |
| 10 - 49,2 | 95 - 43,2 | 205 - 35,0 |
| 15 - 48,8 | 105 - 42,5 | 215 - 34,2 |
| 20 - 48,5 | 115 - 41,8 | 225 - 33,3 |
| 25 - 48,2 | 125 - 41,0 | 235 - 32,3 |
| 30 - 47,8 | 135 - 40,3 | 240 - 31,8 |
| 35 - 47,5 | 145 - 39,6 | 245 - 31,1 |
| 45 - 46,8 | 155 - 38,9 | 250 - 30,9 |
| 55 - 46,0 | 165 - 38,2 | 255 - 30,9 |
| 65 - 45,4 | 175 - 37,4 | 260 - 30,9 |
| 75 - 44,6 | 185 - 36,6 | |

$$C_v = 0,055$$

| t [min] - h [cm] | t [min] - h [cm] | t [min] - h [cm] |
|------------------|------------------|------------------|
| 10 - 49,3 | 100 - 43,5 | 190 - 37,4 |
| 20 - 48,8 | 110 - 42,9 | 200 - 36,7 |
| 30 - 48,2 | 120 - 42,2 | 210 - 35,9 |
| 40 - 47,5 | 130 - 41,5 | 220 - 34,9 |
| 50 - 46,8 | 140 - 40,8 | 230 - 34,8 |
| 60 - 46,1 | 150 - 40,1 | 240 - 33,9 |

| | |
|-----------|------------|
| 70 - 45,4 | 160 - 39,5 |
| 80 - 44,8 | 170 - 38,8 |
| 90 - 44,2 | 180 - 38,1 |

$$C_v = 0,06$$

| t [min] - h [cm] | t [min] - h [cm] | t [min] - h [cm] |
|------------------|------------------|------------------|
| 10 - 49,5 | 80 - 45,4 | 150 - 41,1 |
| 20 - 48,9 | 90 - 44,8 | 160 - 40,5 |
| 30 - 48,5 | 100 - 44,2 | 170 - 39,8 |
| 40 - 47,9 | 110 - 43,6 | 180 - 39,0 |
| 50 - 47,2 | 120 - 43,0 | 190 - 38,2 |
| 60 - 46,6 | 130 - 42,4 | 200 - 37,2 |
| 70 - 46,0 | 140 - 41,8 | 210 - 36,8 |

$$C_v = 0,065$$

| t [min] - h [cm] | t [min] - h [cm] | t [min] - h [cm] |
|------------------|------------------|------------------|
| 10 - 49,6 | 70 - 46,5 | 130 - 43,2 |
| 20 - 49,1 | 80 - 45,9 | 140 - 42,6 |
| 30 - 48,6 | 90 - 45,4 | 150 - 41,9 |
| 40 - 48,2 | 100 - 45,0 | 160 - 41,1 |
| 50 - 47,8 | 110 - 44,5 | 170 - 40,3 |
| 60 - 47,2 | 120 - 43,8 | 180 - 39,4 |

$$C_v = 0,07$$

| t [min] - h [cm] | t [min] - h [cm] |
|------------------|------------------|
| 10 - 49,5 | 100 - 45,5 |
| 20 - 49,2 | 110 - 45,0 |
| 30 - 48,5 | 120 - 44,4 |
| 40 - 48,0 | 130 - 43,9 |
| 50 - 47,6 | 140 - 43,1 |
| 60 - 47,4 | 150 - 42,5 |
| 70 - 46,9 | 160 - 41,9 |
| 80 - 46,5 | 170 - 41,5 |
| 90 - 46,0 | |

Zalacznik III tabl. 1

$l_e = 5.03E-06m$ $l_{Brown} = 9.53E-01m$ $l_{max} = 6.00E-05m$

| w | epsilon | le1 | b1 | le2 | b2 | le3 | b3 | le4 | b4 |
|--------|---------|-----|-------|-----|-------|------|-------|------|-------|
| 0.8596 | 0.990 | 9.7 | 48.3 | 9.8 | 48.6 | 10.0 | 49.9 | 10.2 | 50.8 |
| 0.2734 | 0.979 | 5.5 | 8.3 | 5.5 | 9.3 | 5.9 | 14.1 | 6.1 | 17.1 |
| 0.1493 | 0.969 | 4.1 | -24.1 | 4.1 | -22.1 | 4.5 | -12.5 | 4.7 | -6.4 |
| 0.0966 | 0.958 | 3.3 | -54.2 | 3.3 | -50.9 | 3.7 | -35.2 | 4.0 | -25.4 |

Zalacznik III tabl. 2

 $1e = 8.42E-06m$ $1 \text{ Browna} = 4.81E-07m$ $1 \text{ max} = 6.00E-05m$

| w | epsilon | 1e1 | b1 | 1e2 | b2 | 1e3 | b3 | 1e4 | b4 |
|--------|---------|------|--------|------|--------|------|-------|------|-------|
| 2.0300 | 0.989 | 16.2 | 48.0 | 16.3 | 48.3 | 16.7 | 49.7 | 17.1 | 50.6 |
| 1.6200 | 0.987 | 14.5 | 41.8 | 14.6 | 42.2 | 15.1 | 44.1 | 15.4 | 45.3 |
| 1.2000 | 0.985 | 12.5 | 32.4 | 12.6 | 32.9 | 13.0 | 35.4 | 13.4 | 37.0 |
| 0.5600 | 0.980 | 8.5 | 1.0 | 8.6 | 2.0 | 9.1 | 7.1 | 9.4 | 10.3 |
| 0.1500 | 0.961 | 4.4 | -91.2 | 4.5 | -87.4 | 5.0 | -69.2 | 5.3 | -57.8 |
| 0.4750 | 0.980 | 7.8 | -7.5 | 7.9 | -6.4 | 8.3 | -1.0 | 8.6 | 2.4 |
| 0.3840 | 0.975 | 7.0 | -19.5 | 7.1 | -18.0 | 7.5 | -10.6 | 8.0 | -5.9 |
| 0.3070 | 0.970 | 6.3 | -33.7 | 6.4 | -31.7 | 6.9 | -21.3 | 7.3 | -15.5 |
| 0.2196 | 0.965 | 5.3 | -58.1 | 5.4 | -55.3 | 5.9 | -41.7 | 6.3 | -33.3 |
| 0.1730 | 0.960 | 4.7 | -78.1 | 4.8 | -74.5 | 5.4 | -57.2 | 5.8 | -46.4 |
| 0.1403 | 0.955 | 4.3 | -97.7 | 4.4 | -93.2 | 4.9 | -71.8 | 5.3 | -58.6 |
| 0.1140 | 0.950 | 3.8 | -119.4 | 3.9 | -113.8 | 4.5 | -87.7 | 4.9 | -71.6 |

Zalacznik III tabl. 3

le = 5.17E-06m l Browna = 4.75E-07m l max = 6.00E-05m

| w | epsilon | le1 | b1 | le2 | b2 | le3 | b3 | le4 | b4 |
|--------|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1.0700 | 0.990 | 11.6 | 55.3 | 11.6 | 55.6 | 12.0 | 56.8 | 12.2 | 57.5 |
| 0.8400 | 0.988 | 10.3 | 49.6 | 10.3 | 49.9 | 10.7 | 51.5 | 10.9 | 52.5 |
| 0.6600 | 0.986 | 9.1 | 43.1 | 9.2 | 43.6 | 9.5 | 45.6 | 9.8 | 47.0 |
| 0.5000 | 0.984 | 7.9 | 34.7 | 8.0 | 35.2 | 8.3 | 37.9 | 8.6 | 39.6 |
| 0.3000 | 0.980 | 6.1 | 15.7 | 6.2 | 16.5 | 6.5 | 20.8 | 6.8 | 23.5 |

Zalacznik III tabl. 4

$l_e = 7.86E-06m$ $l_{Brown} = 4.81E-07m$ $l_{max} = 6.00E-05m$

| w | epsilon | le1 | b1 | le2 | b2 | le3 | b3 | le4 | b4 |
|--------|---------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|
| 0.6144 | 0.981 | 8.9 | 11.9 | 9.0 | 12.7 | 9.5 | 17.0 | 9.8 | 19.7 |
| 0.5058 | 0.978 | 8.1 | 2.9 | 8.2 | 4.0 | 8.7 | 9.3 | 9.0 | 12.8 |
| 0.3522 | 0.974 | 6.7 | -16.4 | 6.8 | -14.9 | 7.3 | -7.4 | 7.7 | -2.5 |
| 0.2802 | 0.971 | 6.0 | -30.5 | 6.1 | -28.6 | 6.6 | -19.3 | 6.9 | -13.4 |
| 0.1272 | 0.962 | 4.1 | -93.7 | 4.1 | -89.9 | 4.6 | -71.8 | 4.9 | -60.5 |
| 0.0840 | 0.952 | 3.3 | -138.3 | 3.4 | -132.5 | 3.8 | -105.1 | 4.2 | -82.1 |
| 0.0624 | 0.942 | 2.8 | -176.5 | 2.9 | -168.4 | 3.4 | -130.8 | 3.8 | -107.9 |
| 0.0564 | 0.933 | 2.7 | -190.9 | 2.8 | -180.9 | 3.3 | -135.5 | 3.8 | -108.2 |
| 0.0486 | 0.923 | 2.5 | -213.3 | 2.6 | -201.0 | 3.2 | -145.1 | 3.7 | -113.5 |
| 0.0408 | 0.913 | 2.3 | -242.0 | 2.4 | -226.8 | 3.0 | -160.4 | 3.5 | -121.5 |
| 0.0198 | 0.904 | 1.6 | -390.9 | 1.7 | -366.6 | 2.2 | -262.3 | 2.6 | -201.9 |

Załącznik III tabl. 5

 $l_e = 8.27E-06m$ $l_{Brown} = 4.81E-07m$ $l_{max} = 6.00E-05m$

| w | epsilon | le1 | b1 | le2 | b2 | le3 | b3 | le4 | b4 |
|--------|---------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|
| 0.5844 | 0.981 | 8.7 | 4.9 | 8.8 | 5.8 | 9.2 | 10.3 | 9.5 | 13.1 |
| 0.4440 | 0.979 | 7.6 | -9.1 | 7.7 | -7.9 | 8.1 | -2.1 | 8.4 | 1.7 |
| 0.3450 | 0.975 | 6.7 | -23.7 | 6.8 | -22.2 | 7.2 | -14.5 | 7.5 | -9.6 |
| 0.2556 | 0.972 | 5.7 | -43.8 | 5.8 | -41.8 | 6.3 | -31.8 | 6.6 | -25.5 |
| 0.0882 | 0.954 | 3.4 | -144.7 | 3.5 | -139.0 | 3.9 | -111.7 | 4.2 | -94.8 |
| 0.0576 | 0.935 | 2.7 | -202.9 | 2.8 | -192.8 | 3.3 | -147.0 | 3.8 | -119.4 |
| 0.0438 | 0.926 | 2.4 | -247.3 | 2.5 | -234.1 | 3.0 | -175.1 | 3.4 | -139.8 |
| 0.0366 | 0.916 | 2.2 | -279.9 | 2.3 | -263.7 | 2.8 | -192.1 | 3.3 | -150.0 |
| 0.0174 | 0.907 | 1.5 | -451.0 | 1.6 | -424.8 | 2.0 | -311.3 | 2.4 | -245.2 |

Zalacznik III tabl. 6

 $l_e = 9.33E-06m$ $l_{Brown} = 4.81E-07m$ $l_{max} = 6.00E-05m$

| w | epsilon | le1 | b1 | le2 | b2 | le3 | b3 | le4 | b4 |
|--------|---------|------|--------|------|--------|------|--------|------|--------|
| 0.7854 | 0.984 | 10.1 | 7.4 | 10.2 | 8.1 | 10.6 | 11.9 | 10.9 | 14.2 |
| 0.6048 | 0.981 | 8.8 | -5.5 | 8.9 | -4.5 | 9.4 | 0.5 | 9.7 | 3.7 |
| 0.4662 | 0.978 | 7.8 | -20.2 | 7.9 | -18.9 | 8.3 | -12.4 | 8.6 | -8.2 |
| 0.3486 | 0.975 | 6.7 | -39.0 | 6.8 | -37.2 | 7.3 | -28.4 | 7.6 | -22.8 |
| 0.2880 | 0.972 | 6.1 | -52.9 | 6.2 | -50.7 | 6.7 | -40.0 | 7.0 | -33.3 |
| 0.1626 | 0.962 | 4.6 | -103.5 | 4.7 | -99.6 | 5.2 | -81.0 | 5.5 | -69.3 |
| 0.1038 | 0.953 | 3.7 | -154.7 | 3.8 | -148.6 | 4.2 | -119.9 | 4.6 | -102.2 |
| 0.0708 | 0.943 | 3.0 | -208.4 | 3.1 | -199.6 | 3.6 | -158.4 | 4.0 | -133.3 |
| 0.0696 | 0.934 | 3.0 | -211.1 | 3.1 | -200.6 | 3.7 | -153.0 | 4.2 | -124.3 |
| 0.0642 | 0.925 | 2.9 | -223.9 | 3.0 | -211.4 | 3.6 | -155.7 | 4.2 | -122.5 |
| 0.0468 | 0.915 | 2.5 | -279.3 | 2.6 | -262.9 | 3.2 | -190.6 | 3.8 | -148.0 |

Zalacznik III tabl. 7

le = 8.42E-06m l Browna = 4.81E-07m l max = 6.00E-05m

| w | epsilon | le1 | b1 | le2 | b2 | le3 | b3 | le4 | b4 |
|--------|---------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|
| 0.4926 | 0.961 | 8.0 | -5.4 | 8.1 | -4.4 | 8.5 | 0.7 | 8.8 | 4.0 |
| 0.3660 | 0.978 | 6.9 | -22.3 | 7.0 | -21.0 | 7.4 | -14.2 | 7.7 | -9.9 |
| 0.2880 | 0.974 | 6.1 | -37.9 | 6.2 | -36.1 | 6.6 | -27.2 | 6.9 | -21.6 |
| 0.2280 | 0.971 | 5.4 | -55.0 | 5.5 | -52.7 | 5.9 | -41.7 | 6.2 | -34.7 |
| 0.1272 | 0.962 | 4.1 | -107.5 | 4.1 | -103.5 | 4.6 | -84.1 | 4.9 | -71.9 |
| 0.0894 | 0.952 | 3.4 | -147.5 | 3.5 | -141.5 | 4.0 | -113.0 | 4.3 | -95.4 |
| 0.0654 | 0.942 | 2.9 | -189.4 | 3.0 | -180.9 | 3.5 | -141.6 | 3.9 | -117.6 |
| 0.0498 | 0.933 | 2.5 | -231.6 | 2.6 | -220.3 | 3.1 | -168.5 | 3.5 | -137.4 |
| 0.0498 | 0.923 | 2.5 | -231.6 | 2.6 | -218.6 | 3.2 | -160.5 | 3.7 | -125.9 |
| 0.0468 | 0.913 | 2.5 | -242.1 | 2.6 | -226.9 | 3.2 | -160.5 | 3.8 | -121.6 |
| 0.0384 | 0.904 | 2.2 | -277.7 | 2.3 | -259.0 | 3.0 | -178.8 | 3.6 | -132.3 |

Zalacznik III tabl. 8

$1e = 7.88E-06m$ 1 Browna = $4.81E-07m$ 1 max = $4.00E-05m$

| w | epsilon | 1e1 | b1 | 1e2 | b2 | 1e3 | b3 | 1e4 | b4 |
|--------|---------|-----|--------|-----|--------|------|--------|------|--------|
| 0.7143 | 0.985 | 9.6 | 18.0 | 9.7 | 18.6 | 10.1 | 21.7 | 10.3 | 23.7 |
| 0.4800 | 0.980 | 7.9 | -0.0 | 8.0 | 1.0 | 8.4 | 6.0 | 9.7 | 9.2 |
| 0.3031 | 0.975 | 6.3 | -25.8 | 6.3 | -24.3 | 6.8 | -16.4 | 7.1 | -11.5 |
| 0.2122 | 0.970 | 5.2 | -50.4 | 5.3 | -48.1 | 5.8 | -37.0 | 6.1 | -30.0 |
| 0.1500 | 0.965 | 4.4 | -78.9 | 4.5 | -75.7 | 4.9 | -60.4 | 5.2 | -50.8 |
| 0.1129 | 0.960 | 3.8 | -106.2 | 3.9 | -102.0 | 4.3 | -82.0 | 4.6 | -69.6 |
| 0.0909 | 0.955 | 3.4 | -129.8 | 3.5 | -124.6 | 3.9 | -99.7 | 4.3 | -84.3 |
| 0.0715 | 0.950 | 3.0 | -159.0 | 3.1 | -152.5 | 3.6 | -121.6 | 3.9 | -102.6 |
| 0.0650 | 0.945 | 2.9 | -171.8 | 3.0 | -164.2 | 3.4 | -128.9 | 3.8 | -107.3 |
| 0.0500 | 0.940 | 2.5 | -209.9 | 2.6 | -200.4 | 3.1 | -156.9 | 3.4 | -130.4 |
| 0.0467 | 0.935 | 2.5 | -220.7 | 2.5 | -210.1 | 3.0 | -161.7 | 3.4 | -132.4 |
| 0.0500 | 0.930 | 2.5 | -209.9 | 2.6 | -198.8 | 3.2 | -148.9 | 3.6 | -118.9 |

Zalacznik III tabl. 9

le = 7.57E-06m l Browna = 6.37E-07m l max = 4.00E-05m

| w | epsilon | le1 | b1 | le2 | b2 | le3 | b3 | le4 | b4 |
|--------|---------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|
| 0.1023 | 0.975 | 7.1 | -7.2 | 7.2 | -5.9 | 7.6 | 0.8 | 8.0 | 5.0 |
| 0.0763 | 0.970 | 6.1 | -24.2 | 6.2 | -22.3 | 6.7 | -13.1 | 7.1 | -7.3 |
| 0.0585 | 0.965 | 5.3 | -41.8 | 5.4 | -39.3 | 6.0 | -27.2 | 6.3 | -19.6 |
| 0.0432 | 0.960 | 4.6 | -64.9 | 4.7 | -61.6 | 5.2 | -45.6 | 5.6 | -35.6 |
| 0.0342 | 0.955 | 4.1 | -85.5 | 4.2 | -81.3 | 4.7 | -61.2 | 5.1 | -48.8 |
| 0.0262 | 0.950 | 3.6 | -112.1 | 3.7 | -106.7 | 4.2 | -81.4 | 4.6 | -65.9 |
| 0.0241 | 0.945 | 3.4 | -120.7 | 3.5 | -114.6 | 4.1 | -85.9 | 4.5 | -68.4 |
| 0.0198 | 0.940 | 3.1 | -144.1 | 3.2 | -136.6 | 3.7 | -102.3 | 4.2 | -81.5 |
| 0.0160 | 0.935 | 2.8 | -170.9 | 2.9 | -161.9 | 3.4 | -121.0 | 3.9 | -96.3 |
| 0.0146 | 0.930 | 2.7 | -184.0 | 2.8 | -173.9 | 3.3 | -128.1 | 3.8 | -100.6 |

Zalacznik IV tab.1

$w_0 = 0.0570 \text{ cm/min}$ $l_e = 2.79 \text{ E-}06 \text{ m}$
 $V/F/L = 2.9510$ $ROS/ROC = 2.4950$

| Lp | EPS | K° | w |
|----|--------|--------|--------|
| 1 | 0.9899 | 3.1832 | 0.8596 |
| 2 | 0.9792 | 4.7040 | 0.2734 |
| 3 | 0.9685 | 5.5035 | 0.1493 |
| 4 | 0.9578 | 6.1398 | 0.0966 |

Zalacznik IV tab.2

$w_0 = 0.1275 \text{ cm/min}$ $l_e = 4.52 \text{ E-}06 \text{ m}$
 $V/F/L = 5.5727$ $ROS/ROC = 2.2723$

| Lp | EPS | K° | w |
|----|--------|--------|--------|
| 1 | 0.9893 | 2.8423 | 2.0300 |
| 2 | 0.9873 | 2.9826 | 1.6200 |
| 3 | 0.9852 | 3.4332 | 1.2000 |
| 4 | 0.9796 | 5.2468 | 0.5600 |
| 5 | 0.9607 | 9.5907 | 0.1500 |
| 6 | 0.9800 | 6.3172 | 0.4750 |
| 7 | 0.9750 | 6.1562 | 0.3840 |
| 8 | 0.9700 | 6.3187 | 0.3070 |
| 9 | 0.9650 | 7.4551 | 0.2196 |
| 10 | 0.9600 | 8.1522 | 0.1730 |
| 11 | 0.9550 | 8.7965 | 0.1403 |
| 12 | 0.9500 | 9.5910 | 0.1140 |

Zalacznik IV tab.3

$w_0 = 0.0485\text{cm/min}$ $1e = 2.75E-06m$

$V/F/L = 2.9702$ $FOS/ROC = 2.3123$

| Lp | EPS | K° | w |
|----|--------|--------|--------|
| 1 | 0.9896 | 2.1112 | 1.0700 |
| 2 | 0.9876 | 2.2419 | 0.8400 |
| 3 | 0.9856 | 2.4422 | 0.6600 |
| 4 | 0.9837 | 2.8314 | 0.5000 |
| 5 | 0.9798 | 3.7628 | 0.3000 |

Zalacznik IV tab.4

$w_0 = 0.2282\text{cm/min}$ $1e = 6.05E-06m$

$V/F/L = 5.1903$ $FOS/ROC = 2.2723$

| Lp | EPS | K° | w |
|----|--------|---------|--------|
| 1 | 0.9807 | 9.0775 | 0.6144 |
| 2 | 0.9778 | 9.5014 | 0.5058 |
| 3 | 0.9740 | 11.5155 | 0.3522 |
| 4 | 0.9711 | 12.9060 | 0.2802 |
| 5 | 0.9615 | 20.7142 | 0.1272 |
| 6 | 0.9518 | 24.3040 | 0.0840 |
| 7 | 0.9422 | 26.4658 | 0.0624 |
| 8 | 0.9326 | 24.3509 | 0.0564 |
| 9 | 0.9230 | 23.9798 | 0.0486 |
| 10 | 0.9133 | 24.5770 | 0.0408 |
| 11 | 0.9035 | 44.0514 | 0.0198 |

Zalacznik IV tab.5

$w_0 = 0.2987 \text{ cm/min}$ $l_e = 6.92 \text{ E-}06 \text{ m}$
 $V/F/L = 4.8308$ $ROS/ROC = 2.2723$

| L_p | EPS | K^0 | w |
|-------|--------|---------|--------|
| 1 | 0.9814 | 12.9358 | 0.5844 |
| 2 | 0.9786 | 14.7290 | 0.4440 |
| 3 | 0.9749 | 15.9787 | 0.3450 |
| 4 | 0.9721 | 19.2363 | 0.2556 |
| 5 | 0.9535 | 31.5642 | 0.0882 |
| 6 | 0.9349 | 32.5422 | 0.0576 |
| 7 | 0.9256 | 36.3394 | 0.0438 |
| 8 | 0.9163 | 37.5026 | 0.0366 |
| 9 | 0.9070 | 68.8564 | 0.0174 |

Zalacznik IV tab.6

$w_0 = 0.2996 \text{ cm/min}$ $l_e = 6.93 \text{ E-}06 \text{ m}$
 $V/F/L = 6.5730$ $ROS/ROC = 2.2723$

| L_p | EPS | K^0 | w |
|-------|--------|---------|--------|
| 1 | 0.9841 | 11.4338 | 0.7854 |
| 2 | 0.9811 | 12.3774 | 0.6048 |
| 3 | 0.9783 | 13.8659 | 0.4662 |
| 4 | 0.9745 | 15.5970 | 0.3486 |
| 5 | 0.9717 | 16.8648 | 0.2880 |
| 6 | 0.9623 | 21.7787 | 0.1626 |
| 7 | 0.9529 | 26.5147 | 0.1038 |
| 8 | 0.9434 | 31.3907 | 0.0708 |
| 9 | 0.9340 | 26.5736 | 0.0696 |
| 10 | 0.9246 | 24.4635 | 0.0642 |
| 11 | 0.9151 | 28.8945 | 0.0468 |

Zalacznik IV tab.7

$w_0 = 0.2149 \text{ cm/min}$ $l_e = 5.871 \cdot 10^{-6} \text{ m}$

$V/F/L = 5.8952$ $RCS/RCC = 2.2723$

| L_0 | EPS | K^0 | w |
|-------|--------|---------|--------|
| 1 | 0.9807 | 10.6609 | 0.4926 |
| 2 | 0.9778 | 12.3638 | 0.3660 |
| 3 | 0.9740 | 13.2601 | 0.2880 |
| 4 | 0.9711 | 14.9346 | 0.2280 |
| 5 | 0.9615 | 19.5045 | 0.1272 |
| 6 | 0.9518 | 21.5024 | 0.0894 |
| 7 | 0.9422 | 23.7771 | 0.0654 |
| 8 | 0.9326 | 25.9676 | 0.0498 |
| 9 | 0.9230 | 22.0354 | 0.0498 |
| 10 | 0.9133 | 20.1749 | 0.0468 |
| 11 | 0.9035 | 21.3875 | 0.0384 |

Zalacznik IV tab.8

$w_0 = 0.2132 \text{ cm/min}$

$l_e = 5.85E-06 \text{ m}$

$V/F/L = 5.1054$

$ROS/RGC = 2.2723$

| Lp | EPS | R^o | w |
|----|--------|---------|--------|
| 1 | 0.9850 | 9.5060 | 0.7143 |
| 2 | 0.9800 | 10.4489 | 0.4800 |
| 3 | 0.9750 | 13.0362 | 0.3031 |
| 4 | 0.9700 | 15.2796 | 0.2122 |
| 5 | 0.9650 | 18.2426 | 0.1500 |
| 6 | 0.9600 | 20.8796 | 0.1129 |
| 7 | 0.9550 | 22.6908 | 0.0909 |
| 8 | 0.9500 | 25.5455 | 0.0715 |
| 9 | 0.9450 | 25.1584 | 0.0650 |
| 10 | 0.9400 | 29.5070 | 0.0500 |
| 11 | 0.9350 | 28.7175 | 0.0467 |
| 12 | 0.9300 | 24.4931 | 0.0500 |

Zalacznik IV tab.9

$w_0 = 0.0566 \text{ cm/min}$ $l_e = 5.85E-06 \text{ m}$

$V/F/L = 5.1054$ $POS/POC = 2.0835$

| I_p | EPS | R° | w |
|-------|--------|-----------|--------|
| 1 | 0.9750 | 10.2498 | 0.1023 |
| 2 | 0.9700 | 11.2842 | 0.0763 |
| 3 | 0.9650 | 12.4172 | 0.0585 |
| 4 | 0.9600 | 14.4672 | 0.0432 |
| 5 | 0.9550 | 16.0202 | 0.0342 |
| 6 | 0.9500 | 18.5458 | 0.0262 |
| 7 | 0.9450 | 17.9767 | 0.0241 |
| 8 | 0.9400 | 19.8235 | 0.0198 |
| 9 | 0.9350 | 22.1873 | 0.0160 |
| 10 | 0.9300 | 22.2899 | 0.0146 |

Zalacznik V tab.1

$w_0 = 0.0248 \text{ cm/min}$ $l_e = 1.84 \text{ E-}06 \text{ m}$

$V/F/L = 2.9510$ $ROS/ROC = 2.4950$

| Lp | EPS | K ^o | w |
|----|--------|----------------|--------|
| 1 | 0.9899 | 1.3876 | 0.8596 |
| 2 | 0.9792 | 2.0505 | 0.2734 |
| 3 | 0.9685 | 2.3990 | 0.1493 |
| 4 | 0.9578 | 2.6764 | 0.0966 |

Zalacznik V tab.2

$w_0 = 0.0426 \text{ cm/min}$ $l_e = 2.61 \text{ E-}06 \text{ m}$

$V/F/L = 5.5727$ $ROS/POC = 2.2723$

| Lp | EPS | K ^o | w |
|----|--------|----------------|--------|
| 1 | 0.9893 | 0.9491 | 2.0300 |
| 2 | 0.9873 | 0.9960 | 1.6200 |
| 3 | 0.9852 | 1.1464 | 1.2000 |
| 4 | 0.9796 | 1.7520 | 0.5600 |
| 5 | 0.9607 | 3.2026 | 0.1500 |
| 6 | 0.9800 | 2.1095 | 0.4750 |
| 7 | 0.9750 | 2.0557 | 0.3840 |
| 8 | 0.9700 | 2.1100 | 0.3070 |
| 9 | 0.9650 | 2.4894 | 0.2196 |
| 10 | 0.9600 | 2.7222 | 0.1730 |
| 11 | 0.9550 | 2.9374 | 0.1403 |
| 12 | 0.9500 | 3.2027 | 0.1140 |

Zalacznik V tab.3

$w_0 = 0.0211\text{cm/min}$ $1e = 1.81E-06\text{m}$

$V/F/L = 2.9702$ $POS/POC = 2.3123$

| Lp | EPS | K° | w |
|----|--------|--------|--------|
| 1 | 0.9896 | 0.9204 | 1.0700 |
| 2 | 0.9876 | 0.9773 | 0.8400 |
| 3 | 0.9856 | 1.0646 | 0.6600 |
| 4 | 0.9837 | 1.2343 | 0.5000 |
| 5 | 0.9798 | 1.6403 | 0.3000 |

Zalacznik V tab.4

$w_0 = 0.0771\text{cm/min}$ $1e = 3.52E-06\text{m}$

$V/F/L = 5.1903$ $POS/POC = 2.2723$

| Lp | EPS | K° | w |
|----|--------|---------|--------|
| 1 | 0.9807 | 3.0650 | 0.6144 |
| 2 | 0.9778 | 3.2081 | 0.5058 |
| 3 | 0.9740 | 3.8882 | 0.3522 |
| 4 | 0.9711 | 4.3577 | 0.2802 |
| 5 | 0.9615 | 6.9941 | 0.1272 |
| 6 | 0.9518 | 8.2062 | 0.0840 |
| 7 | 0.9422 | 8.9361 | 0.0624 |
| 8 | 0.9326 | 8.2220 | 0.0564 |
| 9 | 0.9230 | 8.0968 | 0.0486 |
| 10 | 0.9133 | 8.2984 | 0.0408 |
| 11 | 0.9035 | 14.8739 | 0.0198 |

Zalacznik V tab.5

$w_0 = 0.1032\text{cm/min}$ $l_e = 4.07E-06\text{m}$

$V/F/T_1 = 4.8308$ $ROS/ROC = 2.2723$

| Lp | EPS | K° | w |
|----|--------|---------|--------|
| 1 | 0.9814 | 4.4853 | 0.5844 |
| 2 | 0.9786 | 5.0874 | 0.4440 |
| 3 | 0.9749 | 5.5191 | 0.3450 |
| 4 | 0.9721 | 6.6443 | 0.2556 |
| 5 | 0.9535 | 10.9024 | 0.0882 |
| 6 | 0.9349 | 11.2402 | 0.0576 |
| 7 | 0.9256 | 12.5517 | 0.0438 |
| 8 | 0.9163 | 12.9535 | 0.0366 |
| 9 | 0.9070 | 23.7832 | 0.0174 |

Zalacznik V tab.6

$w_0 = 0.0905\text{cm/min}$ $l_e = 3.81E-06\text{m}$

$V/F/L = 6.5730$ $ROS/ROC = 2.2723$

| Lp | EPS | K° | w |
|----|--------|--------|--------|
| 1 | 0.9841 | 3.4535 | 0.7854 |
| 2 | 0.9811 | 3.7385 | 0.6048 |
| 3 | 0.9783 | 4.1881 | 0.4662 |
| 4 | 0.9745 | 4.7110 | 0.3486 |
| 5 | 0.9717 | 5.0939 | 0.2830 |
| 6 | 0.9623 | 6.5782 | 0.1626 |
| 7 | 0.9529 | 8.0086 | 0.1038 |
| 8 | 0.9434 | 9.4814 | 0.0708 |
| 9 | 0.9340 | 8.0264 | 0.0696 |
| 10 | 0.9246 | 7.3891 | 0.0642 |
| 11 | 0.9151 | 8.7274 | 0.0468 |

Zalacznik V tab.7

$w_0 = 0.0684 \text{ cm/min}$

$l_e = 3.31E-06 \text{ m}$

$V/F/L = 5.8952$

$ROS/ROC = 2.2723$

| L_p | EPS | K^0 | w |
|-------|--------|--------|--------|
| 1 | 0.9807 | 3.3928 | 0.4926 |
| 2 | 0.9778 | 3.9347 | 0.3660 |
| 3 | 0.9740 | 4.2200 | 0.2880 |
| 4 | 0.9711 | 4.7529 | 0.2280 |
| 5 | 0.9615 | 6.2072 | 0.1272 |
| 6 | 0.9518 | 6.8431 | 0.0894 |
| 7 | 0.9422 | 7.5670 | 0.0654 |
| 8 | 0.9326 | 8.2641 | 0.0498 |
| 9 | 0.9230 | 7.0127 | 0.0498 |
| 10 | 0.9133 | 6.4206 | 0.0468 |
| 11 | 0.9035 | 6.8065 | 0.0384 |

Zalacznik V tab.8

$w_0 = 0.0709 \text{ cm/min}$ $1e = 3.37E-06 \text{ m}$

$V/F/L = 5.1054$ $ROS/ROC = 2.2723$

| Lp | EPS | K° | w |
|----|--------|--------|--------|
| 1 | 0.9850 | 3.1609 | 0.7143 |
| 2 | 0.9800 | 3.4744 | 0.4800 |
| 3 | 0.9750 | 4.3348 | 0.3031 |
| 4 | 0.9700 | 5.0807 | 0.2122 |
| 5 | 0.9650 | 6.0660 | 0.1500 |
| 6 | 0.9600 | 6.9428 | 0.1129 |
| 7 | 0.9550 | 7.5451 | 0.0909 |
| 8 | 0.9500 | 8.4943 | 0.0715 |
| 9 | 0.9450 | 8.3656 | 0.0650 |
| 10 | 0.9400 | 9.8116 | 0.0500 |
| 11 | 0.9350 | 9.5491 | 0.0467 |
| 12 | 0.9300 | 8.1444 | 0.0500 |

Zalacznik V tab.9

$$w_0 = 0.0188 \text{ cm/mir}$$

$$l_e = 3.37E-06 \text{ m}$$

$$V/F/L = 5.1054$$

$$ROS/ROC = 2.0835$$

| Lr | EPS | R ^o | w |
|----|--------|----------------|--------|
| 1 | 0.9750 | 3.4082 | 0.1023 |
| 2 | 0.9700 | 3.7522 | 0.0763 |
| 3 | 0.9650 | 4.1289 | 0.0585 |
| 4 | 0.9600 | 4.8106 | 0.0432 |
| 5 | 0.9550 | 5.3270 | 0.0342 |
| 6 | 0.9500 | 6.1668 | 0.0262 |
| 7 | 0.9450 | 5.9776 | 0.0241 |
| 8 | 0.9400 | 6.5917 | 0.0198 |
| 9 | 0.9350 | 7.3777 | 0.0160 |
| 10 | 0.9300 | 7.4118 | 0.0146 |

Załącznik VI

Dane z pracy [38]

Prędkość opadania w [cm/min] w funkcji średnicy naczyńis sedimentacyjnego D

| D [cm] | $v_v=0,015$ | 0,02 | 0,025 | 0,03 | 0,035 | 0,04 | 0,045 | 0,05 | 0,10 | 0,15 | 0,20 | 0,25 |
|-----------|-------------|------|--------|--------|-------|--------|-------|-------|-------|--------|---------|---------|
| 3,7 | 3,41667 | 3,25 | 2,75 | 2,71 | 2,14 | 1,745 | 1,77 | 1,51 | 0,359 | 0,1923 | 0,1071 | 0,06667 |
| 36 | 3,9 | 3,2 | 2,9167 | 2,3657 | | 1,975 | 2,114 | 1,778 | 0,350 | 0,1625 | 0,09667 | |
| 92 | | | | | 0,5 | 0,4167 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,225 | 0,2083 | |

