GÓRNICTWO z. 53

JÓZEF SÓWKA

P. 3351/72

ODWADNIANIE MUŁÓW WĘGLOWYCH NA PRZESIEWACZU O RUCHU LINIOWYM

POLITECHNIKA ŚLĄSKA
ZESZYT NAUKOWY Nr 335 – GLIWICE 1972

POLITECHNIKA ŚLĄSKA

ZESZYTY NAUKOWE

Nr 335

P. 3351/72

POLITECHNIKA ŚLĄSKA Biblioteka Główna w Gliwicach

JÓZEF SOWKA

ODWADNIANIE MUŁÓW WĘGLOWYCH NA PRZESIEWACZU O RUCHU LINIOWYM

PRACA HABILITACYJNA Nr 116

(SKRÓT)

Data otwarcia przewodu habilitacyjnego 6 marca 1972 r.

GLIWICE 1972

REDAKTOR NACZELNY ZESZYTÓW NAUKOWYCH
POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ

Iwo Pollo

REDAKTOR DZIAŁU

Jerzy Nawrocki

SEKRETARZ REDAKCJI

Witold Gużkowski

Dział Wydawnictw Politechniki Śląskiej
Gliwice, ul. Kujawska 2

Nakł. 50+170 Ark. wyd. 7 Ark. druk. 8,75 Papier offsetowy kl. III, 70×100, 80 g
Oddano do druku 16. 3. 1972 Podpis. do druku 22. 4. 1972 Druk ukończono w maju 1972
Zam. 379 17. 3. 1972 R-23 Cena zł 9,—

Skład, fotokopie, druk i oprawę
wykonano w Zakładzie Graficznym Politechniki Śląskiej w Gliwicach

SPIS TREŚCI

Str.

Wstęp 5

1. Teoria odwadniania na przesiewaczach 7

1.1. Przepływ cieczy przez warstwę porowatą 7

1.2. Zjawiska warunkujące zatrzymywanie cieczy w warstwie porowatej 15

1.3. Zasadnicze czynniki procesu odwadniania na przesiewaczach 34

2. Technika pomiarów odwadniania 49

3. Metodyka badań i opisywania wyników doświadczeń 52

4. Charakterystyka materiałów użytych do badań 55

5. Ocena stopnia istotności parametrów procesu odwadniania ... 59

6. Odwadnianie zawiesin jako funkcja skoku i częstości wahań sita 65

6.1. Zmiana zagęszczenia zawiesiny jako $f(s_o,n)$ oraz $f(K_v)$ 66

6.2. Odzyskiwanie części stałych jako $f(s_o,n)$ oraz $f(K_v)$. 79

7. Odwadnianie mułu jako funkcja zagęszczenia początkowego zawiesiny, grubości warstwy na sicie i czasu trwania drgań .. 93

7.1. Zmiana zagęszczenia zawiesiny jako $f(c_o,h,t)$ 93

7.2. Odzyskiwanie części stałych jako $f(c_o,h,t)$ 105

8. Odwadnianie zawiesin jako funkcja składu ziarnowego 118

9. Podsumowanie 124

10. Wnioski 129

Spis literatury 131

Wstęp

Współczesne metody urabiania i transportu węgla pod ziemią stały się przyczyną występowania w urobku coraz większych ilości drobnych ziarn. Urobek wydobyty na powierzchnię i poddany wstępnej klasyfikacji zostaje skierowany do wzbogacania, które opiera się głównie na metodach mokrych. Niezależnie od przyjętej technologii wzbogacania, do wody dostaje się znaczna ilość najdrobniejszych ziarn, które powinny być w najwyższym stopniu z niej wydzielone, celem wtórnego użycia wody do procesu przeróbczego. Uławianie tych ziarn odbywa się na drodze zagęszczania zawiesin w osadnikach lub hydrocyklonach do możliwie wysokich koncentracji części stałych oraz odwodnienie ich na sitach stałych, przesiewaczach i wirówkach sitowych lub gdy ziarna są bardzo drobne na urządzeniach filtracyjnych albo w wirówkach bezsitowych.

Urządzenia odwadniające powinny być tak skonstruowane i zasilane taką nadawą, aby dawały produkt o jak najniższej zawartości wilgoci, a odchodzący odsącz zawierał jak najmniej części stałych i nie przeciążał klarowników, do których jest kierowany; dlatego też niezwykle ważnym jest określenie i przestrzeganie realnych kryteriów pracy poszczególnych rodzajów urządzeń.

Procesy rozdziału zawiesin na sitach stałych, tj. łukowych i odśrodkowych, zostały stosunkowo obszernie rozpracowane, natomiast odwadnianie mułów na przesiewaczach nie jest zadowalająco przebadane.

W technice odwadniania drobnoziarnistych materiałów na przesiewaczach stosuje się różne rodzaje ruchu sita jak: kołowy, eliptyczny i prostoliniowy, które można wywoływać różnymi napędami i zawieszeniami. Wszystkie doświadczenia do niniejszego opracowania przeprowadzono na przesiewaczu o specyficznym kierunku liniowego ruchu sita, który stosowany jest w najnowocześniejszych maszynach przeznaczonych do odwadniania.

W pracy podjęto próbę określenia wpływu najważniejszych parametrów operacji odwadniania i odzyskiwania części stałych mułów węglowych na przesiewaczu z uwzględnieniem zarówno parametrów maszyny, jak i zasadniczego charakteru zawiesiny oraz podano kryteria najwłaściwszego przebiegu procesu przy optymalnej jego skuteczności z pominięciem ewentualnego dodatku odczynników powierzchniowo czynnych jako problemu kwalifikującego się do niezależnego rozpracowania.

1. Teoria odwadniania na przesiewaczach

Podstawą prawidłowego prowadzenia ruchu zamkniętego obiegu wodno-mułowego w zakładzie przeróbki mechanicznej węgla jest wydzielanie takiej ilości mułu, która dochodzi do obiegu. Uwzględniając różne czasy nasycania obiegu ziarnami o odmiennej wielkości oraz to, że występuje tendencja do wzbogacania obiegu w ziarna najdrobniejsze, należy przestrzegać zasadę ciągłego wydzielania mułu o szerokim zakresie wielkości jego składników (11,?); z tego powodu urządzenia odwadniające wyposażone są w sita lub s.atki o stosunkowo małych otworach jednak większych niż poważna część uławianych ziarn. Istota zatrzymywania najdrobniejszych ziarn na sitach, za pośrednictwem warstwy utworzonej z odwadnianego materiału, leży w mechanizmie powodującym przepływ cieczy przez warstwę porowatą. Problem ten można dla przesiewaczy odwadniających przedstawić jako zespół zagadnień związanych z obciekaniem w warunkach ruchu, usankcjonowanego szeregiem złożonych czynników zależnych od charakterystyki odwadnianego materiału, parametrów pracy urządzenia i rodzaju wbudowanego do niego sita lub siatki.

1.1. Przepływ cieczy przez warstwę porowatą

Rozpatrując proces obciekania, można go z pewnym przybliżeniem traktować jako przepływ cieczy przez warstwę porowatą, której wielkość przestrzeni międzyziarnowych zależy od wymiaru, sferyczności, szorstkości i wzajemnej orientacji ziarn. W rozważaniach tych stosuje się pewne określenia, które wymagają zdefiniowanego oznaczenia oraz jednoznacznej interpretacji w ujęciach zależności funkcyjnych i technice pomiarowej.

Ziarna wchodzące w skład przemysłowych mułów węglowych charakteryzują się fizyczną niejednorodnością i dlatego konieczne jest dokładne określenie takich wielkości jak: kształt, powierzchnia, objętość, gęstość, porowatość i wymiar ziarn.

W jednoskładnikowych zbiorach ziarn często udaje się przyporządkować ich kształt charakterystycznym bryłom, których opisanie nie stanowi trudności; dla ziarn nie kwalifikujących się do takiego przyporządkowania ustala się tzw. współczynnik kształtu, co jest zagadnieniem szczególnie trudnym dla surowych mułów węglowych z natury wieloskładnikowych, a więc geometrycznie bardzo zróżnicowanych.

Powierzchnię ziarn Dierijagin [23] określa jako statyczną i kinetyczną.

Powierzchnia statyczna cz. adsorpcyjna jest powierzchnią ziarna wraz z powierzchnią porów, do których istnieje dostęp z zewnątrz.

Powierzchnia kinetyczna cz. zewnętrzna jest powierzchnią ziarna nie uwzględniającą powierzchni porów.

Powierzchnia właściwa może więc być powierzchnią statyczną lub kinetyczną przypadającą na jednostkę masy ziarna.

Objętość ziarn należy konsekwentnie rozróżnić jako objętość statyczną cz. bezwzględną V_{ss}, tzn. bez porów oraz objętość kinetyczną cz. pozorną V_{sk}, tzn. razem z porami.

Gęstość ziarn określa się jako gęstość statyczną cz. bezwzględną δ_{ss} stanowiącą stosunek masy ziarna m do objętości V_{ss} lub jako gęstość kinetyczną cz. pozorną δ_{sk} wyrażającą stosunek masy m do objętości V_{sk}

$$\delta_{ss} = \frac{m}{V_{ss}} \qquad (1.1\text{-}1)$$

$$\delta_{sk} = \frac{m}{V_{sk}} . \qquad (1.1\text{-}2)$$

Porowatość ziarna ε_z oznaczana jest jako stosunek objętości jego porów V_{sp} do kinetycznej objętości ziarna V_{sk}.

$$\varepsilon_z = \frac{V_{sp}}{V_{sk}} = 1 - \frac{m}{V_{sk} \cdot \delta_{ss}} \cdot \qquad (1.1\text{-}3)$$

Wymiar ziarna o nieokreślonym kształcie geometrycznym podaje się jako jeden z wymiarów zastępczych [2].

Wymiar dynamiczny D_d jest charakterystycznym wymiarem ziarna zastępczego, którego wartość prędkości ruchu w określonym ośrodku jest identyczna jak ziarna rzeczywistego.

Wymiar geometryczny D jest charakterystycznym wymiarem ziarna zastępczego o określonym kształcie geometrycznym, którego powierzchnia lub objętość jest równa powierzchni lub objętości określonego rodzaju ziarna rzeczywistego. Oznaczenie odpowiedniej powierzchni lub objętości określonego rodzaju oraz ustalenie powierzchniowego ψ_F lub objętościowego ψ_V współczynnika kształtu ziarna, pozwala na wykorzystanie zależności:

$$D_{Fs} = \sqrt{\psi_F \cdot F_s} \qquad (1.1\text{-}4)$$

$$D_{Fk} = \sqrt{\psi_F \cdot F_k} \qquad (1.1\text{-}5)$$

$$D_{Vs} = \sqrt[3]{\psi_V \cdot V_s} \qquad (1.1\text{-}6)$$

$$D_{Vk} = \sqrt[3]{\psi_V \cdot V_k}, \qquad (1.1\text{-}7)$$

gdzie:

D_{Fs} - powierzchniowy statyczny wymiar geometryczny

D_{Fk} - powierzchniowy kinetyczny wymiar geometryczny

D_{Vs} - objętościowy statyczny wymiar geometryczny

D_{Vk} - objętościowy kinetyczny wymiar geometryczny.

Wymiar projekcyjny D_p jest wymiarem umownym zależnym od sposobu jego pomiaru; najczęściej wyróżnia się:

- wymiar sitowy określony średnią arytmetyczną wielkości otworów sita, przez które dana klasa przeszła i na którym się zatrzymała,
- wymiar średni z największego i najmniejszego wymiaru przekroju ziarna,
- wymiar równy średnicy koła o powierzchni w przybliżeniu równej powierzchni przekroju ziarna,
- wymiar równy długości odcinka dzielącego powierzchnię przekroju ziarna na dwie równe części,
- wymiar równy jednemu z umownych wymiarów poprzecznego lub podłużnego przekroju ziarna,
- wymiar formalny (omówiony dalej).

Porowate i nieporowate ziarna o identycznym kształcie charakteryzują się tym, że geometryczny kinetyczny wymiar powierzchniowy jest równy geometrycznemu kinetycznemu wymiarowi objętościowemu, który nazwano ogólnie wymiarem geometrycznym kinetycznym D_k

$$D_{Fk} = D_{Vk} = D_k . \qquad (1.1\text{-}8)$$

Dla ziarn porowatych o dowolnym kształcie zachodzą zależności:

$$D_k > D_{Vs} \quad D_k < D_{Fs} \quad D_{Vs} < D_{Fs} . \qquad (1.1\text{-}9)$$

Rozpatrując oddziaływanie ziarn między sobą lub innymi ciałami właściwym wymiarem, który należy uwzględnić przy obliczaniu występujących sił, jest geometryczny wymiar kinetyczny.

W rozważaniach nad wielkościami charakteryzującymi warstwę złożoną z dużej ilości ziarn, konieczne jest jednoznaczne określenie rodzaju powierzchni, objętości, gęstości i porowatości zbioru ziarn.

Powierzchnia i objętość zbioru ziarn są wielkościami addytywnymi i dlatego mogą występować jako statyczne lub kinetyczne.

Porowatość warstwy ziarn może również być wielkością statyczną cz. bezwzględną ε_s lub kinetyczną cz. pozorną ε_k, gdyż określa się jako stosunek objętości statycznej V_{ps} lub kinetycznej V_{pk} porów w warstwie, do całkowitej objętości warstwy V_w

$$\varepsilon_s = \frac{V_{ps}}{V_w} \quad \text{oraz} \quad \varepsilon_k = \frac{V_{pk}}{V_w} \cdot \tag{1.1-10}$$

Objętość statyczna porów obejmuje sumę porów międzyziarnowych i ziarnowych dostępnych z zewnątrz, a objętość kinetyczna uwzględnia tylko pory międzyziarnowe traktując ziarna jako nieporowate.

Średnia gęstość ziarn w warstwie również może być wielkością statyczną cz. bezwzględną δ_{wss} lub kinetyczną cz. pozorną δ_{wsk}, bo stanowi stosunek masy ziarn w warstwie m do ich objętości statycznej V_{wss} lub kinetycznej V_{wsk}.

$$\delta_{wss} = \frac{m}{V_{wss}} \; ; \; \delta_{wsk} = \frac{m}{V_{wsk}} \cdot \tag{1.1-11}$$

Stosownie do rodzaju gęstości, która stoi do dyspozycji, można porowatość określić z zależności

$$\varepsilon_s = 1 - \frac{m}{V_w \cdot \delta_{wss}} \quad \text{lub} \quad \varepsilon_k = 1 - \frac{m}{V_w \cdot \delta_{wsk}} \cdot \tag{1.1-12}$$

Gęstość warstwy ziarn δ_w określa się jako stosunek masy ziarn m do objętości warstwy V_w

$$\delta_w = \frac{m}{V_w} \cdot \tag{1.1-13}$$

Gęstość ta ma charakter gęstości pozornej i zależy od stopnia upakowania ziarn. Celem przeliczenia najczęściej używanych wielkości jak porowatość, gęstość lub objętość można wykorzystać zależności

$$\delta_w = \delta_{wss} (1 - \varepsilon_s) \tag{1.1-14}$$

$$V_{wss} = V_w (1 - \varepsilon_s) . \tag{1.1-15}$$

W nielicznych przypadkach dla niektórych zbiorów zdefiniowanych ziarn stosowane są nomogramy służące do wyznaczenia zależności zachodzących pomiędzy gęstością statyczną, kinetyczną a porowatością mieszaniny [98].

Przeprowadzona charakterystyka ważniejszych parametrów ziarn i ich zbiorów, stanowi podstawę rozpatrywania przepływu cieczy przez warstwę porowatą. Prędkość przepływu cieczy v przez pełny przekrój warstwy porowatej określił Koženy [50] w postaci zależności

$$v = \frac{1}{c} \cdot \frac{\Delta P \cdot D_x^2}{\mu \cdot h} \cdot \frac{\varepsilon_s^3}{(1 - \varepsilon_s)^2}, \qquad (1.1\text{-}16)$$

gdzie:

ΔP - opór przepływu

D_x - wymiar zastępczy ziarn

h - grubość warstwy

ε_s - porowatość statyczna warstwy

μ - lepkość dynamiczna cieczy

c - współczynnik proporcjonalności stały dla danego zbioru ziarn i $Re \leqslant 10$.

W równaniu (1.1-16) podano porowatość statyczną co nie oznacza, że nie może być użyta porowatość kinetyczna z tym jednak, że brak dotąd praktycznej i dostatecznie dokładnej metody pomiaru tego parametru. Wielkość przestrzeni międzyziarnowych wyrażona porowatością kinetyczną jest czynnikiem decydującym o przepływie cieczy i dlatego określenie porowatości statycznej nie jest najwłaściwsze; nadto zależy ona także od porowatości ziarn, a nie tylko od ich wymiarów i kształtu. Oznacza to, że ziarna o tym samym kształcie ale różnej porowatości nadają warstwom te same porowatości kinetyczne, lecz różne porowatości statyczne.

Przy planowaniu i przeprowadzaniu doświadczeń w tym zakresie, należy zwrócić uwagę na dobór odpowiedniej średnicy naczynia, w którym znajdzie się warstwa ziarn, gdyż objętość porów pomiędzy warstwą a ścianami naczynia jest większa niż między ziarnami.

Wielkość D_x wyszczególniona we wzorze (1.1-16) nie została definitywnie określona, a wiadomo, że wartości wymiarów zależą od przyjętego sposobu ich oznaczania. Nie uwzględniono również krzywolinijności porów, która może być scharakteryzowana przez współczynnik krętości ψ_k tzw. tortuositę [44].

Równanie Kozeny'ego - Carmana ma postać

$$v = \frac{1}{k_r} \cdot \frac{\Delta P}{\mu \cdot h \cdot F_{wk}^2 \cdot \delta_{ss}^2} \cdot \frac{\varepsilon_s^3}{(1 - \varepsilon_s)^2}, \qquad (1.1\text{-}17)$$

gdzie: F_{wk} - kinetyczna powierzchnia właściwa zbioru ziarn, która również nie uwzględnia krętości porów, choć uzależnia prędkość przepływu dodatkowo od F_{wk} i δ_{ss}; współczynnik k_r może przyjmować różne wartości zależnie od składu granulometrycznego i porowatości (wg 88). Carman stwierdził, że dla mieszanin ziarn kulistych $3{,}3 < k_r < 5{,}9$, a dla ziarn o identycznej wielkości i prawie kulistym kształcie $k_r \approx 5$ przy $\varepsilon_s \approx 0{,}4$. Wyllie, Gregory i Jeschar określili $5{,}2 < k_r < 7{,}2$ dla mieszanin kul o różnych wielkościach. Wyllie, Gregory i Coulsou ustalili wartości $3{,}2 < k_r < 5{,}8$ dla sześcianów, pryzm, cylindrów i płytek. Dla pierścieni Lessinga i siodełek Berla, Carman podał $4{,}7 < k_r < 5{,}2$ przy $\varepsilon_s \approx 0{,}75$; cytuje również autorów, którzy dla zbiorów ziarn o wysokich porowatościach otrzymali $4 < k_r < 6{,}5$.

Z przedstawionych stwierdzeń wynika, że kształt ziarn i ich skład granulometryczny, a zatem również krętość porów mają określone znaczenie dla przepływu cieczy przez warstwę porowatą.

Andrzejewski [1] wyprowadził sformułowanie, w którym ujął współczynnik krętości ψ_k

$$v = \frac{1}{c \cdot \psi_k} \cdot \frac{\Delta P \cdot D_k^2}{\mu \cdot h} \cdot \frac{\varepsilon_k^3}{(1 - \varepsilon_k)^2} \cdot \qquad (1.1\text{-}18)$$

Wykorzystując zależność zachodzącą pomiędzy tzw. wymiarem formalnym ziarna D_f

$$D_f = D_k \frac{1 - \varepsilon_s}{1 - \varepsilon_k} \qquad (1.1\text{-}19)$$

a kinetyczną powierzchnią właściwą ziarn F_{wk}, współczynnikami kształtu ψ_F i ψ_V oraz gęstością bezwzględną ziarn δ_{ss} wyrażonych za pomocą funkcji

$$D_f = \frac{\psi_V}{\psi_F} \cdot \frac{1}{F_{wk} \cdot \delta_{ss}} \qquad (1.1\text{-}20)$$

określił równanie prędkości przepływu cieczy przez warstwę porowatą podstawiając wzór (1.1-19) do (1.1-20) celem wyliczenia D_k z tym, że czynnik $\left(\frac{\psi_V^2}{\psi_F^2} \cdot \frac{1}{c\,\psi_k}\right)$ zastąpił przez $\frac{1}{\xi}$

$$v = \frac{1}{\xi} \cdot \frac{\Delta P}{\mu \cdot h \cdot F_{wk}^2 \cdot \delta_{ss}^2} \cdot \frac{\varepsilon_k^3}{(1 - \varepsilon_s)^2} \cdot \qquad (1.1\text{-}21)$$

Przedstawione sformułowanie wydaje się bardziej poprawne z teoretycznego punktu widzenia w stosunku do (1.1-16 i 17).

Spośród kilkunastu znanych z literatury funkcji porowatości, na uwagę zasługuje również zależność podana przez Rumpfa i Gupte'a [88] którzy przebadali wpływ sześciu różnych składów granulometrycznych kul o wielkości 0,1 do 5 mm na przepuszczalność warstwy i stwierdzili, że względnie najlepsze wyniki daje funkcja $\left[4 \cdot (1 - \varepsilon_s) \cdot \varepsilon_s^{-4,55}\right]$; nadto wykazali, że stosowalność podanego wyrażenia oraz funkcji porowatości podanej przez Koženy - Carmana $\left[\varepsilon_s^3/(1 - \varepsilon_s)^2\right]$ rozciąga się na zakres $Re \leqslant 100$ przy $0,35 < \varepsilon_s < 0,7$.

Molerus, Pahl i Rumpf [64] porównywali różne funkcje porowatości monodyspersyjnych zbiorów kul w zakresie $0,2 < \varepsilon_s < 0,9$ i stwierdzili, że dla $0,35 < \varepsilon_s < 0,7$ otrzymuje się bardzo zbliżone wyniki opo-

ru przepływu stosując zależność Koženy - Carmana $\left[\varepsilon_s^3/(1-\varepsilon_s)^2\right]$, Gillilanda $\left[\varepsilon^{4,56}\right]$, Gupte $\left[5,6 \cdot \varepsilon_s^{-5,5}\right]$ i funkcję $\left[5,6 \cdot 4 \cdot (1-\varepsilon_s) \cdot \varepsilon_s^{-4,55}\right]$ przy Re = 1.

Pomiary oporów przepływu powietrza przez warstwy różnie ukształtowanych ziarn koksu, rudy i brykietów oraz ich mieszanin, uwarunkowane zmodyfikowaną liczbą Re wykazały zależności, których opisanie w formie równań omówionych powyżej nie było możliwe [57]; w przypadku przeprowadzania pomiarów na takich ziarnach z konieczności trzeba się ograniczyć do określenia zależności od liczby Re współczynników oporu dla danej warstwy materiału, co z praktycznych względów jest wystarczające.

Zagadnieniem nierozłącznie związanym z teoretyczną analizą przepływu, jest pomiar porowatości statycznej i kinetycznej oraz określenie powierzchni właściwej, co dla mułów przemysłowych jest trudne. Wyniki oznaczeń zależą do pewnego stopnia od użytej metody pomiaru [2], a otrzymane rezultaty wymagają uważnego wykorzystania, gdyż własności składników tych mułów są bardzo zróżnicowane.

Analiza procesu przepływu cieczy przez warstwę porowatą przeprowadzona na podstawie wybranych prac wykazała, że zagadnienie jest bardzo złożone i teoretyczne ujęcie go w formie równania stwarza poważne trudności. Wszelkie matematyczne dociekania dotyczą ziarn modelowych, znacznie odbiegających własnościami fizycznymi od mułów przemysłowych. Z przedstawionych w tym rozdziale rozważań wynika jednak szereg wniosków, których uwzględnienie w części badawczej tej pracy jest konieczne.

1.2. Zjawiska warunkujące zatrzymywanie cieczy w warstwie porowatej

Przepływ cieczy przez warstwę porowatą uwarunkowany jest zjawiskami występującymi pomiędzy stykającymi się ziarnami w obecności cieczy. Zasadniczą rolę odgrywa tu zwilżalność ziarn przez ciecz, co charakteryzuje się kątem granicznym lub ściślej energetycznością ciała oraz związane z nią przyleganie ziarn do siebie. Krótka analiza tych zja-

wisk zostanie przeprowadzona wyłącznie z punktu widzenia jej przydatności do odwadniania obciekowego na przesiewaczach.

Nie wnikając w problematykę sił międzycząsteczkowych ciał o różnych powierzchniach [52], celowym jest zwrócenie uwagi na siły przylegania łączące ziarna poprzez mostek cieczy, ciśnienie kapilarne i objętość cieczy stanowiącej mostek; pomimo daleko posuniętych założeń upraszczających możliwe jest wyciągnięcie pewnych wniosków ogólnych.

W przypadku, jeżeli pomiędzy dwa ziarna wkroplona zostanie niewielka ilość cieczy, a wszelkie pola sił zewnętrznych zostaną usunięte, wtedy powstanie mostek cieczy, który oddziaływuje na ziarna z siłami zależnymi od fizycznych i chemicznych własności stykających się ciał. Matematyczne ujęcie tych zależności przeprowadzono dotąd w kilku pracach [74], lecz we wszystkich przypadkach tylko dla kul o identycznej wielkości. Na rys. 1.2-1 przedstawiono model mostku cieczy pomiędzy dwoma ziarnami kulistymi o identycznej wielkości; z nakreślonego schematu wynikają następujące zależności:

$$D_u = D \cdot \sin\beta \tag{1.2-1}$$

$$R_1 = \frac{D(1 - \cos\beta) + a}{2\cos(\beta + \delta)} \tag{1.2-2}$$

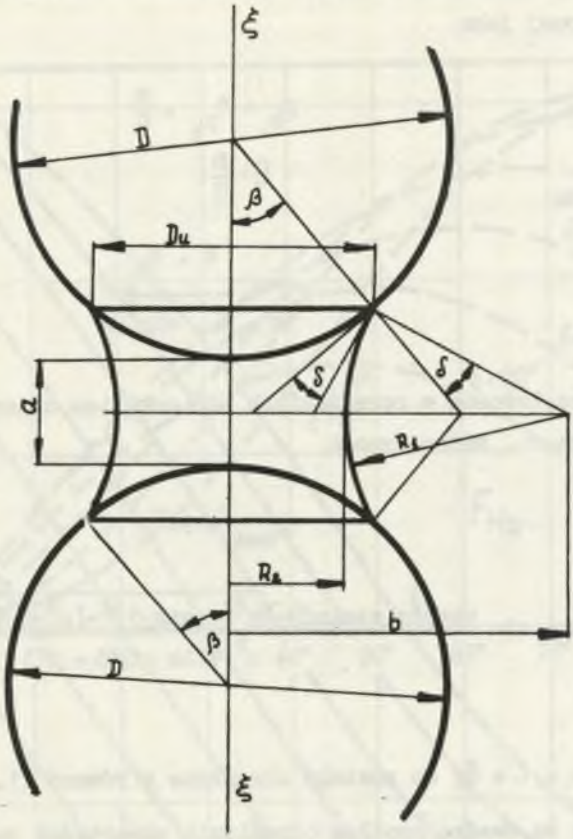
$$R_2 = \frac{D}{2}\sin\beta + R_1\left[\sin(\beta + \delta) - 1\right]. \tag{1.2-3}$$

Na rzeczywistą siłę spójności kul składają się dwie wielkości, z których jedna pochodzi od ciśnienia kapilarnego p_k tzw. siła kapilarna H_k

$$H_k = p_k \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot \sin^2\beta = \sigma\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right)\frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot \sin^2\beta \tag{1.2-4}$$

a druga od napięcia powierzchniowego cieczy σ tzw. siła graniczna H_R

$$H_R = \sigma \cdot \pi \cdot D \cdot \sin\beta \cdot \sin(\beta + \delta). \tag{1.2-5}$$



Rys. 1.2-1. Model mostku cieczy pomiędzy dwoma ziarnami kulistymi o identycznej wielkości [74]

Przez dodanie obydwu równolegle działających sił otrzymuje się rzeczywistą siłę spójności H

$$H = \alpha \cdot \pi \cdot D \cdot \sin\beta \left[\sin(\beta + \delta) + \frac{D}{4}\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right) \cdot \sin\beta\right]. \qquad (1.2\text{-}6)$$

Ze względu na skomplikowaną formę przedstawionych wyrażeń używa się funkcje pomocnicze, które odpowiadają poszczególnym siłom

$$F_{H_k} = \frac{H_k}{\frac{a}{D}}, \quad F_{H_R} = \frac{H_R}{\frac{a}{D}} \quad \text{oraz} \quad F_H = \frac{H}{\frac{a}{D}}. \qquad (1.2\text{-}7,8,9)$$

Ciśnienie kapilarne w mostku cieczy można również podać w postaci uproszczonej jako

$$p_k = F_{p_k} \cdot \frac{a}{D} \tag{1.2-10}$$

z tym, że

$$F_{p_k} = \frac{4 \cdot F_{H_k}}{\pi \cdot \sin^2\beta} \cdot \tag{1.2-11}$$

Bardzo istotną w rozważaniach nad mostkiem cieczy jest także wartość kąta β, która wynosi

$$\beta_{max} = 90^0$$

$$\beta_{min} = \arcsin \frac{\cos\delta\left[c(c+\sin\delta) - \sqrt{c^2(c+\sin\delta)^2 - (c^2-1)(c^2+2c\sin\delta+1)}\right]}{c^2 + 2c\sin\delta + 1}, \tag{1.2-12}$$

gdzie $c = 1 + \frac{a}{D}$, co zostało określone z równań (1.2-2 i 3).

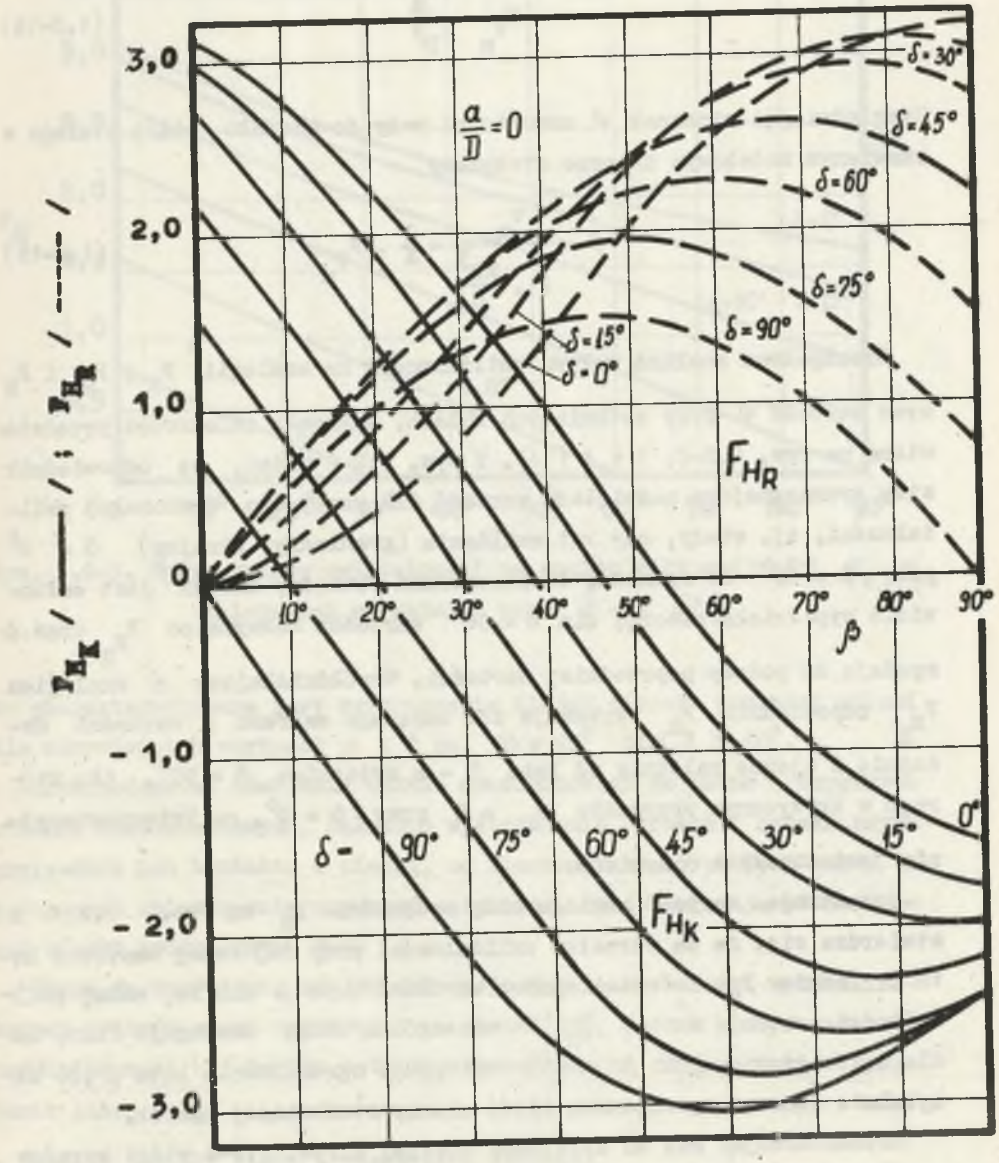
Mając na uwadze problem określenia zawartości wody w zbiorze ziarn, celowym jest podanie również zależności określających objętość mostka cieczy pomiędzy dwoma identycznej wielkości kulistymi ziarnami; tę objętość wyznacza bryła powstała przez obrót figury płaskiej mostka z rys. 1.2-1 dokoła osi ξ-ξ.

Objętość bryły mostka cieczy wynosi:

$$V_m = 2\pi\left\{\left[R_1^2 + (R_1 + R_2)^2\right] \cdot R_1 \cdot \cos(\beta+\delta) - \frac{R_1^3 \cdot \cos^3(\beta+\delta)}{3}\right.$$

$$- (R_1 + R_2)\left[R_1^2 \cdot \cos(\beta+\delta) \cdot \sin(\beta+\delta) + R_1^2\left(\frac{\pi}{2} - \beta - \delta\right)\right]$$

$$\left. - \frac{1}{24} D^3(2 + \cos\beta) \cdot (1 - \cos\beta)^2\right\}. \tag{1.2-13}$$



Rys. 1.2-2. Wpływ zmiany zwilżalności na analogi F_{H_K} i F_{H_R} w zależności od kąta β przy $\frac{a}{D} = 0$ [74]

Także w tym przypadku zastosowano analog równania, podając go jako funkcję

$$F_{V_m} = \frac{V_m}{D^3} \cdot \qquad (1.2\text{-}14)$$

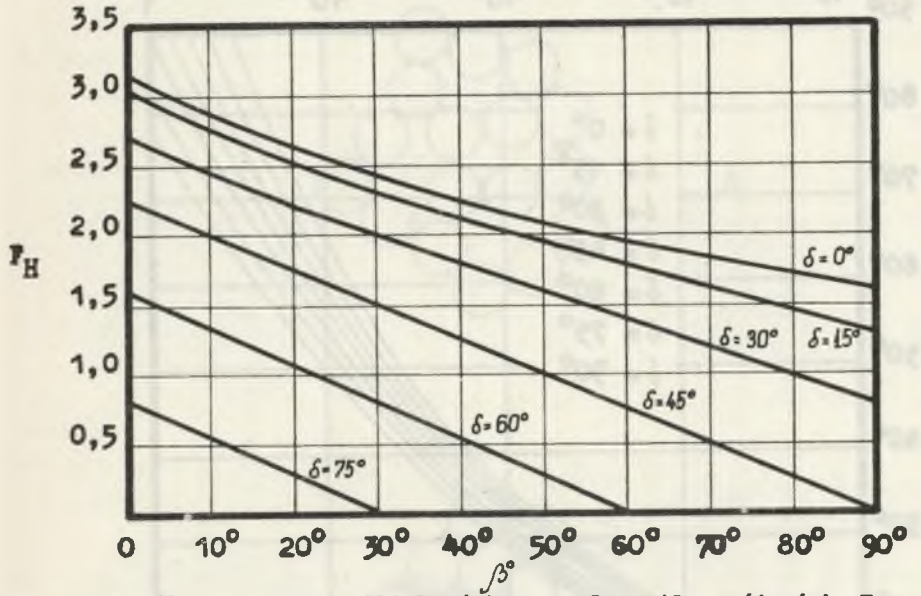
Uwzględniając stosunek φ zawartości wody do udziału ciała stałego w omawianym modelowym zbiorze otrzymamy

$$\varphi = \frac{V_m}{2 \cdot \frac{\pi D^3}{6}} = \frac{3}{\pi} \cdot F_{V_m} \cdot \qquad (1.2\text{-}15)$$

Szczegółowa analiza wpływu zwilżalności na analogii F_{H_R}, F_{H_K} i F_H oraz wartość φ przy zetkniętych kulach, wykazała zależności przedstawione na rys. 1.2-2, 3 i 4 [74]. Z rys. 1.2-2 widać, że odpowiednik siły granicznej ma największą wartość dla przypadku doskonałej zwilżalności, tj. wtedy, gdy kąt zwilżania (graniczny, skrajny) $\delta = 0^\circ$ przy $\beta = 90^\circ$ co oznacza, że przestrzeń pomiędzy kulami jest całkowicie wypełniona cieczą; dla $\delta = 90^\circ$ wartości maksymalne F_{H_R} oraz β spadają do połowy poprzedniej wartości. Współdziałający z analogiem F_{H_R} odpowiednik F_{H_k} wykazuje dla badanego zakresu δ wartości dodatnie i ujemne zależnie od kąta β - z wyjątkiem $\delta = 90^\circ$, dla którego w krytycznym przypadku $F_{H_k} = 0$ przy $\beta = 0^\circ$, co interpretacyjnie jest zupełnie oczywiste.

Rozpatrując wartość analogu siły spójności F_H wg rys. 1.2 - 3 stwierdza się, że ze wzrostem zwilżalności przy tej samej wartości kąta β rośnie F_H; również spadek wartości kąta β dla tej samej zwilżalności powoduje wzrost F_H. Na szczególną uwagę zasługuje fakt, że dla kątów granicznych $\delta < 45^\circ$ występuje ograniczenie kąta β, co fizykalnie oznacza ograniczoną ilość cieczy stanowiącej mostek.

Ustosunkowując się do objętości mostka, z rys. 1.2-4 widać wyraźny wzrost wartości stosunku objętości φ, spowodowany zwiększeniem się kątów β i δ przy maksymalnym zbliżeniu kul; także w tym przypad-



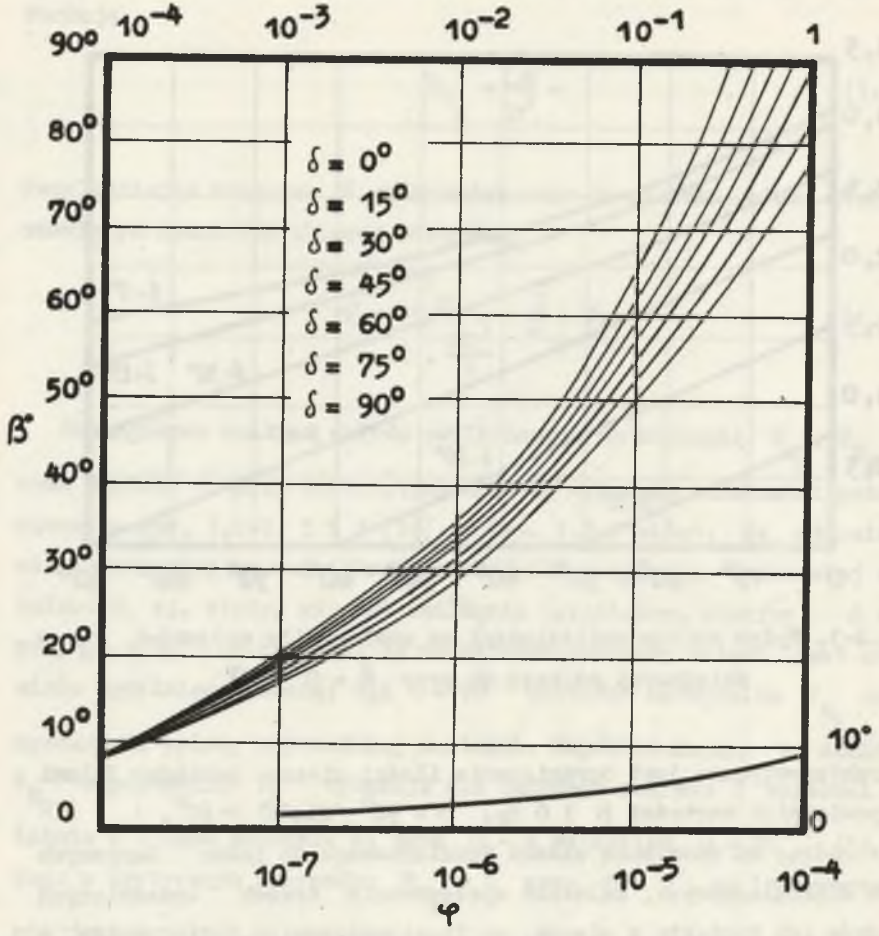
Rys. 1.2-3. Wpływ zmiany zwilżalności na analog siły spójności F_H w zależności od kąta β przy $\frac{a}{D} = 0$ [74]

ku charakterystyczne jest ograniczenie ilości cieczy pomiędzy kulami dla odpowiednich wartości β i δ np. $\beta = 90^0$ dla $\delta > 60^0$.

Przechodząc od omawiania układu dwuziarnowego do luźno usypanych zbiorów wieloziarnowych, założono występowanie trzech zasadniczych przypadków ich kontaktu z cieczą, co ilustruje rys. 1.2-5; każdy z pokazanych zbiorów może zachować sztywność, choć zawierają różne ilości cieczy (różne kąty β).

Znane są rozważania nad siłami spójności i zwartością wyidealizowanych zbiorów ziarn zawierających ciecz [85], jednak przeprowadzenie uogólnień musi być bardzo ostrożne ze względu na choćby takie założenia jak:

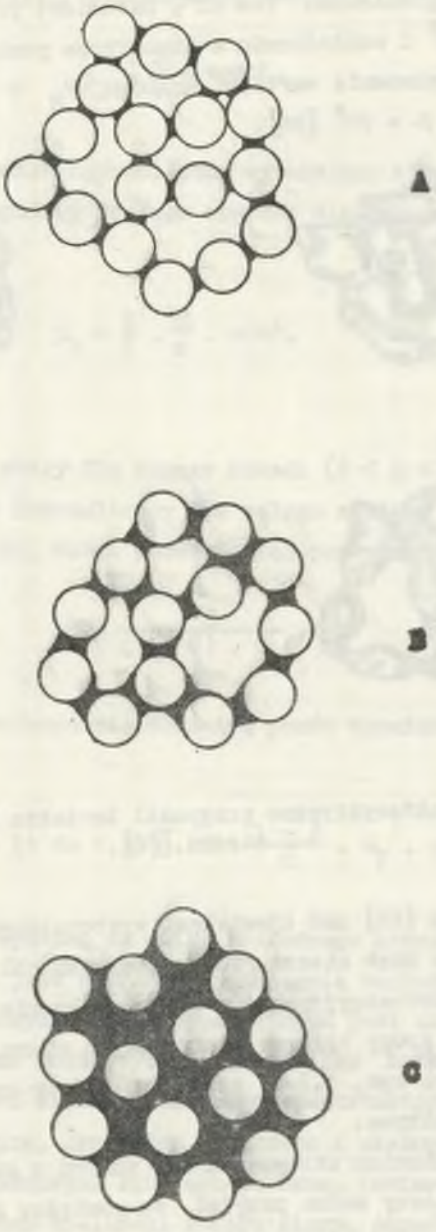
- kulisty kształt ziarn i identyczna średnica
- liczba punktów styczności ziarn ze sobą w danej płaszczyźnie ma być bardzo duża
- wiązania ziarn mostkami wodnymi są równomierne w całej przestrzeni
- średnia wartość sił spójności jest we wszystkich punktach przestrzeni identyczna



Rys. 1.2-4. Wpływ zmiany zwilżalności na stosunek objętości φ w zależności od kąta β przy $\frac{a}{D} = 0$ [74]

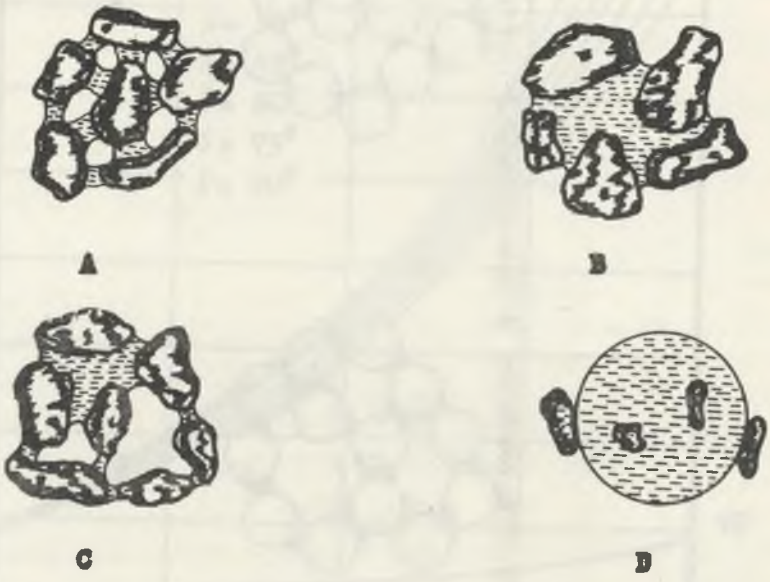
- ziarna są równomiernie rozmieszczone w całej przestrzeni zbioru
- powierzchnia ziarn musi być idealnie gładka, aby $\frac{a}{D} = 0$.

Uważna obserwacja zbiorów ziarn mułów przemysłowych - szczególnie z przesiewaczy odwadniających - pozwala stwierdzić, że praktycznie nie jest możliwe spełnienie żadnego z podanych założeń. Nadto, znane są przypadki zmiany zwilżalności wywołanej warstewką zaadsorbowanej na powierzchni ziarna cieczy w stosunku do czystej jego powierzchni - co w praktycznych rozważaniach na ogół się pomija; np. zwilżalność



Rys. 1.2-5. Charakterystyczne przypadki kontaktu ziarn kulistych z cieczą [74]

pewnego gatunku szkła przez wodę w przypadku istnienia warstewki wyraża się kątem granicznym $\delta = 42^{\circ}$, natomiast po podgrzaniu kulek do temperatury 300° i ochłodzeniu w atmosferze pozbawionej par $\delta = 29^{\circ}$, co powoduje zwiększenie wartości analogu F_H o 16,4% dla $\beta = 0^{\circ}$ oraz 73,5% dla $\beta = 90^{\circ}$ [96].



Rys. 1.2-6. Charakterystyczne przypadki kontaktu ziarn niekulistych z cieczą [86]

Ostatnie prace [86] nad zjawiskami występującymi pomiędzy ziarnami a przylegającą do nich cieczą, idą w kierunku zbliżenia rozważań do warunków mniej abstrakcyjnych i w pewnym zakresie technicznie realnych. Podział na grupy zbiorów niekulistych ziarn, którym towarzyszy ciecz, pokazano na rys. 1.2-6, gdzie zestawiono rzeczywiste przypadki występujące w praktyce.

Rozważając mechanizm utrzymania się zbioru w stanie spojonym przy pomocy mostków cieczy można przyjąć, że pomiędzy naprężeniem rozciągającym σ_{max} a ciśnieniem kapilarnym p_k zachodzi zależność [53].

$$\sigma_{max} \cong p_k, \tag{1.2-16}$$

jeżeli kapilara ma kształt cylindryczny, wtedy

$$p_k = \frac{\alpha}{m} \cdot \cos\alpha , \qquad (1.2\text{-}17)$$

gdzie m oznacza promień hydrauliczny wyrażający stosunek pola przekroju poprzecznego kapilary do jego obwodu; dla całego systemu kapilar w zbiorze ziarn

$$p_k = \frac{k}{6} \cdot \frac{\alpha}{m} \cdot \cos\delta , \qquad (1.2\text{-}18)$$

gdzie:

k - współczynnik, stały dla danego układu $(6 < k < 8)$

m - średni promień hydrauliczny dla całego systemu porów, wyrażający stosunek objętości porów do ich powierzchni

$$m = \frac{\varepsilon}{(1 - \varepsilon) \cdot O_V} , \qquad (1.2\text{-}19)$$

gdzie O_V oznacza powierzchnię właściwą porów wyrażoną objętościowo i wówczas

$$\sigma_{max} \cong p_k = (1 \text{ do } 1{,}33) \cdot \alpha \cdot \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} \cdot O_V \cdot \cos\delta . \qquad (1.2\text{-}20)$$

Ze wzoru (1.2-20) wynika, że celem dokładnego określenia ciśnienia kapilarnego konieczne jest poprawne wyznaczenie wartości O_V, co dla układów wieloskładnikowych - polidyspersyjnych jest niezwykle trudne. Wyznaczenie powierzchni modelowych zbiorów ziarn można przeprowadzić na podstawie znajomości składu ziarnowego przedstawionego metodą średniej wagowej, wariacyjną, sposobem zupełnego i niezupełnego momentu, metodą powierzchni właściwych lub jeszcze inną. Powierzchnię tak zdefiniowanego pod względem wielkości zbioru ziarn, określa się sposobem Gonella albo Heywooda - Rammlera lub metodą Gaudina - Schumanna czy też sposobem logarytmicznym [87]. Poprawne wyznaczenie wielkości po-

wierzchni dla mułów przemysłowych jest na ogół bardzo trudne ze względu na duży rozrzut i niedostateczną powtarzalność wyników.

Teoria zjawisk towarzyszących mieszaninom bardzo drobnych ziarn o niekulistym, a w szczególności nieregularnym kształcie, nie została jeszcze dostatecznie rozpracowana w przeciwieństwie do analogicznych zjawisk towarzyszących, np. procesom grudkowania i aglomeracji [85, 86, 53, 76].

Zagadnieniem nierozłącznie związanym z problematyką sił spójności jest określenie resztkowej zawartości cieczy w zbiorze ziarn podczas mechanicznego odwadniania. Zasadnicze pojęcia niezbędne w tych rozważaniach dotyczą pojemności i rodzaju cieczy ze względu na jej umiejscowienie [6, 62, 83].

Pojemność zbioru ziarn z cieczą dzieli się na:

1. pojemność ziarnową - bez porów w nich zawartych
2. pojemność przestrzeni innej niż ziarnowa

   2.1. pojemność porów w ziarnach

   2.2. pojemność przestrzeni międzyziarnowych.

Sumaryczna zawartość cieczy w zbiorze dzieli się na:

1. ciecz wewnętrzną - wypełniającą pory ziarn W_i
2. ciecz zewnętrzną

   2.1. ciecz zaadsorbowaną na powierzchni ziarn W_a

   2.2. ciecz w kapilarach międzyziarnowych - w miejscach styku ziarn W_z

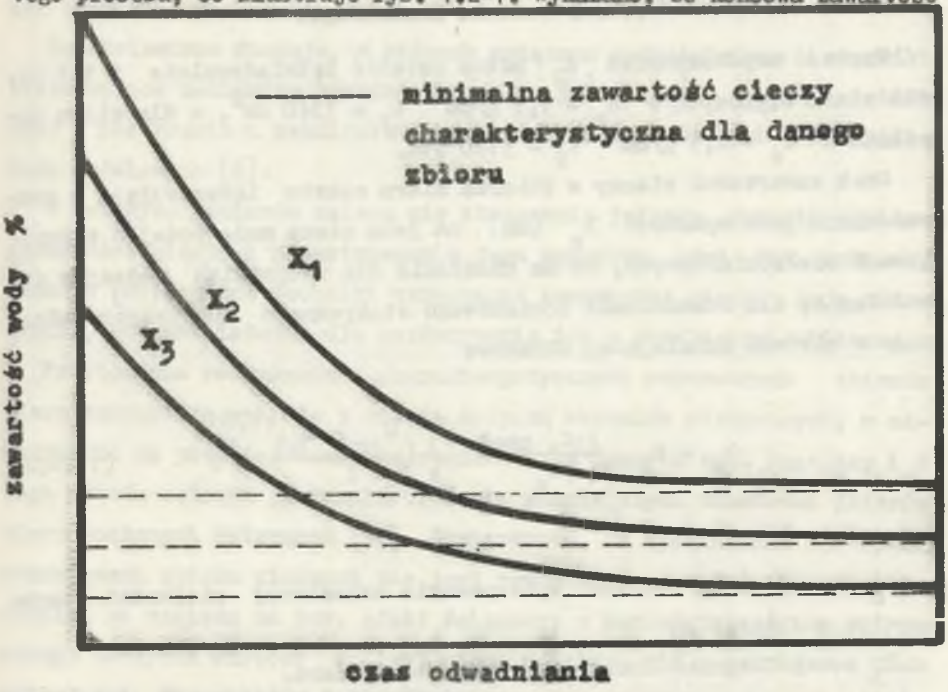
   2.3. ciecz wypełniającą przestrzenie pomiędzy cieczami wymienionymi w poz. 2.1 i 2.2 W_g.

Przedstawiona klasyfikacja cieczy dotyczy głównie strony obliczeniowej zagadnienia; zgodnie z przemysłowym podziałem rodzajów wilgoci [117] występują następujące odpowiedniki i zależności:

- wilgoć przemijająca W_p której odpowiada $(W_a + W_z + W_g)$
- wilgoć higroskopijna W_h której odpowiada W_i
- wilgoć całkowita W_c której odpowiada $(W_i + W_a + W_z + W_g)$ z tym, że

$$W_c = W_p + W_h \frac{100 - W_p}{100} .$$

W przeróbce mechanicznej znana jest zależność skuteczności odwadniania przedstawiana zwykle jako funkcja czasu i rodzaju parametrów tego procesu, co ilustruje rys. 1.2-7. Wykazano, że końcowa zawartość



Rys. 1.2-7. Wpływ czasu odwadniania na zawartość wody w różnych zbiorach ziarn X_1, X_2 i X_3

cieczy w zbiorze zależy głównie od metody odwadniania, charakterystyki ziarn i ich zbioru oraz własności cieczy; przede wszystkim jednak zależy od sił spójności [6, 7, 8]. Dla jednoskładnikowego - monodyspersyjnego układu, można określić minimalny udział cieczy wg zależności

$$W_z + W_a = \frac{d_c}{d_s} \underbrace{\left(k_2 \cdot \frac{\sigma \cdot \cos\delta}{d_c}\right)}_{k_1} \cdot \frac{\varrho_m \cdot d_s}{z \cdot D_{śr}} \Bigg)^{0,25} \frac{kg\ H_2O}{100\ kg\ cz.\ st} , \quad (1.2\text{-}21)$$

gdzie:

d_c, d_s - g/cm^3;
σ - dyn/cm;
O_m - cm^2/g;
$D_{śr}$ - średnia ważona wielkości ziarn, (mm)
k_1, k_2 - współczynnik zależny od ziarn (cm^2)
z - krotność przyspieszenia ziemskiego.

Wartość współczynnika k_2 można ustalić doświadczalnie i tak np. dla ziarn węglowych o $d_s = 1{,}3$ g/cm^3 $k_2 = 3340$ cm^2, a dla ziarn wapienia o $d_s = 2{,}7$ g/cm^3 $k_2 = 5180$ itd.

Obok zawartości cieczy w zbiorze ziarn często interesująca w rozważaniach jest wysokość h_s (mm) na jaką ciecz może podejść w kapilarach międzyziarnowych, co ma znaczenie dla wszystkich rodzajów odwadniania; dla odwadniania obciekowego statycznego lub przeprowadzanego w wirówce działającej okresowo

$$h_s = k_3 \cdot \frac{2\sigma \cdot \cos\delta}{d_c} \cdot \frac{1}{z} \left(\frac{D_{śr} + D_h}{2}\right)^{-1,2}, \qquad (1.2\text{-}22)$$

gdzie:

D_h - największa częstość występowania określonej wielkości ziarna w zbiorze mm

k_3 - współczynnik charakterystyczny dla ziarn.

W pewnych przypadkach zachodzi potrzeba określenia resztkowej (najmniejszej) zawartości cieczy w zbiorze po upływie określonego czasu t (s), który można obliczyć ze wzoru

$$t = k_4 \cdot \frac{\mu}{r_k^2 \cdot d_c \cdot z} \left(H - h + h_s \cdot \ln \frac{H - h_s}{h - h_s}\right), \qquad (1.2\text{-}23)$$

gdzie:

μ - lepkość cieczy (kg s/m^2)
r_k - średni promień kapilar międzyziarnowych (cm)

H - całkowita grubość warstwy ziarn (mm)

h - odległość od sita dla której oblicza się czas (mm)

k_4 - współczynnik charakterystyczny dla ziarn.

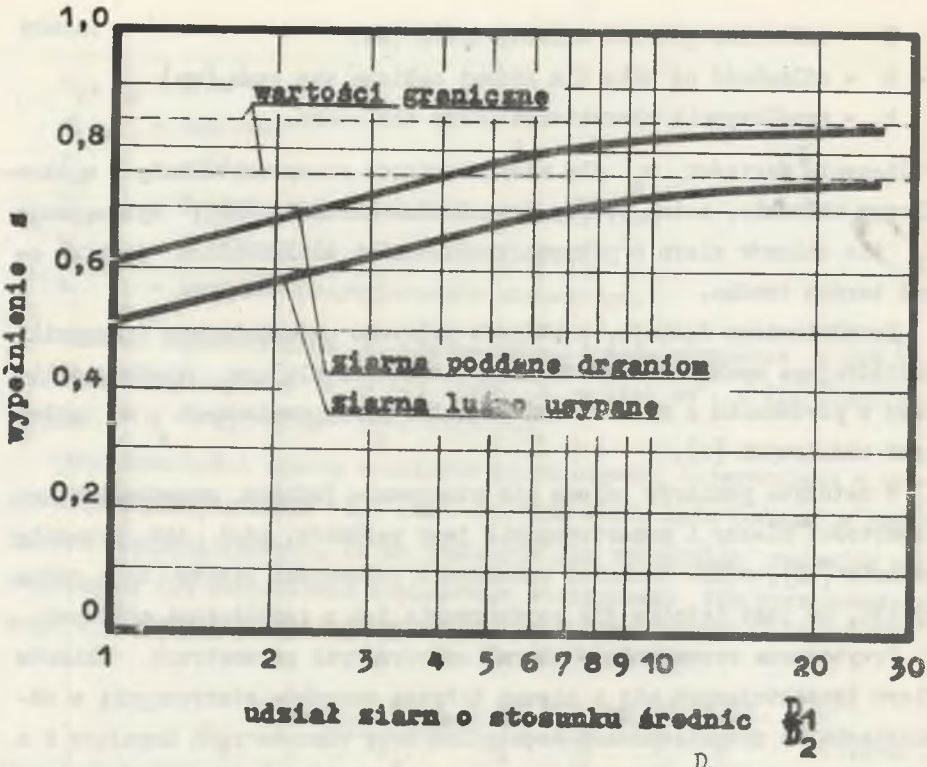
Obliczenie wartości r_k dla zdefiniowanych ziarn usytuowanych w określonym układzie, można obliczyć na drodze matematycznej; wyznaczenie r_k dla zbiorów ziarn o różnych kształtach i wielkościach jest na ogół bardzo trudne.

Przedstawione funkcje, w których związano najważniejsze czynniki kształtujące mechanizm odwadniania, dają zadowalające wyniki obliczeń w porównaniu z rezultatami pomiarów przeprowadzonych na układach modelowych [6].

W metodyce pomiarów zaleca się stosowanie jednego sposobu pomiaru zawartości cieczy i przestrzeganie jego warunków, gdyż jak wykazały badania [89], różne techniki oznaczania zawartości cieczy dają różne wyniki, co jest istotne dla porównywania ich z rezultatami obliczeń.

Przytoczone rozważania o charakterystycznych parametrach zbiorów ziarn kontaktujących się z cieczą dotyczą warunków statycznych; w odwadnianiu na przesiewaczach szczególną rolę odgrywa ruch drgający i z tego powodu celowym jest zilustrowanie ważniejszych własności zbiorów ziarn poddanych wstrząsom [92]. Stwierdzono, że wypełnienie $s(s = 1-\varepsilon)$ przestrzeni zbioru ziarnami nie jest równomierne w całej objętości naczynia, ze względu na tzw. efekt ścianowy; w sąsiedztwie ścian wstrząsanego naczynia wartość s jest nieco mniejsza niż w pewnej od nich odległości. Dla układów jednoskładnikowych - monodyspersyjnych różnica zanika dopiero w odległości 30 D.

Charakterystyczna jest także różnica jaka występuje w wartościach wypełnienia s otrzymanych dla zbiorów ziarn luźno usypanych oraz poddanych ruchowi drgającemu o identycznej charakterystyce. Przykład zmian wypełnienia układu o dwóch wielkościach ziarn D_1 i D_2 ilustruje rys. 1.2-8, z którego wynika, że zmiana wartości s dla zbioru usypanego luźno i wstrząsanego przebiega równolegle w miarę wzrostu udziału ziarn większych. Do 10-krotnego udziału ziarn dużych obserwuje się znaczne zwiększenie się wypełnienia, a po przekroczeniu tej

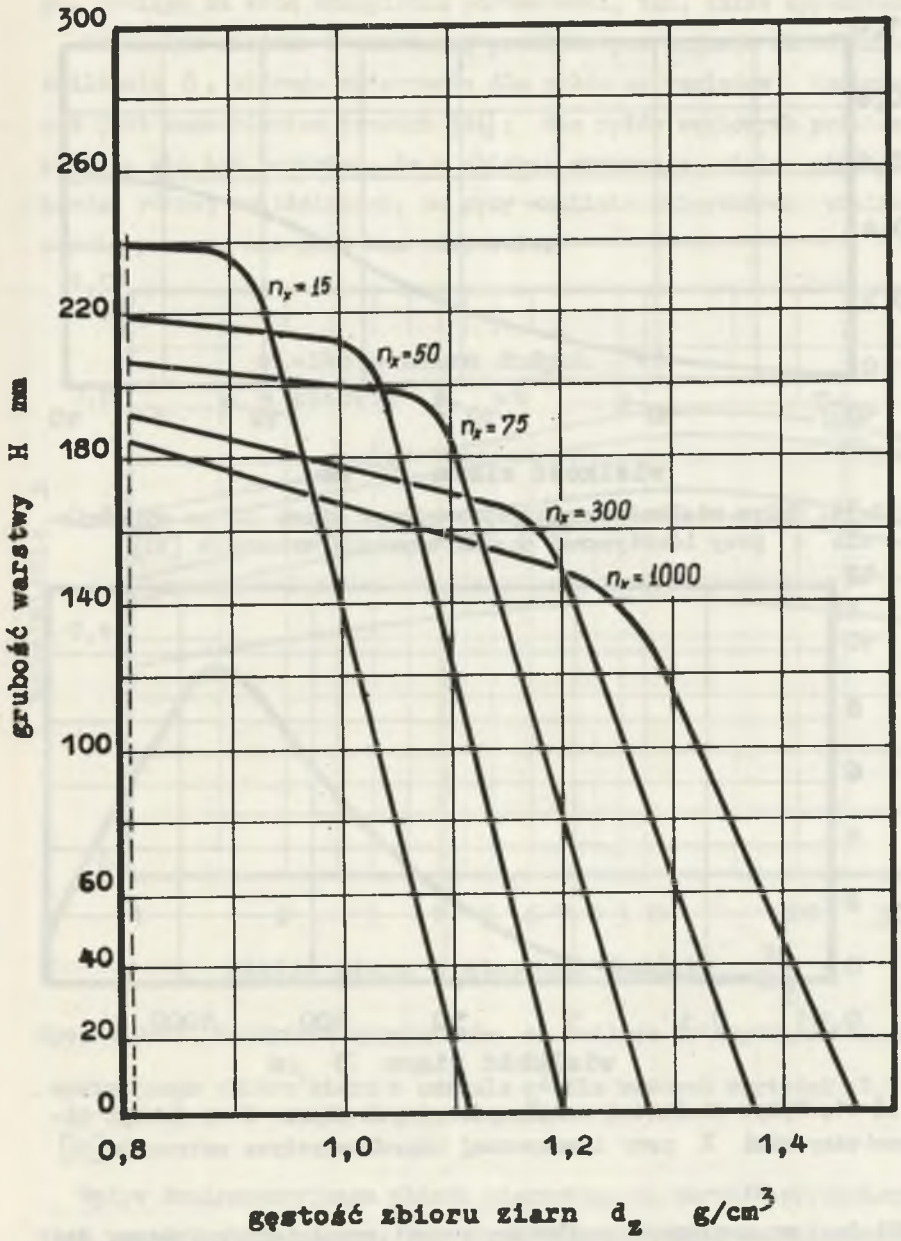


Rys. 1.2-8. Wpływ udziału ziarn o stosunku średnic $\frac{D_1}{D_2}$ na wartość wypełnienia s [92]

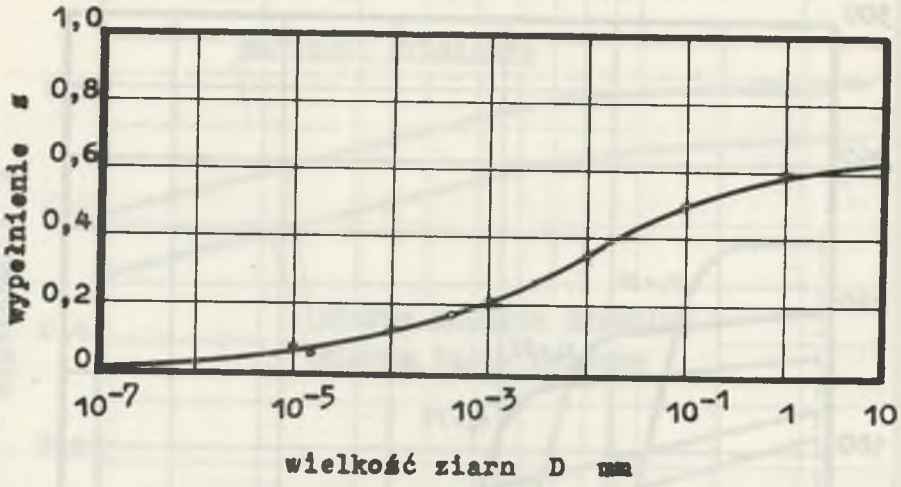
wartości przyrost s jest niewielki - zmierza jednak do wartości granicznej.

Stwierdzono doświadczalnie, że gęstość upakowania ziarn piasku względem siebie podczas wstrząsów o identycznej charakterystyce, zmienia się z ich ilością oraz z grubością warstwy, co pokazano na rys. 1.2-9. Całą wysokość zbioru ziarn podzielono po każdej serii wstrząsów na dwudziestomilimetrowe warstewki i oznaczono ich średnią gęstość d_z, której rozkład jest bardzo wymowny.

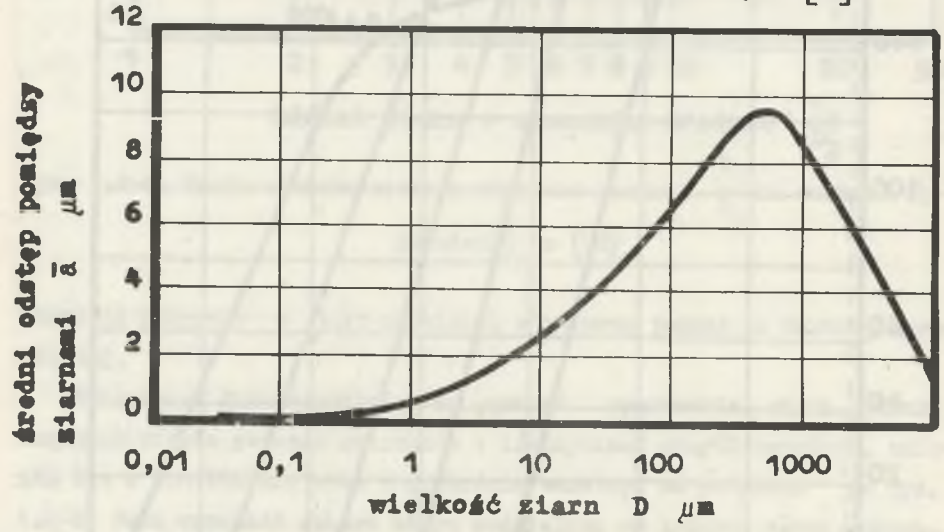
Za charakterystyczną można również uważać zmianę wypełnienia s określoną dla monodyspersyjnych zbiorów ziarn o różnych wielkościach; na rys. 1.2-10 przedstawiono wzrost wartości s, odpowiadający poszczególnym wymiarom ziarn. Z wykresu widać, że w obszarze wielkości



Rys. 1.2-9. Wpływ ilości wstrząsów n_x o amplitudzie s_o = 10 mm na gęstość zbioru ziarn piasku przy różnych wysokościach warstwy [92]



Rys. 1.2-10. Wpływ wielkości monodyspersyjnych ziarn D na wypełnienie s przy identycznej charakterystyce wstrząsów [92]



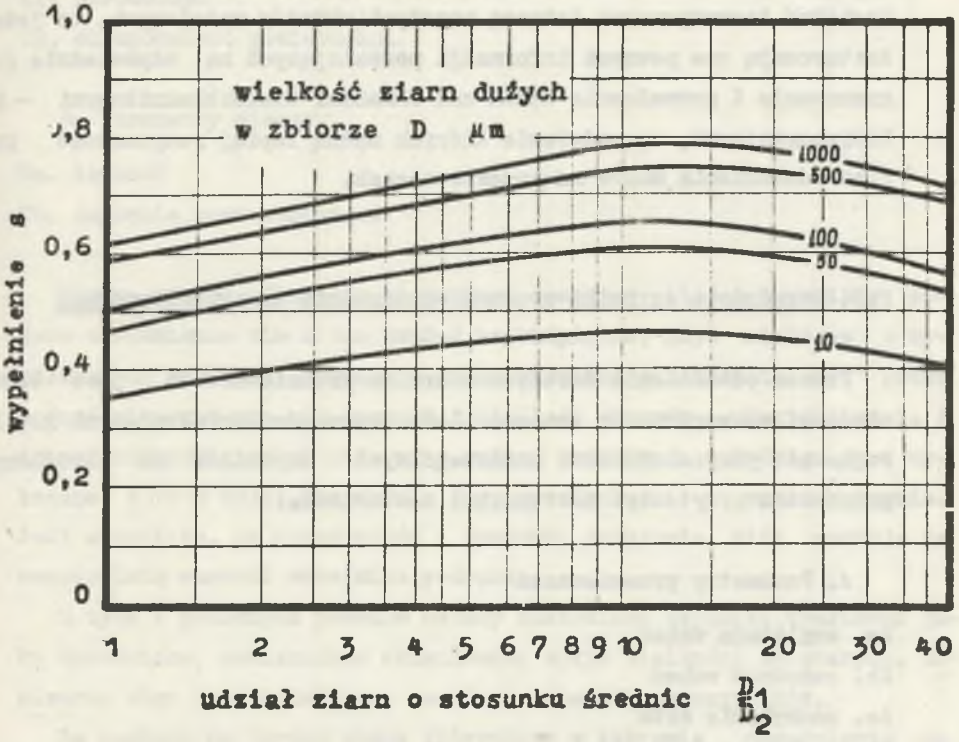
Rys. 1.2-11. Wpływ wielkości monodyspersyjnych ziarn D na średni odstęp pomiędzy nimi $\bar{a}$ przy identycznej charakterystyce wstrząsów[92]

od 0,001 do 1 mm następuje trzykrotny wzrost wypełnienia, z czego wynikają pewne wnioski dla układów polidyspersyjnych.

Podobnie interesujący jest przebieg zmian średnich wielkości odstępów międzyziarnowych zbiorów monodyspersyjnych, pokazany na rys. 1.2-11; znamienna jest maksymalna wartość $\bar{a}$ przypadająca na wymiar oko-

ło 0,7 mm. Zmiana wielkości ziarn, a więc i składu granulometrycznego, pociąga za sobą odchylenia porowatości, tzn. także wypełnienia.

Oddzielne miejsce w omawianej problematyce zajmuje określenie kąta zwilżania δ, którego zmierzenie dla pyłów ze względów technicznych nie jest zagadnieniem prostym [41]; dla pyłów węglowych problem komplikuje się tym bardziej, że w zbiorze występuje wiele składników o bardzo różnej zwilżalności, co przy analizie zmierzonych wielkości i ocenie procesu nie jest bez znaczenia.



Rys. 1.2-12. Najwyższe wypełnienie s możliwe do uzyskania dla dwudyspersyjnego zbioru ziarn o udziale $\frac{D_1}{D_2}$ dla różnych wartości D_1 [92]

Wpływ dwudyspersyjnego składu ziarnowego na wartość wypełnienia został przedstawiony na rys. 1.2-12, z którego widać, że niezależnie od średnicy ziarn, na których się eksperymentuje, maksymalna wartość s

przypada na $\frac{D_1}{D_2} \cong 13$; znamienny jest również wzrost wypełnienia towarzyszący coraz większym ziarnom.

Z analizy przedstawionych zależności można wywnioskować, jakie występują powiązania pomiędzy składem ziarnowym, wielkością ziarn a porowatością lub wypełnieniem w różnych warunkach oraz co kształtuje kryteria odwadniania. Pomimo, że scharakteryzowane wyniki pomiarów i dociekań teoretycznych dotyczą prostych układów modelowych, to jednak dostarczają one pewnych informacji pozwalających na odpowiednie programowanie i prowadzenie badań nad układami wieloskładnikowymi - polidyspersyjnymi, na podstawie których można lepiej rozpracować problem odwadniania mułów na przesiewaczach.

1.3. Zasadnicze czynniki procesu odwadniania na przesiewaczach

Proces odwadniania drobnych ziarn na przesiewaczach jest bardzo złożony, ze względu na znaczną ilość czynników kształtujących go; kierując się przynależnością poszczególnych czynników do określonych grup można przytoczyć następujące zestawienie:

A. Parametry przesiewacza

Aa. amplituda wahań
Ab. częstość wahań
Ac. nachylenie sita
Ad. nachylenie wahaczy
Ae. czas odwadniania
Af. rodzaj sita

B. Parametry nadawy

Ba. zagęszczenie części stałych
Bb. ilość podawana w czasie
Bc. temperatura
Bd. własności termodynamiczne

C. Parametry części stałych

Ca. stopień niejednorodności wynikający z udziału różnych składników
Cb. skład ziarnowy
Cc. gęstość
Cd. kształt
Ce. własności powierzchniowe
Cf. porowatość
Cg. chropowatość powierzchni

D. Parametry cieczy

Da. lepkość
Db. napięcie powierzchniowe

Pomimo wyszczególnienia stosunkowo znacznej ilości czynników, podane zestawienie nie można uważać za kompletne, gdyż niektóre z wymienionych wielkości zawierają kilka wtórnych zależności; np. przez rodzaj sita rozumie się kształt i wielkość otworów, ukształtowanie i szorstkość powierzchni sita oraz rodzaj tworzywa, z którego jest wykonane, a to z kolei decyduje o jego sprężystości i oporach tarcia. Jest oczywiste, że sprężystość i krotność podparcia sita rzutuje na rzeczywistą wartość wskaźnika podrzutu.

Z tych i podobnych powodów należy zestawione czynniki traktować jako zasadnicze, zawierające skumulowany wpływ wielkości związanych. Konieczne więc jest kolektywne omawianie niektórych czynników.

Ze względu na bardzo skąpą literaturę w zakresie odwadniania na przesiewaczach, niezbędne jest przeanalizowanie tych danych dotyczących przesiewania na sucho, które mogą być użyteczne dla wyznaczenia zakresu pomiarów i prawidłowej oceny wyników.

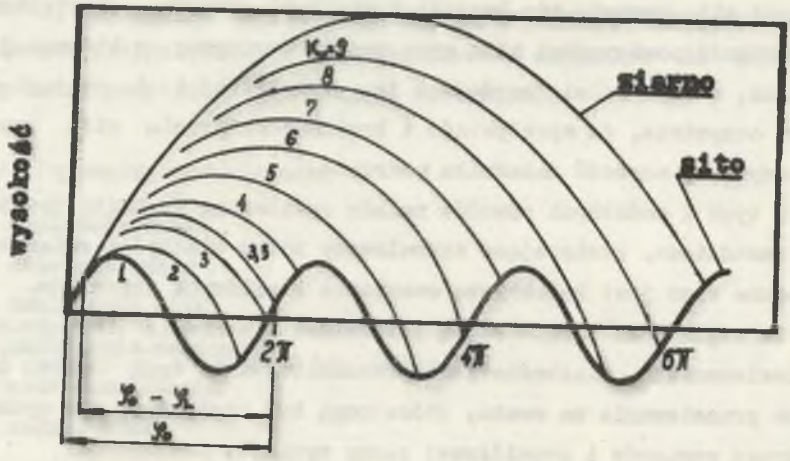
Właściwą podstawą oceny i porównywania pracy przesiewaczy jest wg Dietrycha [25] wskaźnik przesiewacza Z, który określa związek pomiędzy wielkością powierzchni sita F, częstością wahań n, wielkością otworów sita ⊙ i współczynnikiem prześwitu A oraz współczynnikiem przesiewacza p

$$Z = F \cdot n \cdot \odot \cdot A \cdot \frac{1}{p} \qquad (1.3\text{-}1)$$

wskaźnik ten powinien zastępować tzw. wydajność nominalną przesiewacza. Pewne wątpliwości może budzić współczynnik p, którego wartości liczbowe nie zostały jeszcze wyczerpująco opracowane. Częstość wahań występująca w tym wzorze wyrażona jako prędkość kątowa ω, tworzy z amplitudą wahań a, kątami nachylenia sita β i wahaczy α oraz przyspieszeniem ziemskim g zależność określaną jako wskaźnik podrzutu K_v

$$K_v = \frac{a \cdot \omega^2}{g} \cdot \frac{\sin(\alpha + \beta)}{\cos\beta} \cdot \qquad (1.3\text{-}2)$$

Suma kątów $\alpha + \beta = \varphi$ i nazywana jest kątem torów sita, który zmienia się podczas wahań o taką wartość o jaką odchyla się kąt α. Wskaźnik podrzutu jest klasyczną wielkością charakteryzującą zmiany wysokości położenia pojedynczego ziarna i toru jego lotu oraz prędkości względem sita. Wyrażenie $a\omega^2/g = K$ [104] również nazywa się wskaźnikiem przesiewacza, lecz nie należy go utożsamiać ze wzorem (1.3-1).



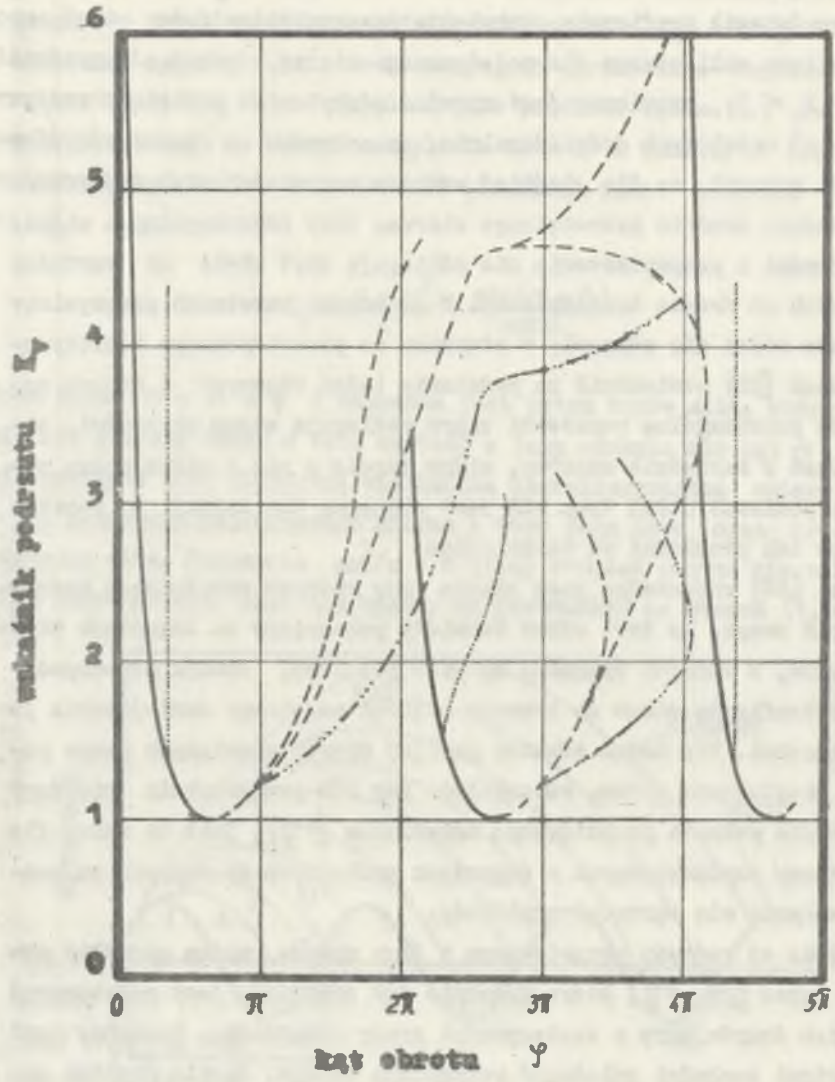
Rys. 1.3-1. Zmiana wysokości położenia sita i pojedynczego ziarna [49]

W fundamentalnych pracach z tego zakresu Bachmann [5], Dietrych [25], Kluge [49], Moiset i Heemskerk [63] oraz Wessel [114] opisali ruch sita i pojedynczego ziarna, dla którego wartość graniczna $K_v < 3,3$

co ilustruje rys. 1.3-1. Ruch całego zbioru ziarn na sicie nie spełnia założeń ruchu pojedynczego ziarna. Baader [wg 114] na podstawie badań przedstawił graficznie odchylenie rzeczywistego toru warstwy ziarn od toru obliczonego dla pojedynczego ziarna, podając zależność dla $1 < K_v < 6$; znamienne jest wyraźne odchylenie wartości teoretycznych od ustalonych doświadczalnie, co pokazano na rys. 1.3-2.Böttcher [17] wykazał, że dla cienkiej warstwy o grubości nie przekraczającej sześciu średnic przeciętnego ziarna, tory poszczególnych ziarn, ich prędkości i przyspieszenia nie odbiegają zbyt wiele od wartości określonych na drodze teoretycznej. W grubszych warstwach rzeczywisty ruch ziarn różni się znacznie w stosunku do przewidywanego teoretycznie. Czubak [22] stwierdził na podstawie badań własnych i innych autorów, że poszczególne warstewki ziarn podlegają siłom ciężkości, siłom uderzeń o sąsiednie warstwy, siłom tarcia o nie i siłom oporu powietrza; ponieważ układ tych sił jest odmienny dla każdej z warstewek, więc ich prędkości są także różne.

Riedel [80] rozważając ruch ziarna przy różnych wskaźnikach podrzutu zwrócił uwagę, że tzw. efekt Schmidta polegający na drganiach własnych drutów, z których wykonane są sita plecione, obniża prawdopodobieństwo trafienia ziarn do otworów wskutek pozornego zmniejszania jego powierzchni. Nie można również pomijać oporów stawianych przez powietrze oscylującym sitom, szczególnie gdy ich powierzchnia nie jest równomiernie pokryta przesiewanym materiałem [115]; jest to ważne dla przesiewaczy szybkobieżnych o drganiach swobodnych ze względu na możliwość wahania się wartości amplitudy.

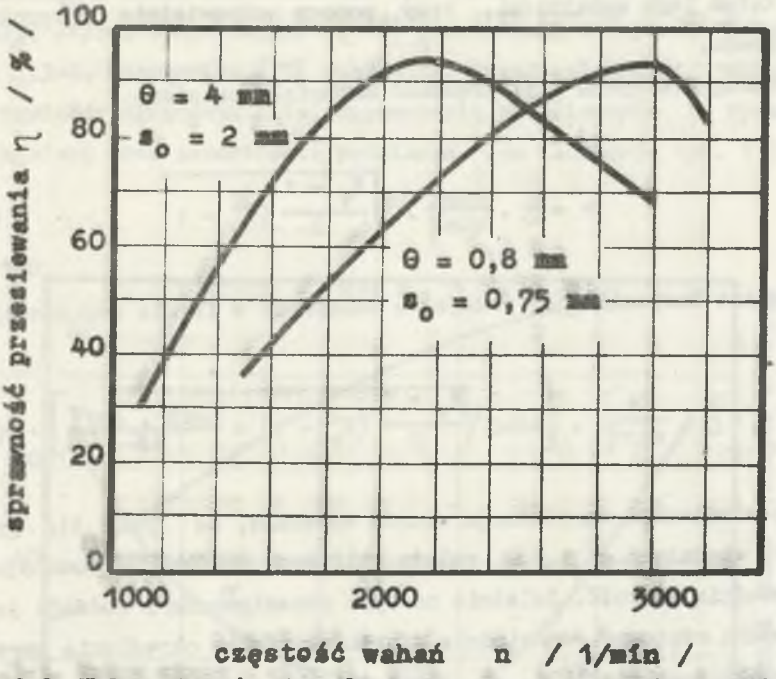
Zależnie od rodzaju przesiewacza i jego napędu można określić amplitudę wahań [25, 97], która podobnie jak częstość jest podstawowym czynnikiem decydującym o skuteczności pracy urządzenia. Pomiędzy tymi wielkościami zachodzi zależność polegająca na tym, że dla niskich amplitud stosuje się wysokie częstości i odwrotnie - zależnie od wymiarów ziarn i otworów sita, na którym następuje klasyfikacja [61, 26, 104]; charakterystyczny przykład wpływu tych czynników na sprawność przesiewania ilustruje rys. 1.3-3.



Rys. 1.3-2. Przesunięcia fazowe oderwania ziarna od sita i wtórnego zetknięcia w stosunku do wartości określonych dla pojedynczego ziarna

..... oderwanie ziarna ustalone doświadczalnie

– – – – – zetknięcie ziarna z sitem ustalone doświadczalnie (wg Baade-rá [115])



Rys. 1.3-3. Wpływ otworów sita Θ, skoku s_o i częstości wahań n na sprawność przesiewania η (wg Glatzelá, [104])

Jednym z ważniejszych czynników kształtujących skuteczność klasyfikacji jest transportowa prędkość materiału na sicie v, którą kształtują najistotniejsze parametry przesiewacza. Klockhaus [48] określił tę zależność, a Kluge [49] podał poszerzoną jej formę; także Böttcher [17] i Wehmeier [110] opracowali odpowiednie sformułowania lecz obliczone tymi trzema wzorami średnie prędkości dają te same wyniki. Uwzględniając liczbę wahań m podczas lotu ziarna oraz kąt φ_L, przy którym ziarno oderwie się od sita oraz kąt φ_o, przy którym zetknie się z nim znowu, a także inne ważniejsze wielkości, Klockhaus [48] podał wzór na prędkość

$$v = \frac{\sqrt{g}}{4\pi \cdot m} \cdot \frac{\cos\gamma}{\cos\beta} \cdot \sqrt{a \cdot K} \cdot \sin\varphi_L \cdot (\varphi_o - \varphi_L)^2. \qquad (1.3\text{-}3)$$

Pěčinka [72] posługując się wymienionym sformułowaniem przedstawił dla określonych warunków sposób dobierania parametrów przesiewacza

pod kątem jego wydajności, przy pomocy odpowiednio przygotowanego nomogramu.

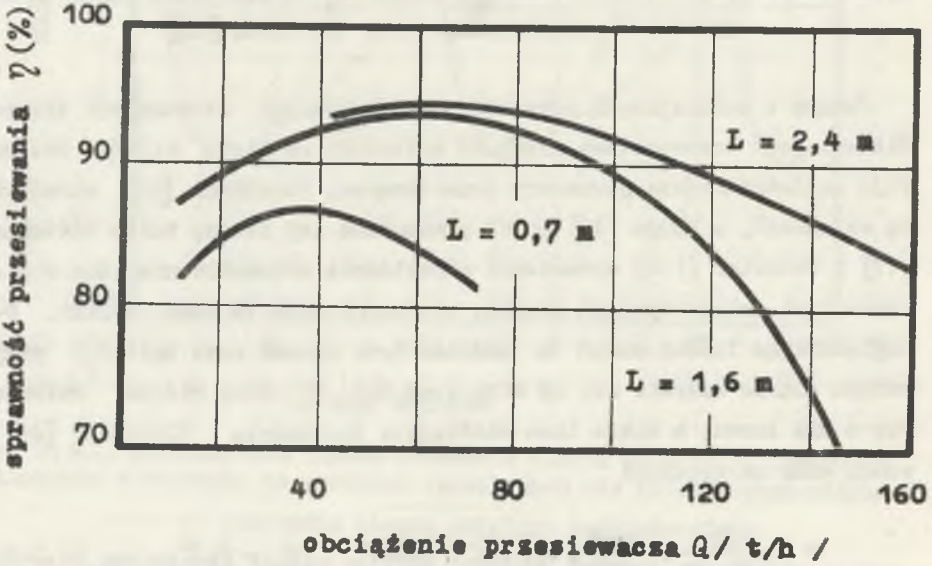
Według Dietrycha [25] prędkość materiału na sicie

$$v = \frac{g}{\omega} \cdot \frac{\cos\alpha}{\sin\varphi} \cdot \sqrt{\frac{K_v - 1}{2}(K_v^2 - 1)} \qquad (1.3\text{-}4)$$

natomiast Nawrocki [66] podaje tę zależność w formie uściślonej

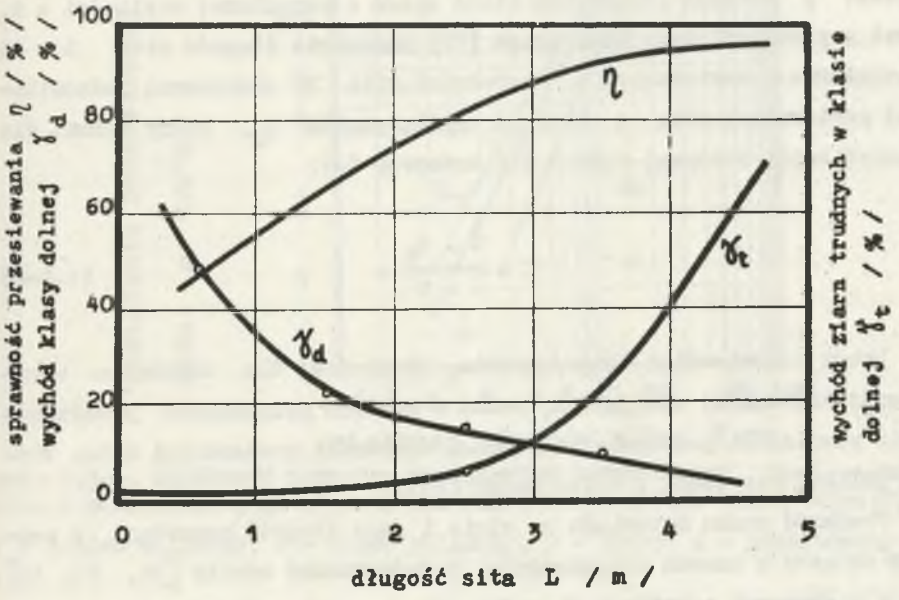
$$v = \frac{g}{\omega} \cdot \frac{1}{\sin\varphi} \cdot \left[\cos\alpha\sqrt{\frac{K_v - 1}{2}(K_v^2 - 1)} + \frac{\cos\beta \cdot \cos\varphi}{2\pi}\right] \cdot \qquad (1.3\text{-}5)$$

Doświadczalna weryfikacja wzorów wykazała, że już dla grubości warstw większych od 1,5 Θ należy obliczoną prędkość pomniejszyć o odpowiednią wartość. Zależnie od typu przesiewacza i rodzaju jego ruchu można stosować odpowiednie sformułowania na określenie prędkości materiału na sicie [67].



Rys. 1.3-4. Wpływ długości sita L przy różnych obciążeniach Q na sprawność przesiewania η [106]

Czynnikiem o dużym znaczeniu dla sprawności przesiewania jest długość sita, której wpływ Taggart [106] przedstawił w sposób pokazany na rys. 1.3-4. Ponomariew [77] scharakteryzował zależności, jakie zachodzą pomiędzy długością sita, sprawnością przesiewania i wychodem trudnych ziarn oraz zawartością podziarna - co ilustruje rys. 1.3-5.



Rys. 1.3-5. Wpływ długości sita L na sprawność przesiewania η, wychód klasy dolnej (0-13 mm) γ_d i na wychód ziarn trudnych (10-13 mm) w klasie dolnej γ_t [77]

W niektórych przypadkach wykorzystuje się długość sita L do określenia pewnych wielkości. Abramowicz [wg 77] podaje do wyznaczenia sprawności przesiewania η zależność

$$\eta = \frac{L^{k_5}}{L^{k_5} + k_6}, \qquad (1.3\text{-}6)$$

gdzie k_5 i k_6 są współczynnikami wyznaczonymi doświadczalnie dla przesiewanego materiału i danego rodzaju przesiewacza. Nawrocki [68] proponuje obliczenie ilości podziarna wg wzoru

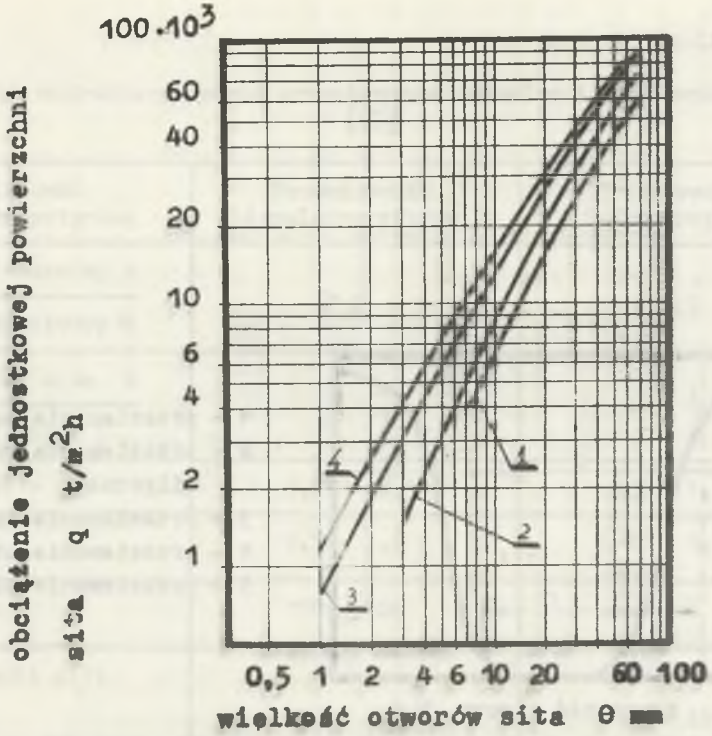
$$\mathfrak{P}_p = p \cdot e^{k_7 \cdot L}, \qquad (1.3\text{-}7)$$

gdzie: p oznacza początkową ilość ziarn o określonej wielkości a k_7 jest współczynnikiem. Ponomariew [77] uzależnia długość sita L od obciążenia przesiewacza Q, szerokości sita B, obciążenia jednostkowej powierzchni sita q oraz od współczynnika k_8, który wynosi dla klasyfikacji wstępnej 0,85 a dla końcowej 0,9.

$$L = \frac{Q \cdot k_8}{B \cdot q}. \qquad (1.3\text{-}8)$$

Dobór odpowiedniej długości sita, niezbędnej dla uzyskania określonej skutecznej wydajności, można w pewnych przypadkach przeprowadzić również na podstawie znajomości wielkości powierzchni sita, którą oblicza się jedną z kilku metod [69].

Prędkość ruchu materiału na sicie i jego długość pozostają w pewnym związku z czasem przesiewania; z doświadczeń wynika [36, 93, 12], że w pierwszych sekundach klasyfikacji przyrost masy produktu dolnego jest największy, a w miarę upływu czasu maleje aż do ustabilizowania się na pewnym poziomie, zależnie od rodzaju przesiewanego materiału, wielkości otworów sita i parametrów przesiewania. Czynniki te ujmuje się w praktyce w zależności, których wykładnikiem jest wskaźnik obciążenia jednostkowej powierzchni; przykład takiej zależności dla żwiru ilustruje rys. 1.3-6, z którego widać jak ważną jest zawartość wilgoci w tym samym zbiorze ziarn [114]. Kreller [51] podaje wskaźniki obciążenia dla konkretnych materiałów w odniesieniu do jednoznacznie określonych warunków przesiewania. Artjuszin [4] stosuje te wskaźniki w stosunku do konkretnych typów maszyn, co również zapewnia właściwą interpretację.

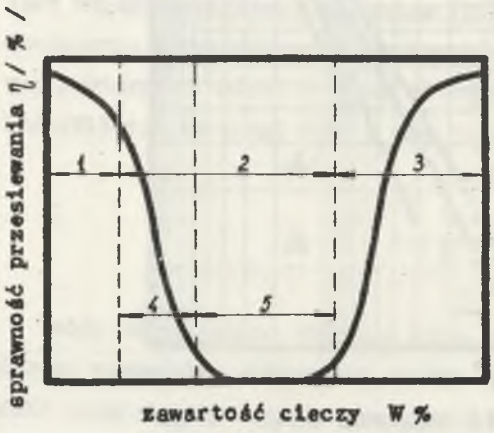


Rys. 1.3-6. Zależność pomiędzy obciążeniem jednostkowej powierzchni sita a wielkością jego otworów dla naturalnego zbioru ziarn żwiru [114]
1 - bardzo wilgotny, 2 - nieco wilgotny, 3 - suchy, 4 - przesiewany z udziałem wody natryskowej

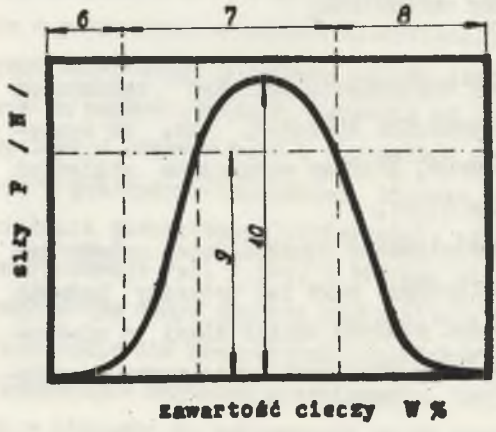
W przypadkach gdy konieczne jest zapewnienie wysokiej sprawności klasyfikacji, stosuje się niższe wskaźniki obciążeń, tzn. że występuje tzw. przesiewanie cienkowarstwowe, którego ważniejsze wielkości charakterystyczne ilustruje tablica 1.3-1.

Przy kierowaniu materiału na przesiewacze odwadniające, należy dodatkowo uwzględnić również skład ziarnowy, gdyż jak wykazały badania [100, 105] zależnie od rodzaju części stałych udział klasy o wielkości ziarn mniejszej od wymiarów otworów sita jest ograniczony ze względu na wartość uzysku.

Przy rozpatrywaniu własności nadawy kierowanej na przesiewacz, bierze się także pod uwagę zawartość cieczy, której wpływ na proces Batel [8] i Schlebusch [91] zilustrowali jak na rys. 1.3-7. Rosnąca za-



1 - przesiewanie na sucho
2 - przesiewanie materiału wilgotnego
3 - przesiewanie na mokro
4 - przesiewanie utrudnione
5 - przesiewanie niemożliwe



6 - woda wewnętrzna
7 - woda powierzchniowa
8 - woda międzyziarnowa
9 - siły od przesiewacza
10 - siły spójności

Rys. 1.3-7. Wpływ zawartości cieczy w zbiorze ziarn na wielkość sił spójności i sprawność przesiewania [91]

Tablica 1.3-1

Wielkości charakterystyczne przesiewania normalno i cienkowarstwowego [90]

Wielkość charakterystyczna	Przesiewanie normalnowarstwowe	Przesiewanie cienkowarstwowe
grubość warstwy h / wielkość otworu Θ	$\geqslant \frac{3}{1}$	$\frac{1}{1} - \frac{2}{1}$
szerokość sita B / długość sita L	$\frac{1}{2} - \frac{1}{3}$	$\frac{1}{1} - \frac{1}{2}$
prędkość v m/s	0,15 - 0,3	0,5 - 1,0
Θ_{min} mm	0,5 - 1,0	0,05 - 0,1
Θ_{max} mm	150 - 200	3 - 5
pochylenie sita β^{o}	0 - 30	25 - 45
krotność g cm/s^2	4 g - 10 g	5 - 15 g

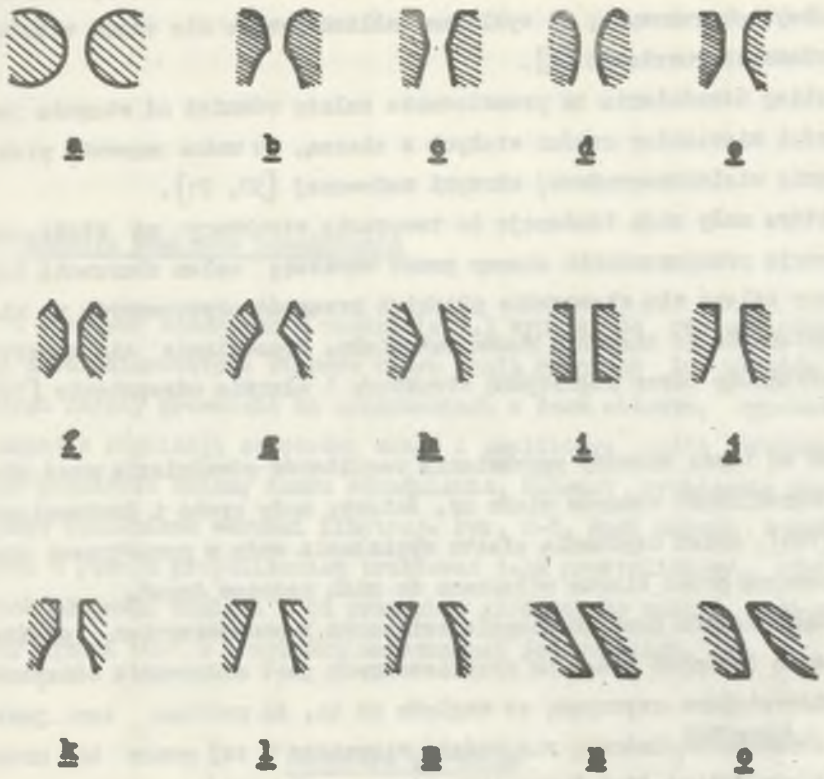
wartość cieczy powoduje wzrost sił spójności 10 , które przekraczają wartość sił wynikających z podrzutu i wtedy oddzielenie ziarn od siebie nie jest możliwe. Dopiero po przekroczeniu pewnego udziału cieczy (odcinek 3) następuje dalsze przesiewanie i towarzyszące mu odwadnianie, co jest możliwe ze względu na spadek wartości sił spójności poniżej wartości sił, które daje przesiewacz; wynika stąd, że podstawowe znaczenie dla procesu odwadniania mają parametry przesiewacza. Spośród 28 typów przesiewaczy [113] większość może być stosowana jako odwadniające z tym jednak, że zadowalające wyniki dają tylko te, które mają wysokie wskaźniki podrzutu, pracują przy odpowiedniej charakterystyce wahań i wyposażone są w odpowiednie sita; skok mierzony na sicie wynosi 1 do kilku milimetrów, a częstość wahań 1000 do 6000 1/min.

Do odwadniania ziarn drobnych używa się najczęściej przesiewacze o drganiach swobodnych, pracujące przy częstościach nadkrytycznych [94 34, 16, 84]. Przez stosowanie odpowiednich konstrukcji i napędów uzyskuje się żądane tory sita jak kołowy, eliptyczny lub prostoliniowy, zależnie od rodzaju odwadnianego materiału. Ustalenie prawidłowego wskaźnika objętościowego obciążenia jednostkowej powierzchni sita $[m^3/m^2h]$, wymaga szczegółowych badań [35] uwzględniających zarówno efekt odwadniania, jak i możliwość zatrzymania jak największej ilości części stałych w produkcie górnym.

Spośród kilku grup urządzeń do odwadniania drobnych ziarn [45, 46, 81, 59] (poza filtrami i wirówkami) rola przesiewaczy jest nadal dominująca [55, 14, 24, 70, 109, 56]. Obok coraz nowszych i doskonalszych konstrukcji i napędów w tej liczbie także ultraszybkich przesiewaczy [103, 28, 95, 58, 78] sterowanych wzmacniaczami magnetycznymi [32, 19, 39], stosuje się specjalne sita, których zadanie polega na przepuszczeniu jak największej ilości cieczy i zatrzymaniu maksymalnej ilości ziarn przy zachowaniu bardzo długiej żywotności.

W praktyce przyjęło się stosowanie do odwadniania sit następujących typów: Wibro, Dovex, Dopra, Rastex, Serpa, Harfa, Serpa-Harfa, DS-Harfa, Wedra, DD, Inwex, Rima W, Rima F, Rimetta, Ultra-Rimetta, Record, Rezina, Duo, Conidur [54, 73], Umbra [111], Duenero - gumowe [29] i inne sita gumowe [112, 118, 107] oraz z tworzyw sztucznych [101 118], które zależnie od splotu i rodzaju użytego tworzywa przy tym samym wymiarze zastępczym otworu, wykazują znaczne różnice w przepuszczalności cieczy i różną zdolność zatrzymywania ziarn [37]. Przepuszczalność zależy od zmodyfikowanej liczby Re_x w ten sposób, że jak wykazał Blass [13] dla $Re_x < 2$ wartość współczynnika oporu nie ulega zasadniczym zmianom, a dla $Re = 10^3$ zmienia się prawie o 100% dla różnego rodzaju siatek.

Zależnie od rodzaju użytych drutów profilowych do wykonania sit, można otworom nadać różne kształty; w przypadku tłoczenia otworów w blachach lub odlewania sit gumowych, nadaje się także odpowiednie kształty otworom, aby mogły sprostać stawianym wymaganiom. Przykłady najczęściej stosowanych profilów otworów przedstawia rys. 1.3-8, z któ-



Rys. 1.3-8. Profile otworów w sitach [82]

rego widać, że niektóre otwory utrudniają zaklinowanie się ziarn, inne zaś wypełniają się kroplami cieczy wytrząsanej podczas drgań, co powoduje zasysanie coraz nowych kropel. Doświadczenia wykazały, że odpowiedni profil drutu, z którego wykonane jest sito nie tylko wpływa na jakość otrzymanych produktów odwadniania, lecz także przedłuża żywotność sita [99]. Warunkiem niezbędnym dla prawidłowej pracy sit plecionych jest odpowiednie ich naprężanie, które zapewniają różnego rodzaju napinacze [27].

Niezależnie od specjalnie dobieranych kształtów otworów sit, często obserwuje się ich zatykanie trudnymi ziarnami, które można usunąć przy pomocy różnych urządzeń bijakowych uruchamianych samoczynnie okresowo co 10 do 30 minut [33] lub z większą częstością [42]; do przesiewania i odwadniania średnio dużych ziarn można stosować długie i

cieńkie proste lub wygięte w płaszczyznie pionowej rusztowiny mocowane w uchwytach gumowych, co wyklucza zaklinowywanie się ziarn wskutek drgań własnych rusztowin [3].

Przebieg odwadniania na przesiewaczu zależy również od stopnia jednorodności mieszaniny części stałych z cieczą, co można zapewnić przez stosowanie wieloprzegrodowej skrzyni nadawczej [30, 31].

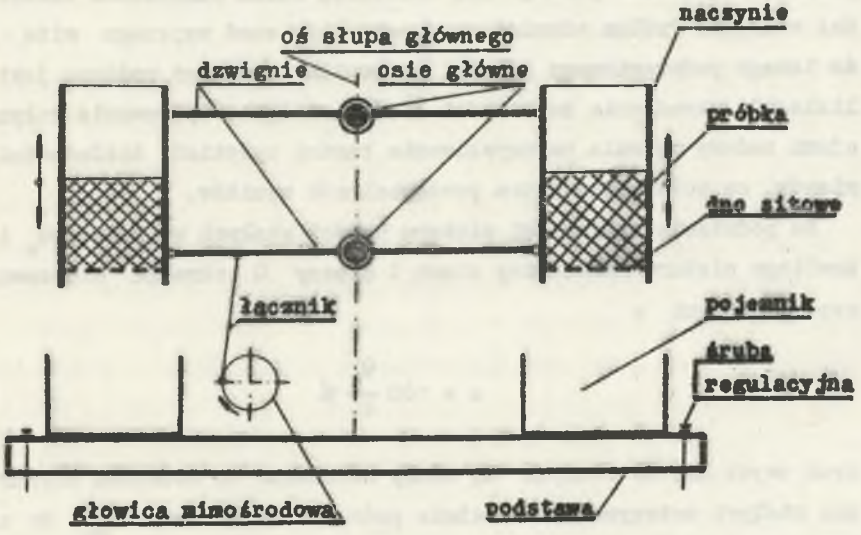
Niektóre muły mają tendencję do tworzenia struktury na sicie, co nie sprzyja przepuszczaniu cieczy przez warstwę; celem zburzenia tej struktury zaleca się stosowanie płaskich przegród usytuowanych na sicie prostopadle do kierunku ruchu materiału. Przewalanie się warstwy przez przegrody burzy półsztywną strukturę i ułatwia odwadnianie [30, 31].

Znane są także sposoby poprawiania rezultatów odwadniania przez mieszanie określonych zbiorów ziarn np. ściery, muły grubo i drobnoziarniste [108], celem uzyskania efektu wyciskania wody z przestrzeni międzyziarnowych przez ziarna wtłaczane do nich podczas drgań.

Zagadnieniem do pewnego stopnia związanym z podwyższeniem efektu odwadniania drobnych ziarn na przesiewaczach jest stosowanie odczynników powierzchniowo czynnych; ze względu na to, że problem ten jest bardzo obszerny i złożony, nie będzie rozważany w tej pracy bo może stanowić przedmiot oddzielnego opracowania.

2. Technika pomiarów odwadniania

Z rozważań zawartych w rozdziale 1.3 wynika, że pomiary odwadniania drobnoziarnistych zbiorów ziarn węgla surowego lub układów modelowych należy prowadzić na urządzeniach z dnem sitowym, wyposażonych w napęd z regulacją częstości wahań i amplitudy; nadto powinna istnieć możliwość zmiany czasu odwadniania. Schemat urządzenia spełniającego wymienione warunki ilustruje rys. 2-1. Ruch naczyń z próbkami można z pewnym przybliżeniem traktować jako prostoliniowy, gdyż stosunek długości dźwigni - od przegubów głównych do naczyń - do amplitudy wynosi 60:1 w przypadku maksymalnej jej wartości.



Rys. 2-1. Schemat urządzenia pomiarowego

Przygotowanie urządzenia do pracy polega na nastawieniu na głowicy mimośrodowej odpowiedniego skoku mierzonego bezpośrednio w określonym miejscu dna sitowego oraz na przygotowaniu żądanego przełożenia przekładni, które można zmieniać skokowo w zakresie 600 do 3000 obr/min. w odstępach co około 160 obr/min. Śruby regulacyjne zapewniają poziome ustawienie podstawy urządzenia. Bardzo ciężka konstrukcja podstawy, słupa głównego i całego zespołu napędowego oraz zrównoważenie naczyń z próbkami, wyważenie łącznika i całkowicie zrównoważona głowica mimośrodowa, umożliwiają pracę przy nastawionych parametrach bez występowania istotnych drgań niezamierzonych.

Próbki przeznaczone do odwadniania przygotowane są w ten sposób, że naważki węgla zalewa się określoną ilością odpowiedniej wody (czystej lub płuczkowej sklarowanej) i miesza zawsze jednakowo i w sposób ciągły przez 5 minut. Po upływie tego czasu uruchamia się urządzenie i w około 1 sekundę po zakończeniu mieszania wlewa przygotowane porcje do naczyń z dnem sitowym. Napęd urządzenia wyłącza się i wyhamowuje po z góry zaplanowanym czasie. Odsącz z odwadniania, który przepada do pojemników poddaje się analizie, celem określenia ilości części stałych. Próbka odwodnionego materiału znad wyjętego sita wpada do innego podstawionego z kolei pojemnika i również poddana jest analizie dla określenia zawartości części stałych. Operowanie małymi porcjami nadawy pozwala na uzyskiwanie bardzo wysokich dokładności pomiarów, co potwierdza dobra powtarzalność wyników.

Na podstawie znajomości ciężaru części stałych w próbce Q_s i całkowitego ciężaru mieszaniny ziarn i cieczy Q określa się zawartość części stałych c

$$c = 100 \frac{Q_s}{Q} \% \qquad (2\text{-}1)$$

oraz uzysk części stałych u, który oznaczono ze stosunku ciężaru części stałych zatrzymanych na sicie podczas odwadniania Q_{so} do ciężaru części stałych, które znajdowały się na nim w pierwszej chwili pomiaru Q_s

$$u = 100 \frac{Q_{so}}{Q_s} \% . \qquad (2\text{-}2)$$

Traktując proces zachodzący na sicie jako klasyfikację, można by jeszcze oznaczyć ziarno podziałowe, ale to jest niecelowe, gdyż istota problemu leży w odwadnianiu, a nie w mokrej klasyfikacji, do której konieczna byłaby dodatkowo woda natryskowa. Nadto, użyteczność wyznaczonej krzywej rozdziału granulometrycznego jest wątpliwa, z uwagi na jej charakterystyczne odkształcenie [10, 116, 60] - w stosunku do przebiegu normalnego [47] - wyrażające się występowaniem ekstremum w zakresie najdrobniejszych ziarn i ze względu na początek krzywej na osi rzędnych. Również najnowsze matematyczne ujęcie rozdziału w postaci "momentu błędu rozdziału" podane przez Mayera [60] nie może być z pozytywnym skutkiem wykorzystane. Określenie składu ziarnowego produktów odwadniania jest również niecelowe z powodu niemożliwości pełnego wykorzystania wyników, gdyż skład granulometryczny części stałych jest jednym z czynników niezależnych - badany jako wielkość wejściowa procesu. Z wymienionych powodów, jako wielkości wyjściowe podawano tylko zawartość części stałych c oraz ich uzysk u, bez wnikania w teorię przechodzenia ziarn przez otwory sita [79, 15].

3. Metodyka badań i opisywania wyników doświadczeń

W nowoczesnych metodach planowania doświadczeń istnieje możliwość optymalnego kierowania próbami nawet przy niepełnej wiedzy o procesie. W licznych przypadkach badań rozpoczyna się rozpoznawanie od wykonywania doświadczeń eliminujących, których celem jest wyodrębnienie spośród dużej liczby efektów potencjalnie możliwych - efektów dominujących. W przypadku badania procesu odwadniania na przesiewaczach, można wykorzystać pewne zależności technologiczne znane w przybliżeniu z praktyki; na tej podstawie z wymienionych w rozdziale 1.3 czynników wpływających na przebieg i rezultaty odwadniania można wybrać te, które wydają się najważniejsze i możliwe do przebadania.

Do przeprowadzenia doświadczeń eliminujących, mających na celu wykazanie hierarchii wpływu poszczególnych czynników można stosować metodę bilansu losowego, która ma dużą zdolność rozdzielczą, ale znacznie mniejszą czułość polegającą na popełnianiu znacznych błędów w ocenie współczynników regresji lub metodę powtarzań ułamkowych charakteryzującą się wysoką czułością pozwalającą wyodrębnić nawet słabe efekty z pola szumów [65].

Wykorzystując pewne informacje technologiczne o procesie odwadniania wybrano do doświadczeń wstępnych 7 czynników, stosując skróconą macierz planowania typu 2^{7-4} powtórzoną dla odwróconych znaków, celem wyeliminowania współdziałań wyższych rzędów [65]. W przypadkach, kiedy konieczne jest gruntowne przebadanie wpływu najważniejszych czynników na proces i określenie współdziałań zachodzących pomiędzy nimi przy odpowiednio założonych poziomach podstawowych i przedziałach zmian, stosuje się szczegółową analizę wariancyjną [71]. Otrzymane wyniki i wyciągnięte wnioski wykorzystuje się do zaplanowania tzw. skoku, czyli kroku roboczego, aby po największym spadku zbliżyć się do obszaru prawie stacjonarnego; można też bezpośrednio zaplanować od-

powiednie serie doświadczeń, których rezultaty aproksymuje się określoną funkcją [40, 18], wykorzystując do tego celu maszynę cyfrową typu Odra 1204[x]).

Aproksymację wyników pomiarów przeprowadzono następującymi funkcjami: dla jednego czynnika

$$y = b_o \cdot e^{b_1 x + b_2 x^2} \tag{3-1}$$

$$y = e^{b_o} \cdot x^{b_1} \tag{3-2}$$

dla dwóch czynników

$$y = b_o + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_1^2 + b_4 x_2^2 + b_5 x_1 x_2 \tag{3-3}$$

$$y = e^{b_o + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_1^2 + b_4 x_2^2} \tag{3-4}$$

$$y = e^{b_o} \cdot x_1^{b_1} \cdot x_2^{b_2} \tag{3-5}$$

$$y = b_1 + b_2 x_3 + (b_3 - b_2 x_3)\, e^{b_4 x_2 + b_5} \tag{3-6}$$

$$y = b_1 + (b_2 + b_3 x_3)\, e^{b_4 x_2 + b_5} \tag{3-7}$$

---

x) Programy dla maszyny cyfrowej opracował oraz odpowiednie obliczenia wykonał mgr inż. Jan Bruski z Ośrodka Elektronicznych Metod Obliczeniowych Politechniki Śląskiej.

dla trzech czynników

$$y = b_o + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_1^2 + b_5x_2^2 + b_6x_3^2 + b_7x_1x_2 +$$

$$+ b_8x_1x_3 + b_9x_2x_3 + b_{10}x_1x_2x_3 \qquad (3\text{-}8)$$

$$y = e^{b_o + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_1^2 + b_5x_2^2 + b_6x_3^2} \qquad (3\text{-}9)$$

$$y = e^{b_o} \cdot x_1^{b_1} \cdot x_2^{b_2} \cdot x_3^{b_3}. \qquad (3\text{-}10)$$

Obliczenia prowadzono w ten sposób, że eliminowano kolejno współczynniki regresji b_i wg ich malejących istotności określanych testem Studenta; odpowiednie wyniki zamieszczono w tablicach, w których podano również wartości wariancji resztkowych S_r^2 oraz testu Fiszera F służącego do określenia istotności przybliżenia przy odpowiedniej liczbie stopni swobody w liczniku f_1 oraz w mianowniku f_m w stosunku do wartości tablicowych $F_{0,05}$ i $F_{0,01}$, tzn. na 95 i 99 procentowym poziomie ufności wg Snedecora. Dla pełniejszej informacji podano również odchylenia standardowe S i przedział ufności współczynników regresji L.

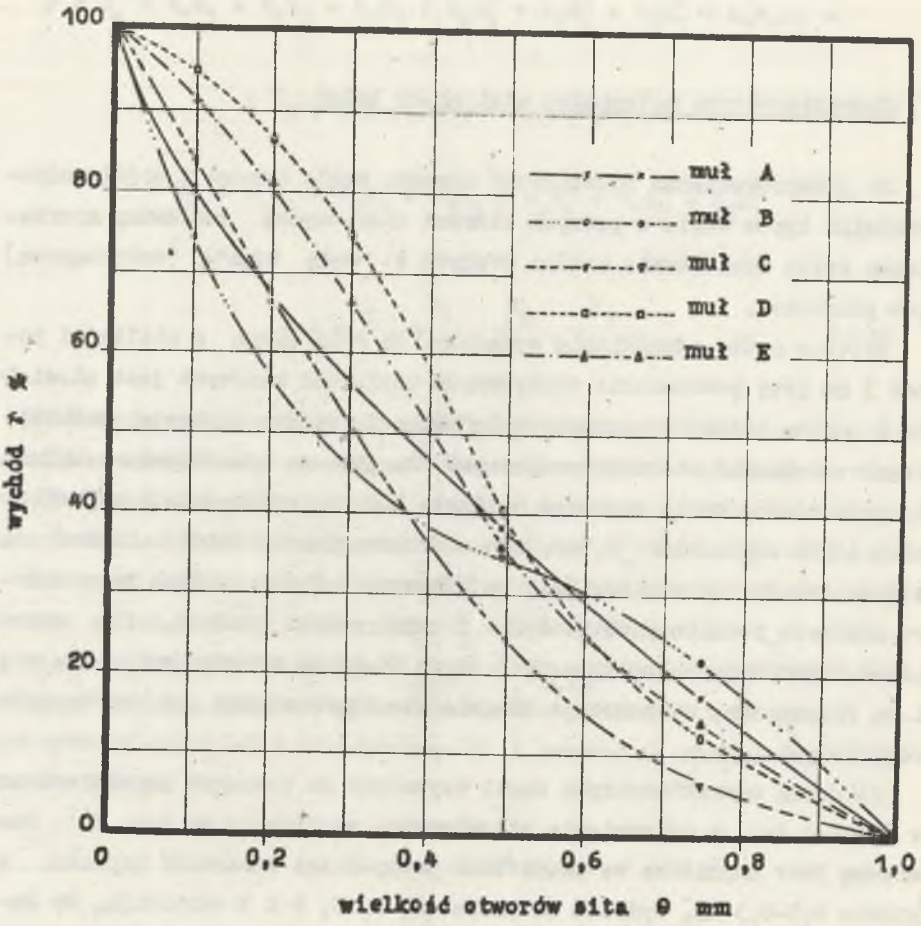
4. Charakterystyka materiałów użytych do badań

Do przeprowadzenia doświadczeń używano węgle surowe i modele odpowiednich typów węgla w pewnych klasach ziarnowych; zawiesiny sporządzono przez wymieszanie części stałych z wodą czystą (wodociągową) lub płuczkową.

Wstępne próby odwadniania wykazały, że rola ziarn o wielkości ponad 3 mm przy powszechnie spotykanych udziałach masowych jest niewielka z punktu widzenia zatrzymywania wilgoci. Celem opisania ważniejszych zależności charakterystycznych dla procesu odwadniania przyjęto do prób ziarna węgla surowego w klasie 1-0 mm, a dla modeli odpowiednich typów węgla klasę 0,5-0,3 mm. Oparcie głównej partii badań na klasie 1-0 mm uzasadnione jest największym wpływem właśnie tego zbioru ziarn na rezultaty odwadniania i uzysk części stałych. Dla szerszych składów granulometrycznych ziarn niektóre efekty zacierają się i są nieznaczne, co zostanie odpowiednio skomentowane w następnych rozdziałach.

Skróconą charakterystykę węgli używanych do pomiarów przedstawiono w tablicy 4-1, a uziarnienia zilustrowano graficznie na rys. 4-1. Znamienną jest najniższa we wszystkich przypadkach zawartość popiołu w klasie 0,5-0,3 mm. Symbole literowe A, B, C, D i E oznaczają, że dane węgle zostały pobrane w kopalniach eksploatujących i produkujących węgle odpowiednio typu 31.2, 32, 33, 34 i 35; tak więc dla modeli węgla symbole oznaczają bezpośrednio typ węgla, a dla węgli surowych stanowiących mieszaninę substancji palnej i w znacznej części niepalnej określają tylko formalnie przynależność do danego typu węgla.

Ważniejsze własności wód płuczkowych pozbawionych części stałych w stosunku do własności wody wodociągowej scharakteryzowano w tablicy 4-2. Z porównania wartości liczbowych dot. wód płuczkowych wynika,



Rys. 4-1. Skład ziarnowy mułów na których przeprowadzono badania

że różnice są w niektórych przypadkach wyraźne, choć nie pozwalają na określenie wpływu własności wody na odwadnianie.

Na podstawie przedstawionych charakterystyk węgli można a priori przewidywać kierunek wpływu niektórych czynników na proces odwadniania drobnoziarnistego węgla, lecz nie jest możliwe podanie korelacji ilościowych, na co pozwalają dopiero wyniki doświadczeń.

Tablica 4-1

Charakterystyka węgla surowego użytego do prób, wyrażona składem ziarnowym, zawartością popiołu w poszczególnych klasach oraz ich gęstością usypową

Klasa ziarnowa mm	Wychód klasy ziarnowej γ %				
	zawartość popiołu λ %				
	gęstość usypowa δ_u g/cm^3				
	rodzaj węgla				
	A	B	C	D	E
1,02-0,75	17,1 11,7 0,800	21,4 16,6 0,846	6,0 12,4 0,738	11,8 28,5 0,840	13,6 9,7 0,790
0,75-0,49	21,0 13,6 0,775	12,8 18,1 0,784	17,9 12,3 0,752	28,4 30,9 0,828	21,8 10,0 0,805
0,49-0,30	17,2 14,8 0,785	11,4 22,3 0,831	27,2 13,5 0,760	34,2 30,1 0,805	30,3 11,4 0,801
0,30-0,20	10,7 15,4 0,781	10,8 21,4 0,801	14,9 15,2 0,776	11,6 30,2 0,795	13,8 12,1 0,784
0,20-0,102	13,5 17,0 0,764	16,7 20,8 0,783	17,1 17,5 0,785	8,2 29,4 0,819	11,5 12,9 0,738
0,102-0,00	20,5 19,2 0,731	26,9 21,0 0,745	16,9 19,5 0,725	5,8 33,8 0,669	9,0 13,8 0,732
kąt zwilż. w.surowego 1-0 mm	73°	66°	76°	79°	86°
kąt zwilż. w.model. 0,5-0,3	87°	92°	101°	102°	106°

Tablica 4-2

Ważniejsze własności wód używanych do prób

Woda płuczk. z kopalni	Gęstość kg/dm^3	Lepkość Ns/m^2	Nap.pow. N/m	pH	Przewodnictwo $1/\Omega \cdot cm$
Rozbark	0,998	0,01005	0,072202	7,6	0,00252
Dymitrow	0,999		0,072265	7,7	0,00420
Wawel	1,001		0,072391	7,4	0,00672
Zabrze	1,001		0,072491	6,8	0,00896
Gliwice	1,017		0,073650	7,3	0,03530
Woda wodociągowa	0,998	0,01005	0,072111	7,0	0,00071

5. Ocena stopnia istotności parametrów procesu odwadniania

Zgodnie z ustaleniami zawartymi w rozdziale 3 wytypowano na podstawie rozdziału 1.3 siedem czynników, celem eksperymentalnego określenia ich stopnia istotności dla procesu odwadniania; jako czynniki wejściowe do doświadczeń eliminujących przyjęto:

- skok wahań sita s_o
- częstość wahań sita n
- początkową zawartość części stałych w zawiesinie kierowanej do odwadniania c_o
- grubość warstwy materiału na sicie h wynikającą z masowego obciążenia jednostkowej powierzchni sita
- skład ziarnowy części stałych zawiesiny z kierowanej do odwadniania wyrażony procentowym udziałem klasy 1,0-0,3 mm w klasie 1,0-0,1 mm
- rodzaj wody użytej do sporządzania zawiesiny w (wodociągowa lub płuczkowa)
- czas odwadniania t.

Poziomy i przedziały zmian poszczególnych czynników przyjęto na podstawie praktycznej znajomości procesu. Wyniki przeprowadzonych doświadczeń dla trzech różnych węgli zestawiono w tablicach 5-1, 2 i 3. Ilustrują one dwie macierze planowania, z których druga powstała przez odwrócenie znaków pierwszej oraz współczynniki regresji b_i obliczone dla obydwu macierzy I i II oddzielnie ze względu na zagęszczenia produktów odwodnionych c oraz uzyski części stałych u; tak więc poszczególne symbole oznaczają:

b_{ic} - współczynniki regresji obliczone ze względu na zagęszczenie produktów odwodnionych

Tablica 5-1

Macierz planowania i wyniki doświadczeń określające wielkość wpływu wybranych czynników na zagęszczenie końcowe i uzysk części stałych surowego mułu węglowego A

Czynniki	s_o mm	n 1/s	c_o %	h mm	t s	w	z %	c %	u %
P podst.	8,5	19,87	40	35	9	-	45		
P zmian.	1,5	3,80	10	5	3	-	15		
P wyższy	10,0	23,67	50	40	12	płucz.	60		
P niższy	7,0	16,07	30	30	6	świeża	30		
Pomiar 1	-	-	-	-	-	-	-	35,9	85,4
	+	+	+	+	+	+	+	67,2	82,8
Pomiar 2	+	+	-	-	+	+	-	57,2	68,6
	-	-	+	+	-	-	+	53,7	93,8
Pomiar 3	+	-	+	-	+	-	+	69,8	83,7
	-	+	-	+	-	+	-	34,1	85,1
Pomiar 4	-	+	+	-	-	+	+	71,2	84,5
	+	-	-	+	+	-	-	36,3	80,2
Pomiar 5	+	-	-	+	-	+	+	34,8	86,3
	-	+	+	-	+	-	-	68,1	78,5
Pomiar 6	-	+	-	+	+	-	+	49,1	85,6
	+	-	+	-	-	+	-	60,3	83,2
Pomiar 7	-	-	+	+	+	+	-	57,4	92,1
	+	+	-	-	-	-	+	52,4	76,1
Pomiar 8	+	+	+	+	-	-	-	66,4	83,2
	-	-	-	-	+	+	+	39,8	83,0
b_{ic} I	+1,83	+5,75	+10,98	-3,30	+3,16	-0,07	+1,00		
b_{iu} I	-3,22	-3,20	+2,20	+3,12	-1,18	-0,80	+1,35		
b_{ic} II	+2,56	+3,97	+10,84	-3,66	+1,36	-1,14	+1,79		
b_{iu} II	-2,26	-2,21	+1,74	+2,64	-1,71	+0,69	+1,09		
b_{ic} śr.	+2,19	+4,86	+10,91	-3,48	+2,26	-0,61	+1,39		
b_{iu} śr.	-2,74	-2,71	+1,97	+2,88	-1,45	-0,06	+1,22		

Tablica 5-2

Macierz planowania i wyniki doświadczeń określające wielkość wpływu wybranych czynników na zagęszczenie końcowe i uzysk części stałych surowego mułu węglowego C

Czynniki	s_o mm	n 1/s	c_o %	h mm	t s	w	z %	c %	u %
P podst.	8,5	19,87	40	35	9	-	45		
P zmian.	1,5	3,80	10	5	3	-	15		
P wyższy	10,0	23,67	50	40	12	płuczk.	60		
P niższy	7,0	16,07	30	30	6	świeża	30		
Pomiar 1	-	-	-	-	-	-	-	35,6	86,0
	+	+	+	+	+	+	+	66,9	83,1
Pomiar 2	+	+	-	-	+	+	-	56,9	70,4
	-	-	+	+	-	-	+	53,5	94,1
Pomiar 3	+	-	+	-	+	-	+	70,0	84,2
	-	+	-	+	-	+	-	33,9	85,7
Pomiar 4	-	+	+	-	-	+	+	71,7	85,6
	+	-	-	+	+	-	-	35,9	79,9
Pomiar 5	+	-	-	+	-	+	+	35,1	87,3
	-	+	+	-	+	-	-	67,9	79,6
Pomiar 6	-	+	-	+	+	-	+	48,8	86,2
	+	-	+	-	-	+	-	60,8	84,0
Pomiar 7	-	-	+	+	+	+	-	56,9	94,1
	+	+	-	-	-	-	+	52,0	77,2
Pomiar 8	+	+	+	+	-	-	-	66,5	84,0
	-	-	-	-	+	+	+	40,1	83,4
b_{ic} I	+1,94	+5,79	+11,09	-2,98	+2,96	-0,04	+1,21		
b_{iu} I	-3,25	-3,18	+2,25	+3,18	-1,00	-0,38	+1,10		
b_{ic} II	+2,52	+3,80	+10,90	-3,83	+1,33	-0,95	+1,75		
b_{iu} II	-2,32	-1,98	+1,83	+2,32	-1,88	+0,67	+1,36		
b_{ic} śr.	+2,23	+4,79	+10,99	-3,41	+2,15	-0,49	+1,48		
b_{iu} śr.	-2,79	-2,58	+2,04	+2,75	-1,44	+0,15	+1,23		

Tablica 5-3

Macierz planowania i wyniki doświadczeń określające wielkość wpływu wybranych czynników na zagęszczenie końcowe i uzysk części stałych surowego mułu węglowego E

Czynniki	s_o mm	n 1/s	c_o %	h mm	t s	w	z %	c %	u %
P podst.	8,5	19,87	40	35	9	-	45		
P zmian.	1,5	3,80	10	5	3	-	15		
P wyższy	10,0	23,67	50	40	12	płuczk.	60		
P niższy	7,0	16,07	30	30	6	świeża	30		
Pomiar 1	-	-	-	-	-	-	-	37,1	85,8
	+	+	+	+	+	+	+	68,8	83,6
Pomiar 2	+	+	-	-	+	+	-	58,2	71,3
	-	-	+	+	-	-	+	54,1	93,9
Pomiar 3	+	-	+	-	+	-	+	70,8	83,9
	-	+	-	+	-	+	-	35,0	86,1
Pomiar 4	-	+	+	-	-	+	+	72,0	86,1
	+	-	-	+	+	-	-	36,9	81,0
Pomiar 5	+	-	-	+	-	+	+	35,6	88,0
	-	+	+	-	+	-	-	69,3	80,2
Pomiar 6	-	+	-	+	+	-	-	50,1	85,9
	+	-	+	-	-	+	+	61,2	84,3
Pomiar 7	-	-	+	+	+	+	-	58,0	95,8
	+	+	-	-	-	-	+	53,1	78,0
Pomiar 8	+	+	+	+	-	-	-	67,3	84,2
	-	-	-	-	+	+	+	40,4	84,2
b_{ic} I	+1,84	+5,78	+10,89	-3,38	+3,14	-0,19	+0,99		
b_{iu} I	-3,28	-3,25	+2,38	+3,35	-0,90	+0,17	+0,85		
b_{ic} II	+3,90	+4,20	+11,00	-3,75	+1,50	-1,00	+1,76		
b_{iu} II	-2,19	-1,94	+1,59	+2,24	-1,66	+0,64	+1,01		
b_{ic} śr.	+2,87	+4,99	+10,95	-3,56	+2,32	-0,59	+1,38		
b_{iu} śr.	-2,74	-2,59	+1,99	+2,80	-1,28	+0,41	+0,93		

b_{iu} - współczynniki regresji obliczone ze względu na uzysk części stałych w produktach odwodnionych

I - pierwsza macierz planowania, której odpowiadają górne wiersze poszczególnych pomiarów od 1 do 8

II - druga macierz planowania, której odpowiadają dolne wiersze poszczególnych pomiarów od 1 do 8

śr - średnia wartość współczynnika regresji obliczona na podstawie wartości otrzymanych z macierzy I i II.

Na podstawie wyników pomiarów i rezultatów obliczeń można zgodnie dla wszystkich trzech badanych rodzajów węgla stwierdzić, że na bazie przyjętych poziomów podstawowych $P_{podst.}$ i przedziałów zmian P_{zmian} zachodzą następujące prawidłowości:

- największe znaczenie dla procesu odwadniania ma zagęszczenie początkowe zawiesiny c_o o czym informuje najwyższa bezwzględna wartość współczynnika regresji b_{ic}, zaś dodatni znak wskazuje na konieczność zwiększenia wartości c_o celem otrzymania lepszych wyników odwadniania;
- najmniej istotny dla procesu odwadniania jest rodzaj użytej wody, co wynika z bardzo niskiej wartości bezwzględnej współczynnika regresji;
- kolejność wielkości wpływu poszczególnych czynników na proces odwadniania zawiesiny łatwo określić na podstawie wartości ich współczynników regresji, które jednocześnie informują, w którym kierunku i orientacyjnie w jakim stopniu należy ustalić warunki nowego doświadczenia, aby zbliżyć się do obszaru prawie optymalnego
- wpływ poszczególnych czynników na uzysk części stałych jest znacznie mniej zróżnicowany niż na odwodnienie, co wynika z bezwzględnych wartości współczynników regresji; ich znaki wskazują na kierunek zmian wartości konieczny dla otrzymania wyższych uzysków;
- rodzaj użytej wody okazał się także najmniej istotny dla procesu odzyskiwania części stałych.

Z analizy rezultatów pomiarów i wartości współczynników regresji wynika, że w dalszych badaniach można pominąć doświadczenia nad wpły-

wem własności wody na proces odwadniania i odzyskiwania części stałych, gdyż w stosunku do s_o, n, c_o, h, t, z, rola tego czynnika jest najmniejsza i nieznaczna.

Dalsze doświadczenia zaplanowano w ten sposób, że oddzielnie przebadano wpływ głównych parametrów przesiewacza na przebieg odwadniania i odzyskiwania części stałych oraz niezależnie określono wpływ najważniejszych parametrów technologicznych na proces, wykorzystując informacje uzyskane z analizy wartości wyjściowych c oraz u, a także b_{ic} oraz b_{iu} do ustalenia właściwych poziomów w kolejnych seriach pomiarów.

6. Odwadnianie zawiesin jako funkcja skoku i częstości wahań sita

Najbardziej charakterystycznymi wielkościami dla urządzenia, na którym przeprowadzano próby są skok i częstość wahań sita. Uwzględniając stosunkowo duże wartości współczynników regresji dla b_{ic} ze względu na częstość, zaplanowano doświadczenia o stosunkowo szerokim zakresie zmian, przy skoku sita zapewniającym bardzo wysokie wskaźniki podrzutu, przedstawione w tabl. 6-1 zgodnie ze wzorem 1.3-2.

Tablica 6-1

Zależność pomiędzy skokiem i częstością wahań a wskaźnikiem podrzutu K_v

Skok s_o (mm)	Wskaźnik podrzutu K_v				
	Częstość wahań n (s^{-1})				
	16,07	18,50	21,17	23,67	27,33
7	3,63	4,81	6,30	7,88	10,05
8	4,16	5,51	7,21	9,02	12,03
9	4,67	6,19	8,10	10,13	13,50
10	5,20	6,89	9,02	11,27	15,04

Poszczególne serie prób przeprowadzono na zawiesinach sporządzonych przy użyciu wody wodociągowej i różnych węgli surowych o uziarnieniu 1-0 mm; na stałym poziomie utrzymano grubość warstwy materiału na sicie, zagęszczenie początkowe i czas odwadniania. Rezultaty doświadczeń zestawiono w tablicach i zilustrowano graficznie w postaci zależności zagęszczenia i uzysku części stałych od skoku i częstości wahań; przedstawiono również próby ujęcia wyników jako funkcji wskaź-

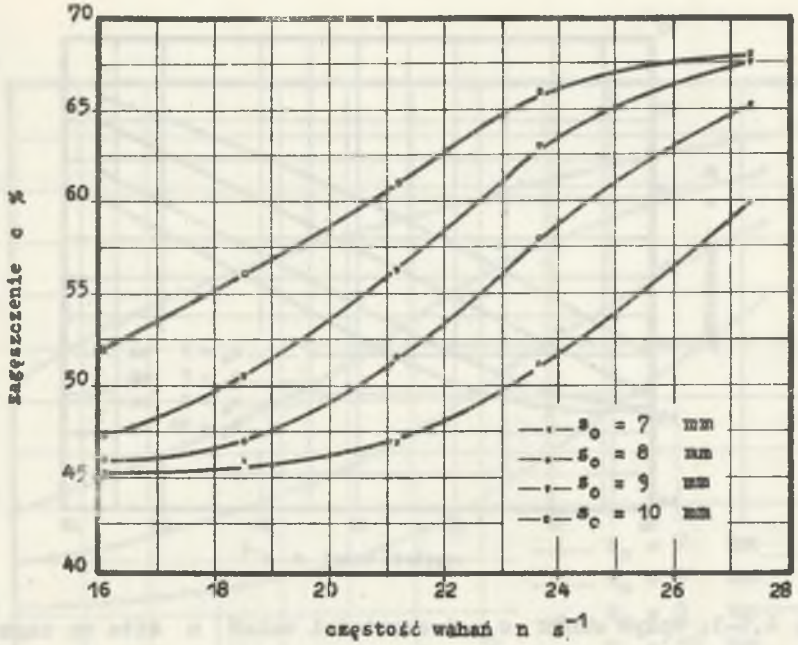
nika podrzutu, celem zastąpienia czynników s_o oraz n jedną wielkością K_v. Takie ujęcie jest z użytkowego punktu widzenia wygodne, gdyż nie narzuca dwóch, lecz jeden czynnik, który należy ustalić, aby uzyskać odpowiednie efekty odwodnienia.

Celem matematycznego opisania stwierdzonych zależności, przeprowadzono odpowiednie obliczenia których rezultaty opisano przy pomocy funkcji.

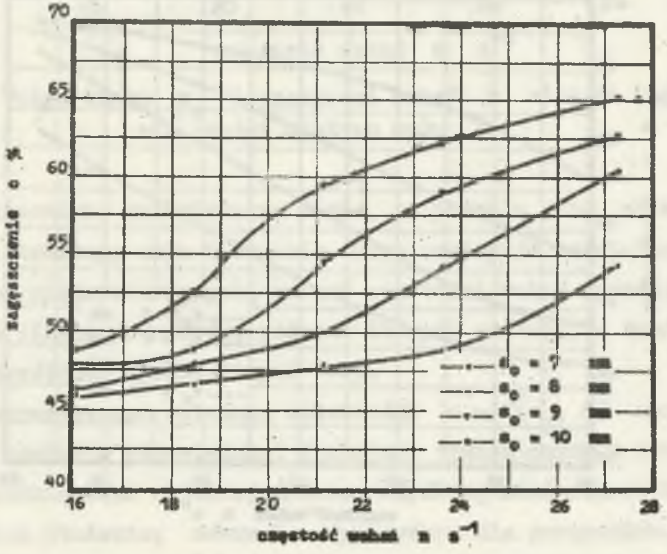
6.1. Zmiana zagęszczenia zawiesiny jako $f(s_o, n)$ oraz $f(K_v)$

Badaniami objęto pięć węgli surowych pochodzących z różnych kopalń określonych w rozdz. 4 symbolami A, B, C, D i E. Graficzny obraz zmiany zagęszczeń występujących przy różnych amplitudach i częstościach wahań sita, przedstawiono na rys. 6.1-1 do 5. Charakterystyczny dla wszystkich badanych zawiesin jest wzrost zagęszczenia odwadnianej zawiesiny, towarzyszący rosnącym wartościom n i s_o z tym jednak, że dla małych amplitud i niskich częstości występuje bardzo mały przyrost zagęszczenia w stosunku do nadawy, której c_o = 40%; znamienne jest również oscylowanie maksymalnych zagęszczeń w granicach 65 do 70%, które osiągnięto dla najwyższych wartości n i s_o. Z wzajemnego układu krzywych widać, że pomimo utrzymania na stałym poziomie wartości zagęszczenia początkowego zawiesiny, niezmiennego obciążenia jednostkowego powierzchni sita, użycia tego samego rodzaju wody i stosowania identycznego czasu odwadniania dla tych samych wartości n i s_o otrzymano różne wartości zagęszczeń. Śledząc wartości, ich przyrost i kierunki zmian zagęszczeń, można je zasadniczo odnieść do różnic w składach ziarnowych poszczególnych części stałych przedstawionych na rys. 4-1, chociaż na pewno nie jest to jedyna przyczyna zróżnicowania wyników. Nie ulega wątpliwości, że rodzaj składników tworzących zbiór ziarn, również odgrywa określoną rolę w procesie zgęszczania, jednak analiza wpływu poszczególnych składników nie jest wobec nakreślonego celu pracy uzasadniona ani też potrzebna.

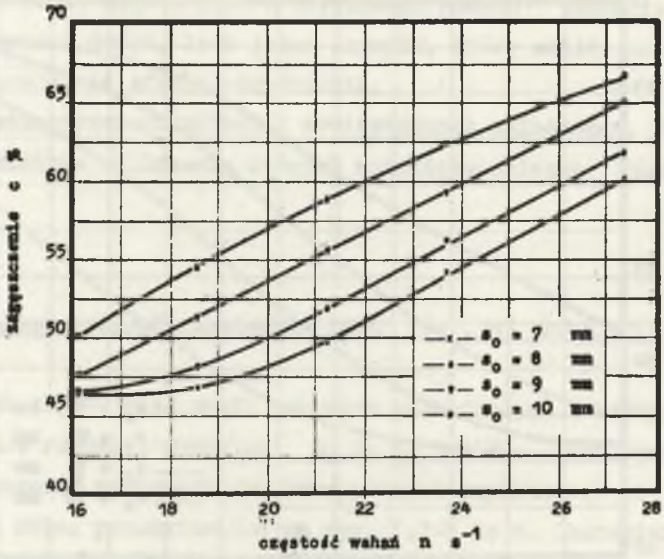
Na podstawie poczynionych obserwacji procesu zgęszczania zawiesin na sicie można wysunąć twierdzenie, że wzrost amplitudy powoduje sil-



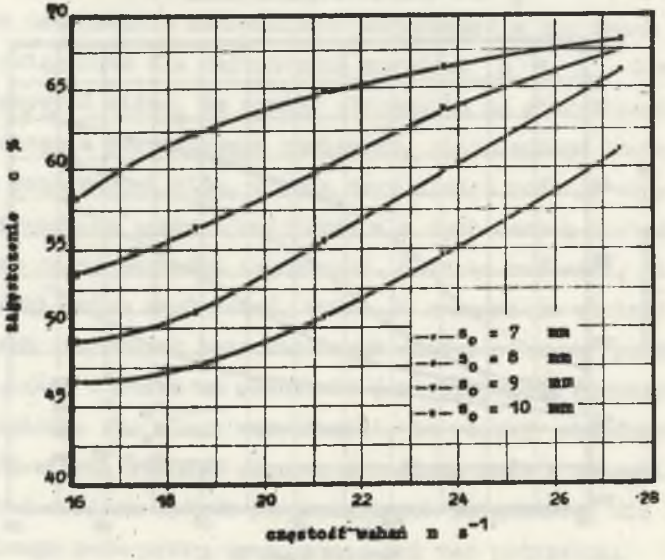
Rys. 6.1-1. Wpływ skoku s_o i częstości wahań n sita na zagęszczenie części stałych mułu A



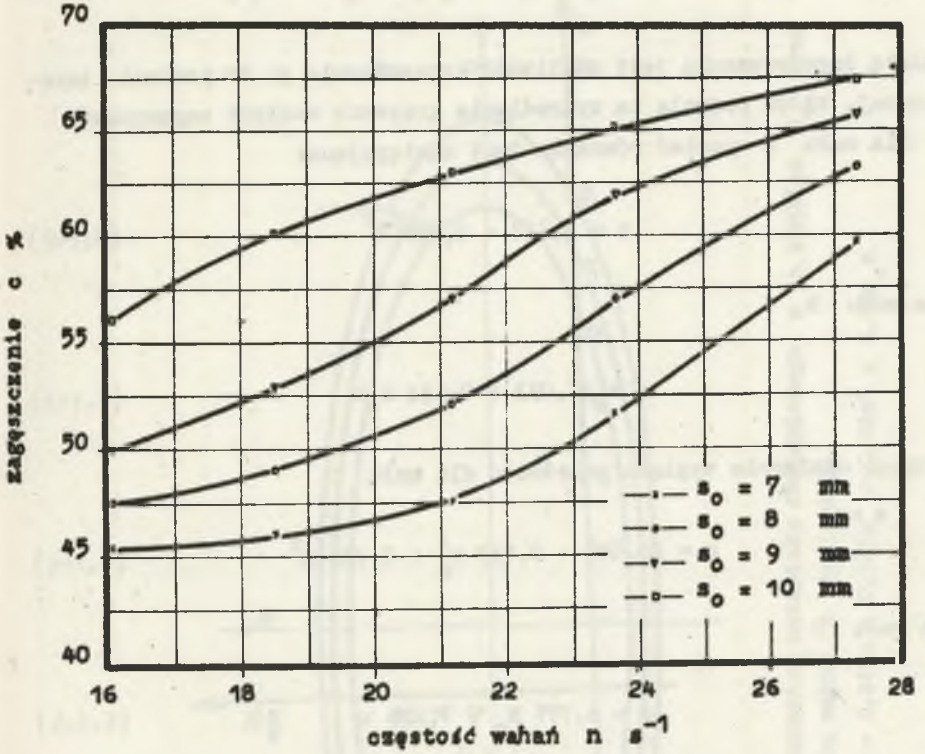
Rys. 6.1-2. Wpływ skoku s_o i częstości wahań n sita na zagęszczenie części stałych mułu B



Rys. 6.1-3. Wpływ skoku s_o i częstości wahań n sita na zagęszczenie części stałych mułu C



Rys. 6.1-4. Wpływ skoku s_o i częstości wahań n sita na zagęszczenie części stałych mułu D



Rys. 6.1-5. Wpływ skoku s_o i częstości wahań n sita na zagęszczenie części stałych mułu E

niejsze rozluzowanie materiału na sicie, co pozwala na zniszczenie półsztywnej struktury mułu w trakcie czego następuje uwolnienie wody z przestrzeni międzyziarnowych; wzrost częstości wahań powoduje zwielokrotnienie liczby podrzutów, podczas których następuje każdorazowo oderwanie określonej ilości kropel wody.

Celem matematycznego opisania zależności $c = f(s_o, n)$ aproksymowano wyniki pomiarów odpowiednimi funkcjami wymienionymi w rozdz. 3.

Kolejno eliminowano najmniej istotne współczynniki regresji kierując się testem Studenta; równania wypisywano dla przypadków, dla których wszystkie współczynniki regresji są istotne.

Wyniki doświadczeń przybliżano funkcją:

$$c = b_o + b_1 s_o + b_2 n + b_3 s_o^2 + b_4 n^2 + b_5 s_o n . \qquad (6.1\text{-}1)$$

Zaletą tego równania jest możliwość sprowadzenia go do postaci kanonicznej, która pozwala na wykreślenie krzywych stałych zagęszczeń.

Dla mułu A postać równania jest następująca:

$$c = 4{,}312 + 0{,}039\ n^2 \qquad (6.1\text{-}2)$$

dla mułu B

$$c = 27{,}093 + 0{,}144\ s_o n \qquad (6.1\text{-}3)$$

również odmiennie wygląda zależność dla mułu C

$$c = 28{,}645 + 0{,}133\ s_o^2 + 0{,}034\ n^2 \qquad (6.1\text{-}4)$$

dla mułu D

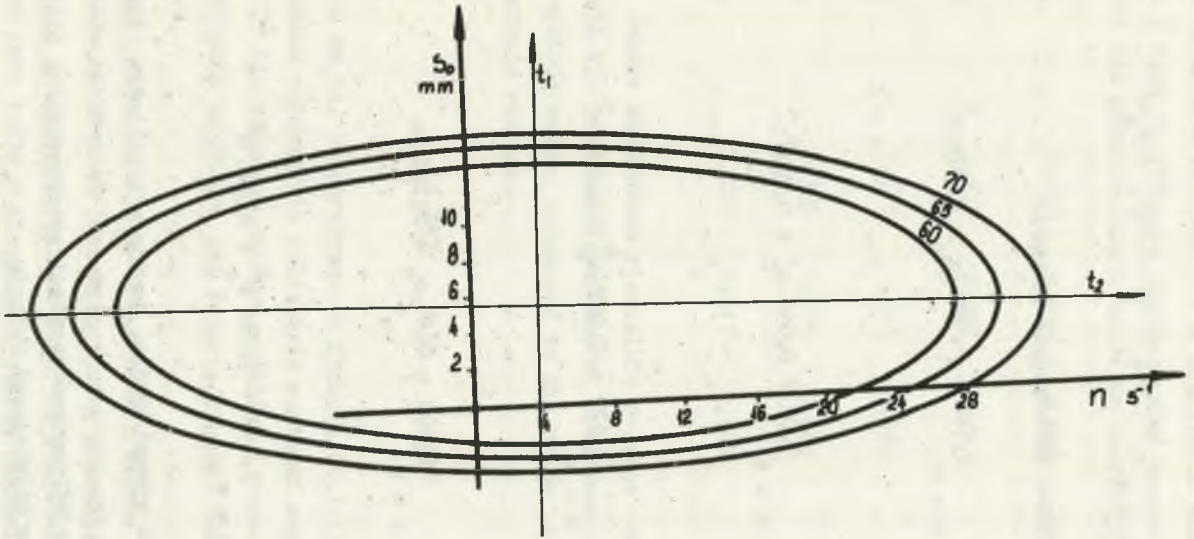
$$c = 3{,}777\ s_o + 1{,}225\ n \qquad (6.1\text{-}5)$$

oraz dla mułu E

$$c = 24{,}371 + 0{,}239\ s_o^2 + 0{,}029\ n^2 . \qquad (6.1\text{-}6)$$

Z przedstawionych równań wynika, że każdemu mułowi odpowiada inna funkcja; istnieje wprawdzie możliwość opisywania zmiany zagęszczenia wg wzoru 6.1-1 dla wszystkich badanych mułów, jednak postać ta nie jest z użytkowego punktu widzenia wygodna.

Charakterystyczne wielkości umożliwiające wykreślenie krzywych stałych zagęszczeń, pokazano przykładowo na rys. 6.1-6.



Rys. 6.1-6. Zależność pomiędzy zagęszczeniem materiału odwodnionego c a skokiem s_o oraz częstością wahań n wg funkcji

$$c = 50{,}051 - 4{,}042s_o - 0{,}419n + 0{,}345s_o^2 + 0{,}04n^2 + 0{,}02s_o n$$

Kolejną próbę przybliżania tej samej serii wyników doświadczeń przeprowadzono przy pomocy funkcji:

$$c = e^{b_o + b_1 s_o + b_2 n + b_3 s_o^2 + b_4 n^2} \qquad (6.1\text{-}7)$$

dla mułu A otrzymano następujące równanie

$$c = e^{3,142 + 0,064\, s_o + 0,001\, n^2} \qquad (6.1\text{-}8)$$

dla mułu B

$$c = e^{3,02 + 0,054\, s_o + 0,023\, n} \qquad (6.1\text{-}9)$$

dla mułu C

$$c = e^{3,522 + 0,002\, s_o^2 + 0,001\, n^2} \qquad (6.1\text{-}10)$$

dla mułu D

$$c = e^{2,992 + 0,07\, s_o + 0,022\, n} \qquad (6.1\text{-}11)$$

dla mułu E

$$c = e^{3,449 + 0,004\, s_o^2 + 0,001\, n^2}. \qquad (6.1\text{-}12)$$

Z przedstawionych równań wynika, że dla pięciu mułów występują aż trzy różne funkcje.

Ze względu na niejednorodność postaci przeprowadzono kolejną próbę przybliżenia wyników doświadczeń funkcją

$$c = e^{b_o} \cdot s_o^{b_1} \cdot n^{b_2}. \qquad (6.1\text{-}13)$$

Kierując się wariancją resztkową oraz testami Fischera i Studenta, stwierdzono możliwość stosowania dla wszystkich badanych mułów tej samej funkcji z tym, że różne są współczynniki regresji.

Zależności dla poszczególnych mułów są następujące:

dla mułu A $$c = e^{0,988} \cdot s_o^{0,539} \cdot n^{0,613} \qquad (6.1\text{-}14)$$

dla mułu B $$c = e^{1,533} \cdot s_o^{0,457} \cdot n^{0,48} \qquad (6.1\text{-}15)$$

dla mułu C $$c = e^{1,525} \cdot s_o^{0,346} \cdot n^{0,569} \qquad (6.1\text{-}16)$$

dla mułu D $$c = e^{1,385} \cdot s_o^{0,591} \cdot n^{0,464} \qquad (6.1\text{-}17)$$

dla mułu E $$c = e^{1,231} \cdot s_o^{0,617} \cdot n^{0,483}. \qquad (6.1\text{-}18)$$

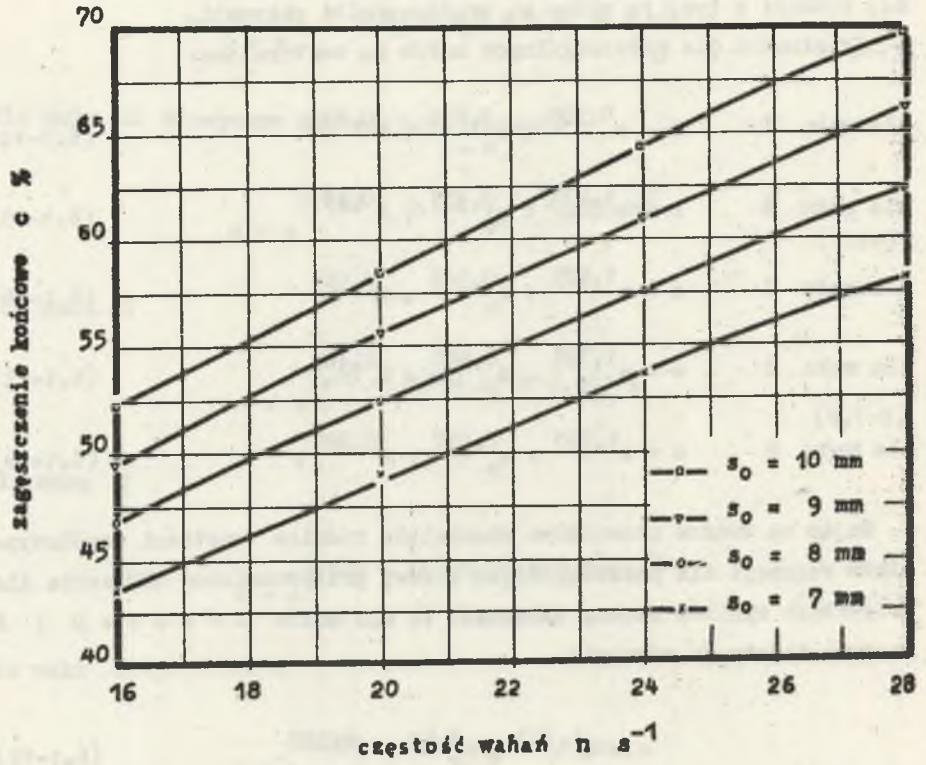
Mając na uwadze stosunkowo niewielkie różnice wartości współczynników regresji dla poszczególnych mułów, przeprowadzono obliczenia dla wszystkich wyników razem; zależność tę dla mułów A + B + C + D + E łącznie ilustruje równanie

$$c = e^{1,333} \cdot s_o^{0,51} \cdot n^{0,522}. \qquad (6.1\text{-}19)$$

Ze względu na to, że aproksymacja funkcją (6.1-13) okazała się najlepszą, wykonano odpowiednie obliczenia wartości zagęszczeń wg zależności (6.1-19) dla badanego zakresu amplitud i częstości wahań, celem określenia stopnia trafności jej doboru; wyniki obliczeń naniesiono na rys. 6.1-7.

Z porównania rys. 6.1-7 z rys. 6.1-1 do 5 widać, że zasadnicza zależność została zachowana, lecz specyficzny charakter zmiany zagęszczeń nie został uchwycony; wynika stąd, że stosowanie cytowanego równania możliwe jest tylko w stosunkowo wąskim zakresie zmian pośrednich wartości s_o oraz n.

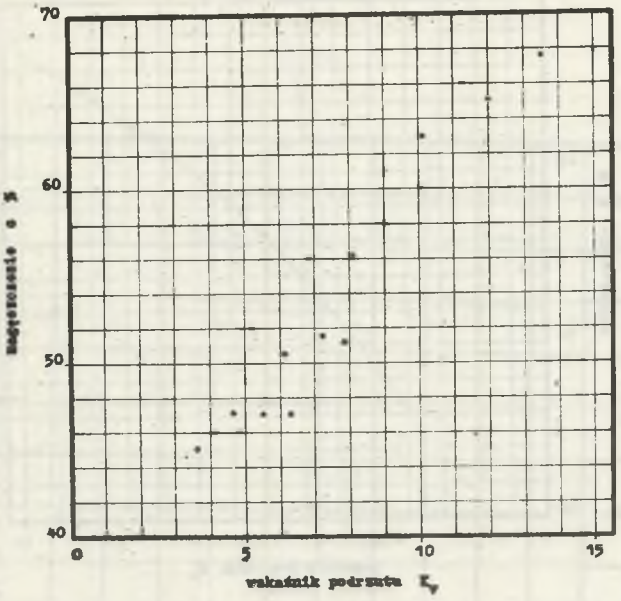
Celem zastąpienia amplitudy i częstości wahań jednym czynnikiem, którym w omawianym przypadku jest wskaźnik podrzutu K_v, naniesiono



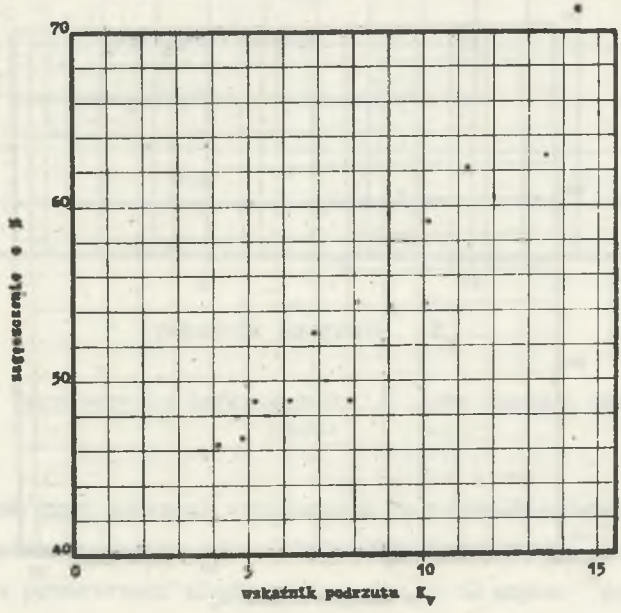
Rys. 6.1-7. Zależność pomiędzy zagęszczeniem materiału odwodnionego c, skokiem s_o oraz częstością wahań n wg funkcji $c = e^{1,33} \cdot s_o^{0,51} \cdot n^{0,522}$

odpowiednie wyniki z tabl. 6-1 oraz dane pomiarowe na rys. 6.1-8 do 12 stosownie do rodzaju mułu. Z układu punktów widać, że ze wzrostem wskaźnika podrzutu następuje znaczne zwiększenie zagęszczenia części stałych, które ustala się w granicach 65 do 70%; rozrzut rezultatów pomiarów jest wyraźny, a dla mułów D i E dość duży.

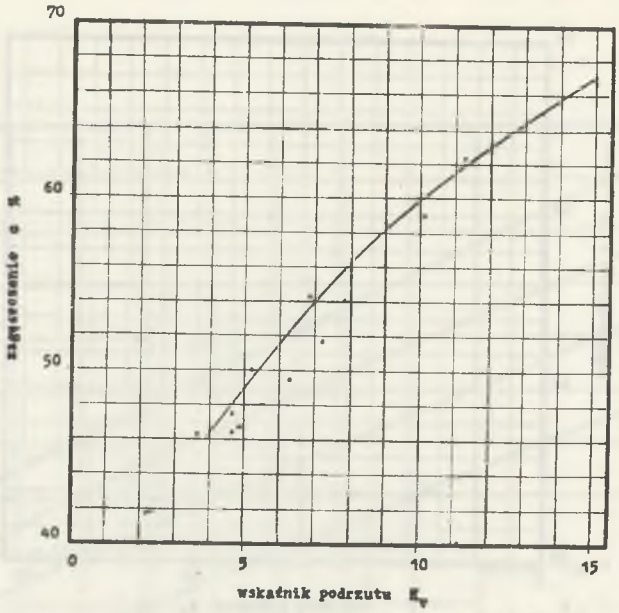
Interpretując zmianę zagęszczenia zawiesiny należy zwrócić uwagę na to, że podczas wahań sita oscylacja masy ziarn w sąsiedztwie sita nie pokrywa się z oscylacją ziarn usytuowanych najwyżej,co jest szcze-



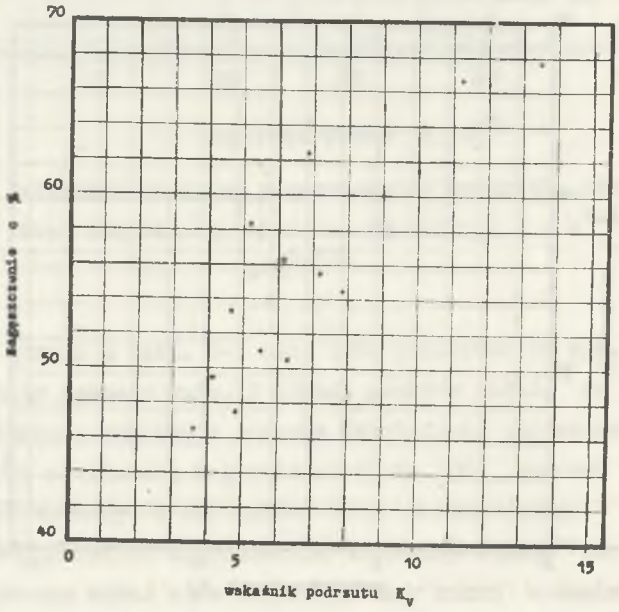
Rys. 6.1-8. Zagęszczenie końcowe mułu A jako funkcja wskaźnika podrzutu



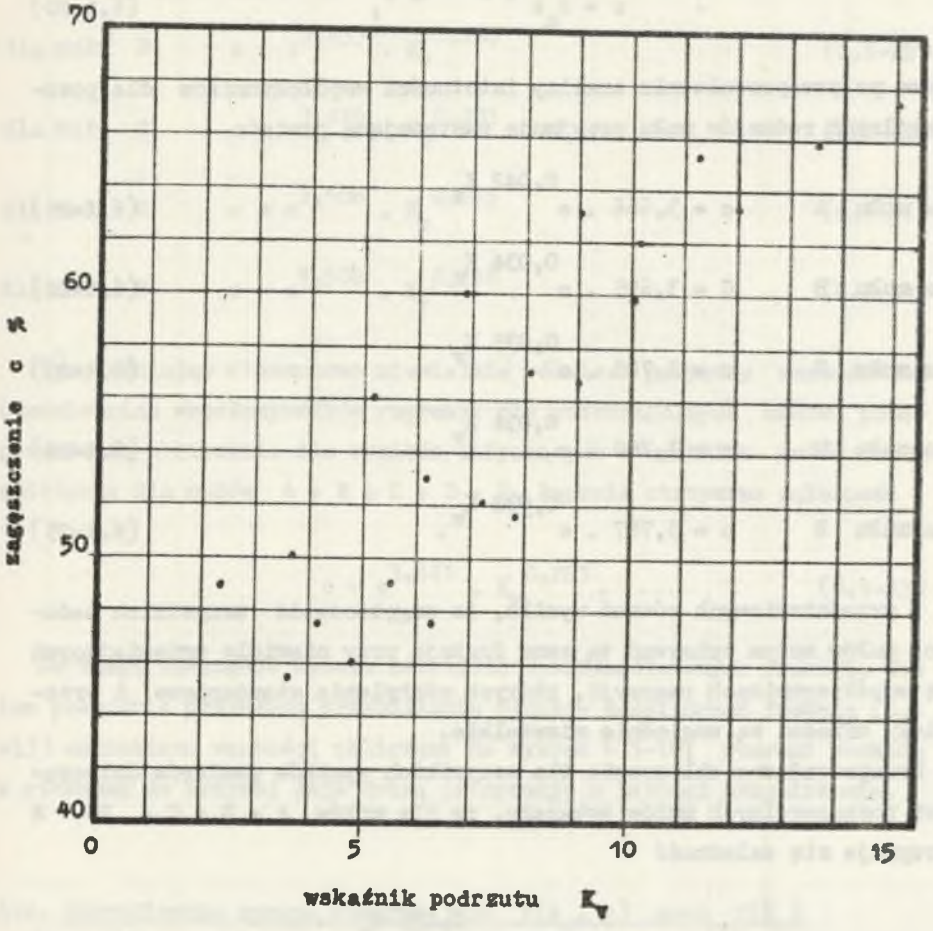
Rys. 6.1-9. Zagęszczenie końcowe mułu B jako funkcja wskaźnika podrzutu



Rys. 6.1-10. Zagęszczenie końcowe mułu C jako funkcja wskaźnika podrzutu



Rys. 6.1-11. Zagęszczenie końcowe mułu D jako funkcja wskaźnika podrzutu



Rys. 6.1-12. Zagęszczenie końcowe mułu E jako funkcja wskaźnika podrzutu

gólnie wyraźne przy wyższych wskaźnikach podrzutu.Nierównomierne przemieszczanie ziarn powoduje ich ruch względem siebie, co sprzyja uwalnianiu wody z przestrzeni międzyziarnowych, a to można przyjąć za przyczynę zmiany zagęszczenia występującej przy różnych wskaźnikach podrzutu.

Przedstawione na rys. 6.1-8 do 12 zbiory punktów przybliżano funkcją

$$c = b_o e^{b_1 K_v + b_2 K_v^2}, \qquad (6.1\text{-}20)$$

która po przeprowadzeniu analizy istotności współczynników dla poszczególnych rodzajów mułu przyjmuje następującą postać:

dla mułu A $\quad c = 3{,}666 \cdot e^{0{,}042\ K_v}$ (6.1-21)

dla mułu B $\quad C = 3{,}695 \cdot e^{0{,}034\ K_v}$ (6.1-22)

dla mułu C $\quad c = 3{,}708 \cdot e^{0{,}035\ K_v}$ (6.1-23)

dla mułu D $\quad c = 3{,}788 \cdot e^{0{,}034\ K_v}$ (6.1-24)

dla mułu E $\quad c = 3{,}767 \cdot e^{0{,}032\ K_v}$. (6.1-25)

Z przedstawionych równań wynika, że zagęszczenie wszystkich badanych mułów można opisywać tą samą funkcją przy niewiele zmieniających się współczynnikach regresji, których odchylenia standardowe i przedziały ufności są względnie niewielkie.

Przeprowadzone obliczenia dla wszystkich wyników pomiarów dotyczących poszczególnych mułów wykazały, że dla mułów A + B + C + D + E otrzymuje się zależność

$$c = 3{,}725 \cdot e^{0{,}035\ K_v}. \qquad (6.1\text{-}26)$$

Poza przybliżaniem wyników badań nad wpływem wskaźnika podrzutu na zagęszczenie odwodnionego mułu funkcją (6.1-20), przeprowadzono dodatkowe obliczenia związane z aproksymowaniem funkcją

$$c = e^{b_o} \cdot K_v^{b_1}. \qquad (6.1\text{-}27)$$

Zależności dla poszczególnych mułów są następujące:

dla mułu A $$c = e^{3,331} \cdot K_v^{0,335} \qquad (6.1\text{-}28)$$

dla mułu B $$c = e^{3,433} \cdot K_v^{0,267} \qquad (6.1\text{-}29)$$

dla mułu C $$c = e^{3,426} \cdot K_v^{0,281} \qquad (6.1\text{-}30)$$

dla mułu D $$c = e^{3,506} \cdot K_v^{0,275} \qquad (6.1\text{-}31)$$

dla mułu E $$c = e^{3,508} \cdot K_v^{0,258} . \qquad (6.1\text{-}32)$$

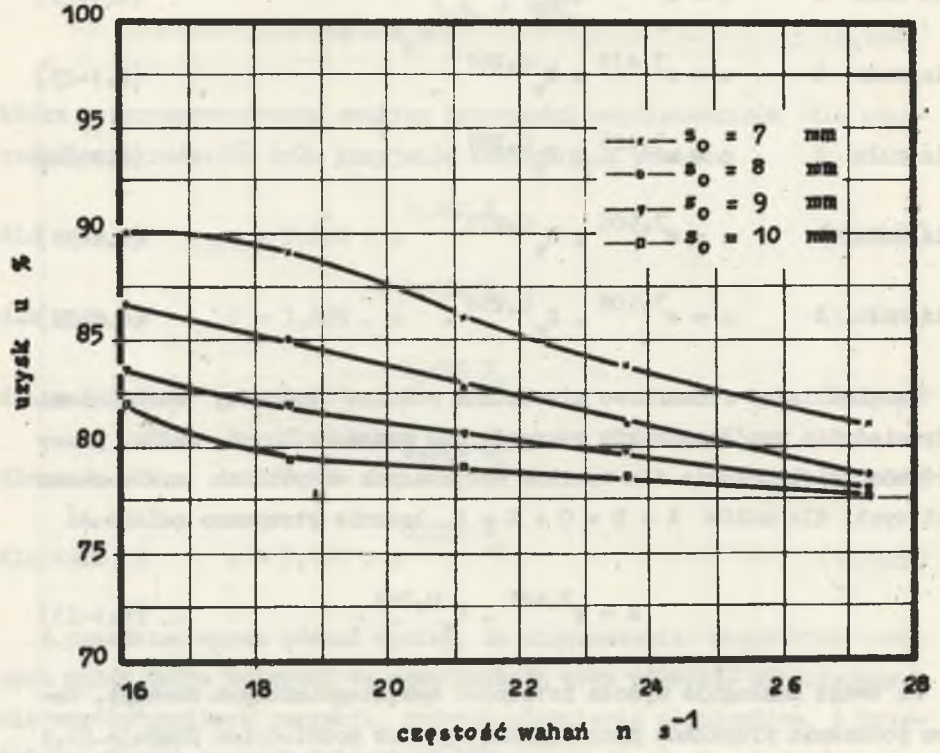
Uwzględniając stosunkowo niewielkie różnice pomiędzy wartościami odpowiednich współczynników regresji dla poszczególnych mułów, przeprowadzono obliczenia dla wyników dotyczących wszystkich mułów razem wziętych; dla mułów A + B + C + D + E łącznie otrzymano zależność

$$c = e^{3,441} \cdot K_v^{0,283} . \qquad (6.1\text{-}33)$$

Na uwagę zasługuje wysoka istotność wyszczególnionych funkcji. Celem pokazania przykładu przybliżania wyników doświadczeń funkcją (6.1-33) naniesiono wartości obliczone na wykres 6.1-10; rozrzut punktów w stosunku do krzywej daje dobrą informację o jakości przybliżenia.

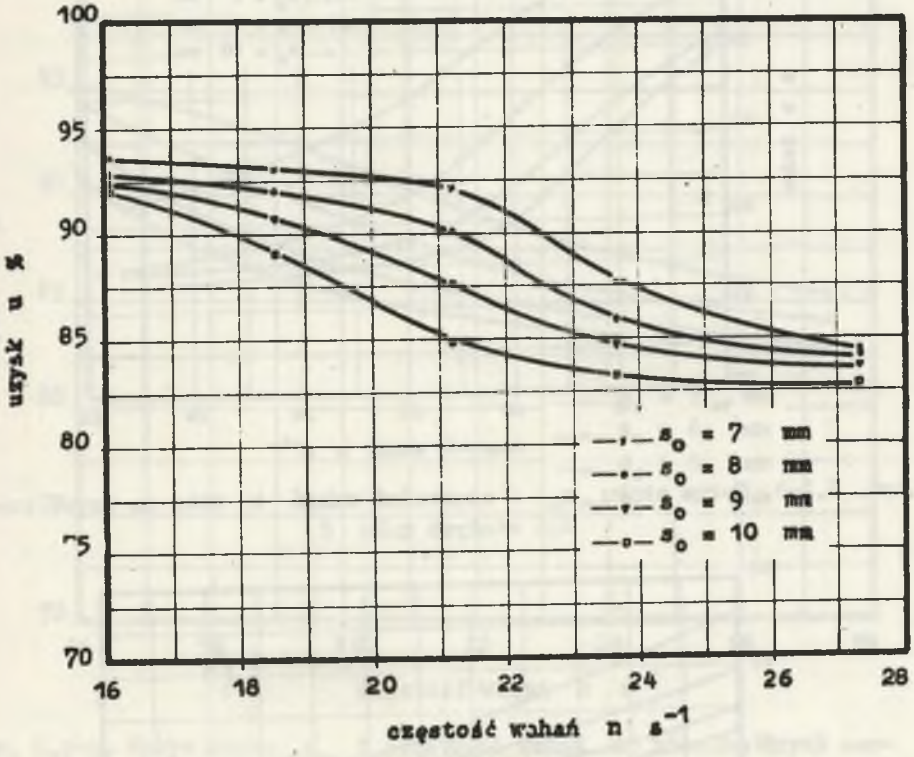
6.2. Odzyskiwanie części stałych jako $f(s_o, n)$ oraz $f(K_v)$

Podczas przeprowadzania doświadczeń nad zmianą zagęszczenia zawiesiny w trakcie odwadniania na drgającym sicie, określano również uzysk części stałych, który stanowi procentowo wyrażony stosunek masy części stałych schodzących z sita do całkowitej masy suchej substancji nadawy. Graficzną ilustrację zależności uzysku od amplitudy i częstości wahań sita dla różnych mułów węglowych przedstawiono na rys. 6.2-1 do 5. Charakterystyczny dla wszystkich badanych zawiesin jest



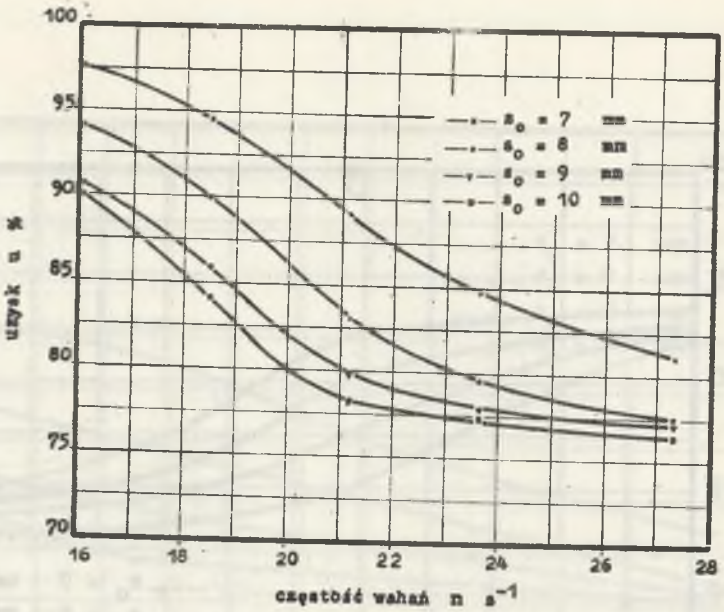
Rys. 6.2-1. Wpływ skoku s_o i częstości wahań n sita na uzysk części stałych mułu A

spadek wartości uzysku towarzyszący rosnącym częstościom wahań i wzrastającym amplitudom z tym, że dla najwyższych częstości i amplitud zróżnicowanie uzysków jest niewielkie. Przy małych częstościach stwierdza się znacznie większe wahania uzysków w stosunku do częstości wielkich z wyjątkiem mułu B, co nie jest przypadkiem nienormalnym. Z wzajemnego układu krzywych widać, że pomimo utrzymania na stałym poziomie wartości zagęszczenia początkowego zawiesiny, niezmiennego obciążenia jednostkowego powierzchni sita, użycia tego samego rodzaju wody i stosowania identycznego czasu odwadniania dla tych samych wartości

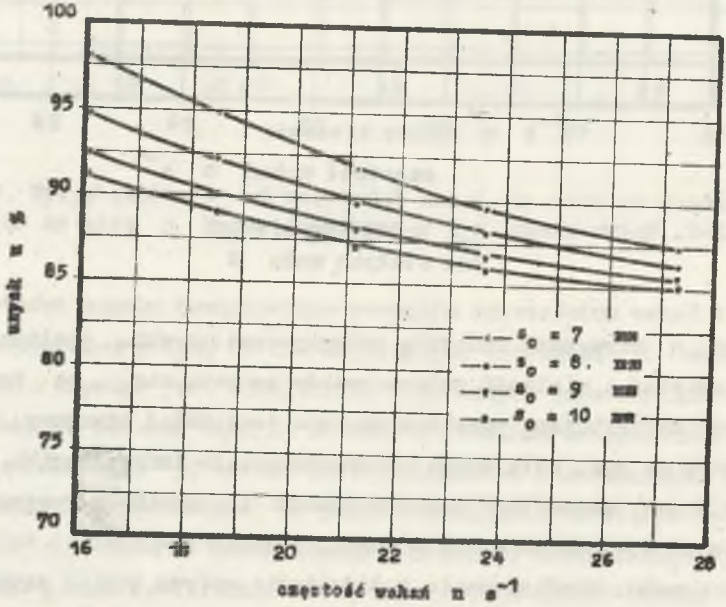


Rys. 6.2-2. Wpływ skoku s_o i częstości wahań n sita na uzysk części stałych mułu B

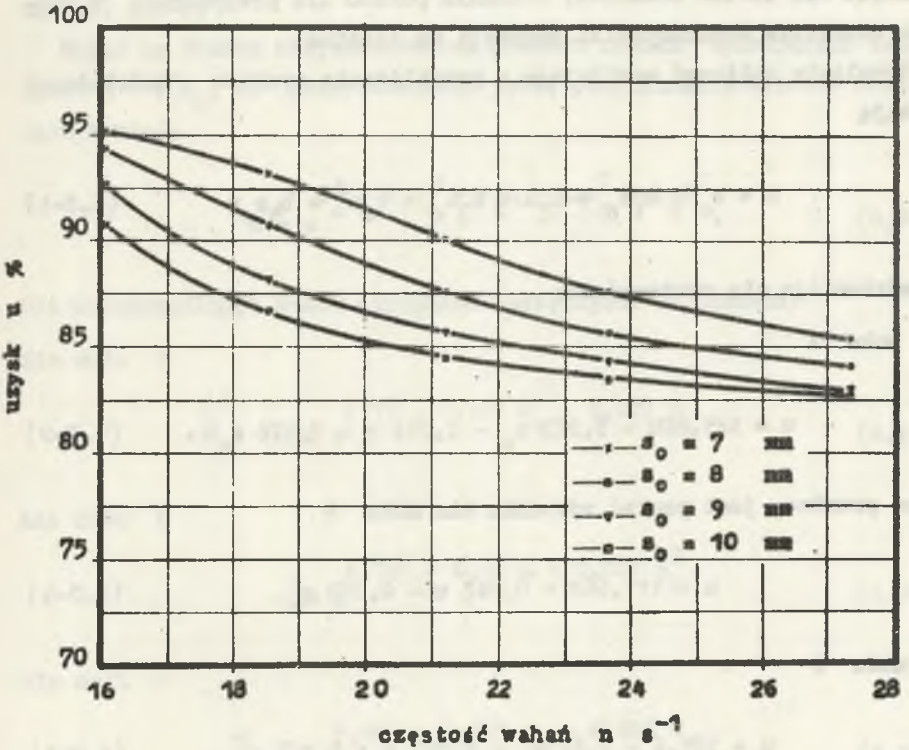
s_o oraz n otrzymano znacznie zróżnicowane uzyski. Analizując kierunek, stopień i wielkość zmian uzysków zauważa się, że zasadniczą przyczyną kształtującą przebieg uzysków jest skład ziarnowy scharakteryzowany na rys. 4-1; można przypuszczać, że inne czynniki, jak np. kształt ziarn, szorstkość ich powierzchni i zdolność przyczepiania się do siebie - odmienne dla różnych składników - również wpływają na wartość uzysku. Zdefiniowanie i rozważanie wpływu takich czynników na kształtowanie się uzysku części stałych nie jest celowe ze względu na postawiony cel pracy.



Rys. 6.2-3. Wpływ skoku s_o i częstości wahań n sita na uzysk części stałych mułu C



Rys. 6.2-4. Wpływ skoku s_o i częstości wahań n sita na uzysk części stałych mułu D



Rys. 6.2-5. Wpływ skoku s_o i częstości wahań n sita na uzysk części stałych mułu E

Na podstawie wyników i obserwacji odzyskiwania części stałych można stwierdzić, że wzrost amplitudy powoduje zwiększenie rozluzowania materiału na sicie, skutkiem czego jest łatwe przesuwanie się najdrobniejszych ziarn (-0,3 mm) wraz z wodą przez warstwę i otwory sita, co podnosi straty części stałych; wzrost częstości wahań powoduje zwielokrotnienie liczby podrzutów, czyli ilości rozluzowań materiału, co również nie sprzyja zatrzymywaniu części stałych na sicie.

Celem matematycznego opisania zależności $u = f(s_o, n)$ przedstawionych na rys. 6.2-1 do 5, aproksymowano wyniki pomiarów funkcjami

wyszczególnionymi w rozdz. 3. Tablice z rezultatami obliczeń ułożono tak, że kolejno eliminowano najmniej istotne współczynniki regresji kierując się testem Studenta; równania podano dla przypadków, w których wszystkie współczynniki regresji są istotne.

Rezultaty obliczeń wynikające z przybliżania wyników doświadczeń funkcją

$$u = b_o + b_1 s_o + b_2 n + b_3 s_o^2 + b_4 n^2 + b_5 s_o n \qquad (6.2\text{-}1)$$

przedstawiają się następująco:

dla mułu A

$$u = 145{,}808 - 5{,}973\ s_o - 2{,}094\ n + 0{,}176\ s_o n. \qquad (6.2\text{-}2)$$

Nieco prostsza jest postać równania dla mułu B

$$u = 111{,}662 - 0{,}842\ n - 0{,}073\ s_o^2 \qquad (6.2\text{-}3)$$

dla mułu C

$$u = 185{,}6 - 2{,}69\ s_o - 6{,}032\ n + 0{,}107\ n^2. \qquad (6.2\text{-}4)$$

Na szczególną uwagę zasługuje brak przybliżenia wyników doświadczeń funkcją (6.2-1) dla mułu D

dla mułu E otrzymano

$$u = 147{,}736 - 1{,}578\ s_o - 3{,}588\ n + 0{,}064\ n^2. \qquad (6.2\text{-}5)$$

Z przedstawionych równań wynika, że dla czterech rodzajów mułu występują trzy różne funkcje; można by opisać zmianę uzysku dla mułów A B, C i E wg wzoru (6.2-1) z tym jednak, że postać ta nie jest wygodna ze względów użytkowych. Nadto, brak możliwości przybliżania tą funkcją wyników doświadczeń przeprowadzonych z mułem D.

Korzystną cechą funkcji (6.2-1) jest możliwość przedstawienia jej graficznie za pomocą linii stałych uzysków, co pokazano przykładowo na rys. 6.2-6.

Mając na uwadze niejednorodność postaci równań opisujących zależność $u = f(s_o, n)$ przeprowadzono próbę przybliżenia wyników doświadczeń funkcją

$$u = e^{b_o + b_1 s_o + b_2 n + b_3 s_o^2 + b_4 n^2} . \qquad (6.2\text{-}6)$$

Dla poszczególnych mułów otrzymano następujące zależności:

dla mułu A

$$u = e^{4,79 - 0,027\, s_o - 0,007\, n} \qquad (6.2\text{-}7)$$

dla mułu B

$$u = e^{4,745 - 0,01\, n - 0,001\, s_o^2} \qquad (6.2\text{-}8)$$

dla mułu C

$$u = e^{5,047 - 0,031\, s_o - 0,016\, n} \qquad (6.2\text{-}9)$$

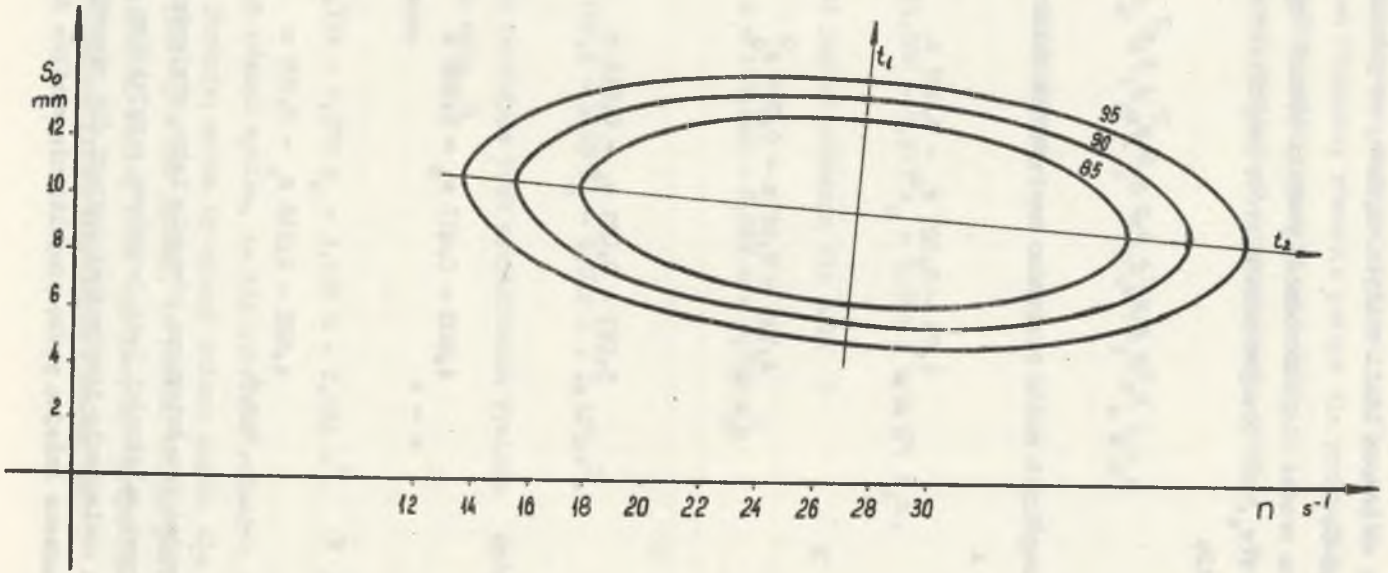
dla mułu D

$$u = e^{4,808 - 0,017\, s_o - 0,008\, n} \qquad (6.2\text{-}10)$$

dla mułu E

$$u = e^{4,825 - 0,018\, s_o - 0,009\, n} . \qquad (6.2\text{-}11)$$

Porównując przedstawione równania łatwo stwierdzić, że postać poszczególnych zależności jest jednakowa z wyjątkiem równania dla mułu B; celem znalezienia identycznej postaci dla wszystkich pięciu mułów przeprowadzono kolejną próbę przybliżania wyników doświadczeń funkcją



Rys. 6.2-6. Zależność pomiędzy uzyskiem części stałych u a skokiem s_o oraz częstością wahań n wg funkcji $u = 271{,}705 - 20{,}386s_o - 7{,}156n + 0{,}875s_o^2 + 0{,}107n^2 + 0{,}132s_o n$

$$u = e^{b_o} \cdot s_o^{b_1} \cdot n^{b_2}. \qquad (6.2\text{-}12)$$

Biorąc pod uwagę wartości wariancji i testów stwierdza się w odniesieniu do mułów, z którymi eksperymentowano, możliwość stosowania tej samej funkcji, przy czym współczynniki regresji są następujące:

dla mułu A $$u = e^{5,357} \cdot s_o^{-0,226} \cdot n^{-0,153} \qquad (6.2\text{-}13)$$

dla mułu B $$u = e^{5,349} \cdot s_o^{-0,118} \cdot n^{-0,203} \qquad (6.2\text{-}14)$$

dla mułu C $$u = e^{6,07} \cdot s_o^{-0,268} \cdot n^{-0,35} \qquad (6.2\text{-}15)$$

dla mułu D $$u = e^{5,316} \cdot s_o^{-0,144} \cdot n^{-0,168} \qquad (6.2\text{-}16)$$

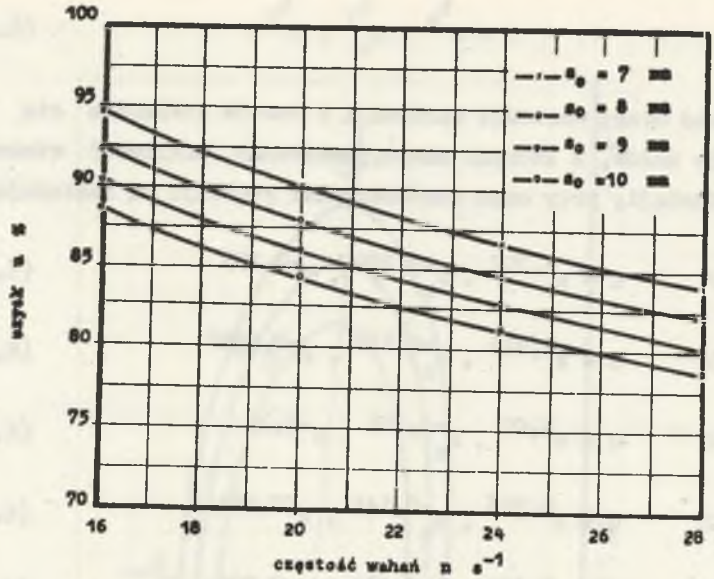
dla mułu E $$u = e^{5,409} \cdot s_o^{-0,151} \cdot n^{-0,202}. \qquad (6.2\text{-}17)$$

Z uwagi na to, że aproksymowanie funkcją (6.2-12) okazało się najlepsze, wykonano obliczenia mające na celu przybliżenie jednej postaci dla wyników doświadczeń wszystkich pięciu zawiesin; dla mułów A + + B + C + D + E łącznie, zależność przyjmuje postać

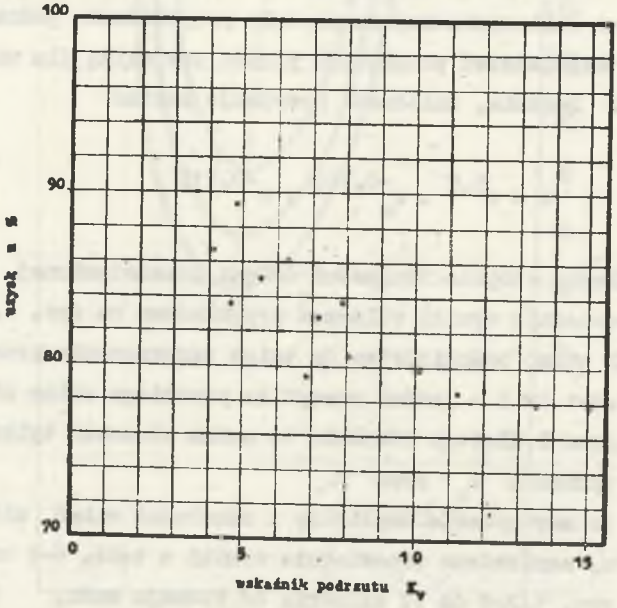
$$u = e^{5,5} \cdot s_o^{-0,182} \cdot n^{-0,215}. \qquad (6.2\text{-}18)$$

Celem określenia stopnia trafności doboru przedstawionej funkcji, naniesiono odpowiednie wyniki obliczeń przykładowo na rys. 6.2-7; z układu krzywych widać podobieństwo do zmian zagęszczenia przedstawionych na rys. 6.2-1 do 5 - jednak specyfika przebiegu zmian nie została właściwie ujęta i dlatego równanie to można stosować tylko w niezbyt szerokim zakresie s_o oraz n.

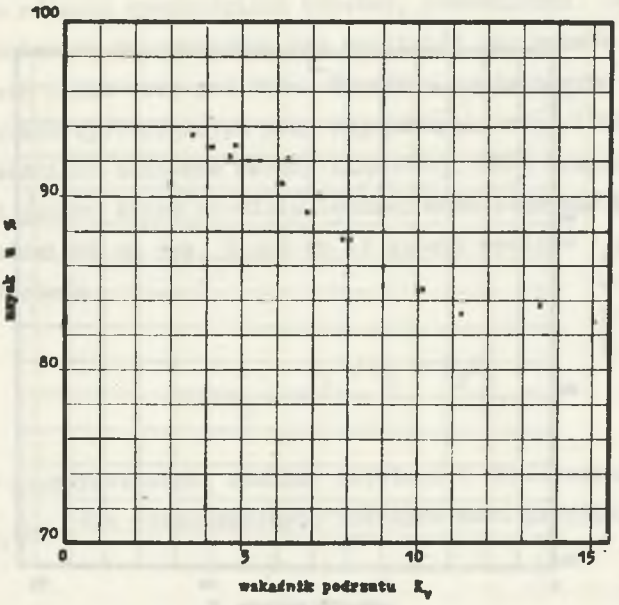
Zmierzając do zastąpienia amplitudy i częstości wahań sita wskaźnikiem podrzutu, naniesiono odpowiednie wyniki z tabl. 6-1 oraz z rys. 6.2-1 do 5 na rys. 6.2-8 do 12 zależnie od rodzaju mułu. Z układu punktów widać, że zależnie od wzrostu wartości K_v maleje uzysk, co można wyjaśnić nierównomiernym przemieszczaniem się ziarn względem



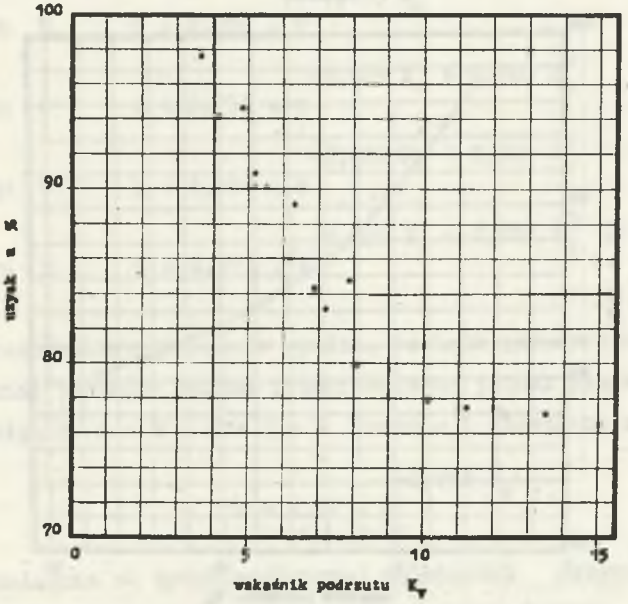
Rys. 6.2-7. Zależność pomiędzy uzyskiem części stałych u skokiem s_o oraz częstością wahań n wg funkcji $u = e^{5,5} \cdot s_o^{-0,182} \cdot n^{-0215}$



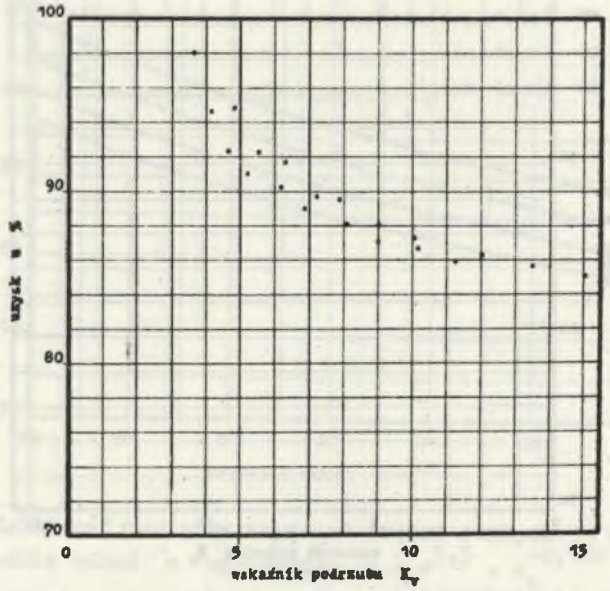
Rys. 6.2-8. Uzysk części stałych mułu A jako funkcja wskaźnika podrzutu



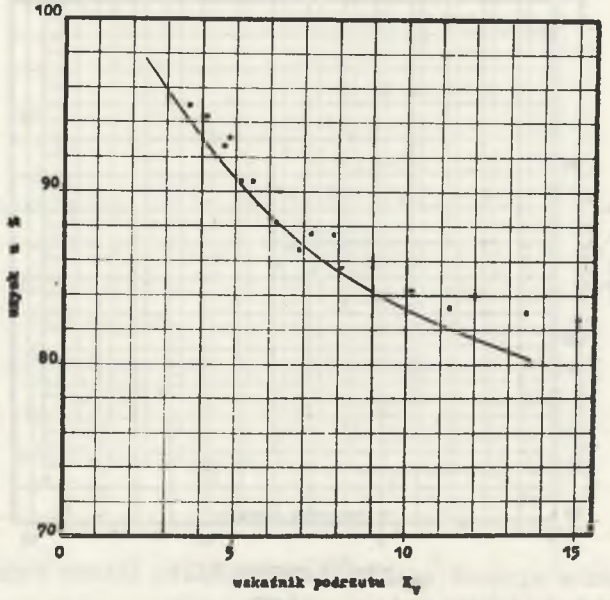
Rys. 6.2-9. Uzysk części stałych mułu B jako funkcja wskaźnika podrzutu



Rys. 6.2-10. Uzysk części stałych mułu C jako funkcja wskaźnika podrzutu



Rys. 6.2-11. Uzysk części stałych mułu D jako funkcja wskaźnika podrzutu



Rys. 6.2-12. Uzysk części stałych mułu E jako funkcja wskaźnika podrzutu

siebie na różnych wysokościach warstwy, powodującym jej rozluzowanie i z tym związaną zwiększającą się możliwość zabierania najdrobniejszych ziarn przez wodę pod sito. Wyraźnie zróżnicowane minimalne wartości uzysków występujących przy najniższych wskaźnikach podrzutu tłumaczą zasadniczo odmienne składy ziarnowe, choć przypuszczalnie inne własności zbioru ziarn na sicie również mogą odgrywać pewną rolę.

Przedstawione na rys. 6.2-8 do 12 zbiory wyników pomiarów przybliżano funkcją

$$u = b_o \cdot e^{b_1 \cdot K_v + b_2 K_v^2}, \qquad (6.2\text{-}19)$$

która po przeprowadzeniu analizy istotności współczynników regresji przy $T_{0,001}$ dla poszczególnych rodzajów mułu przyjmuje następującą postać:

dla mułu A $$u = 4{,}5 \cdot e^{-0{,}011\ K_v} \qquad (6.2\text{-}20)$$

dla mułu B $$u = 4{,}582 \cdot e^{-0{,}013\ K_v} \qquad (6.2\text{-}21)$$

dla mułu C $$u = 4{,}792 \cdot e^{-0{,}069\ K_v + 0{,}003\ K_v^2} \qquad (6.2\text{-}22)$$

dla mułu D $$u = 4{,}664 \cdot e^{-0{,}032\ K_v + 0{,}001\ K_v^2} \qquad (6.2\text{-}23)$$

dla mułu E $$u = 4{,}674 \cdot e^{-0{,}038\ K_v + 0{,}001\ K_v^2}. \qquad (6.2\text{-}24)$$

Z przedstawionych wzorów wynika, że brak jednorodności postaci dla wszystkich badanych mułów; przeprowadzono jednak przybliżanie wyników dla zawiesin A + B + C + D + E łącznie i otrzymano równanie

$$u = 4{,}57 \cdot e^{-0{,}014\ K_v}. \qquad (6.2\text{-}25)$$

Niezależnie od wyszczególnionej zależności przeprowadzono próbę przybliżania wyników tych samych doświadczeń funkcją

$$u = e^{b_o} \cdot K_v^{b_1} \qquad (6.2\text{-}26)$$

celem stwierdzenia, czy nie wystąpi większa jednorodność postaci; otrzymano następujące równania:

dla mułu A $$u = e^{4,6} \cdot K_v^{-0,094} \qquad (6.2\text{-}27)$$

dla mułu B $$u = e^{4,688} \cdot K_v^{-0,104} \qquad (6.2\text{-}28)$$

dla mułu C $$u = e^{4,808} \cdot K_v^{-0,187} \qquad (6.2\text{-}29)$$

dla mułu D $$u = e^{4,679} \cdot K_v^{-0,091} \qquad (6.2\text{-}30)$$

dla mułu E $$u = e^{4,688} \cdot K_v^{-0,107}. \qquad (6.2\text{-}31)$$

Także w tym przypadku przeprowadzono odpowiednie obliczenia niezbędne dla określenia zależności, która zachowałaby swoją ważność dla wyników badanych mułów A + B + C + D + E łącznie

$$u = e^{4,692} \cdot K_v^{-0,117}. \qquad (6.2\text{-}32)$$

Dla przykładu pokazano przybliżanie wyników doświadczeń funkcją (6.2-32) w odniesieniu do mułu E co widać na rys. 6.2-12; porównanie rozrzutu punktów w stosunku do krzywej pozwala stwierdzić, że przewidywanie wyników odzyskiwania części stałych jest możliwe z zadowalającym przybliżeniem.

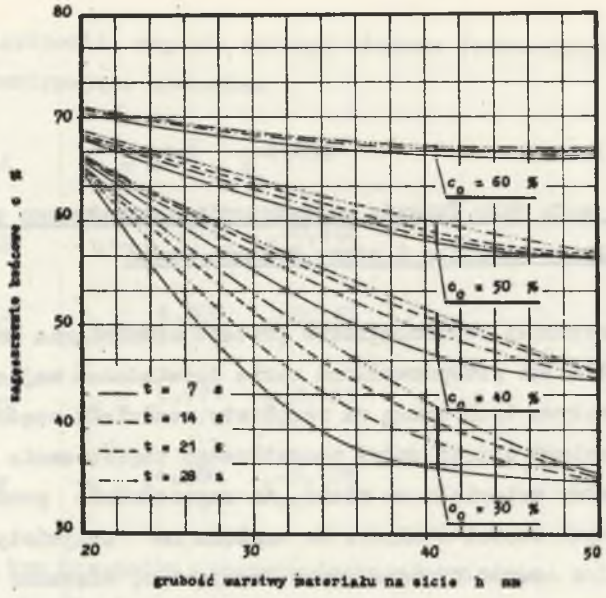
7. Odwadnianie mułu jako funkcja zagęszczenia początkowego zawiesiny, grubości warstwy na sicie i czasu trwania drgań

Zasadnicze czynniki technologiczne procesu odwadniania mogą ulegać odchyleniom i dlatego przeprowadzono serie doświadczeń mających na celu określenie wpływu tych zmian na rezultaty rozdziału części stałych od cieczy. Badaniami objęto wpływ początkowego zagęszczenia zawiesiny i grubości warstwy materiału na sicie, na zagęszczenie produktów odwodnionych i uzysk części stałych. Ze względu na oczywisty związek tych czynników z czasem trwania ruchu drgającego, włączono ten parametr do serii prób.

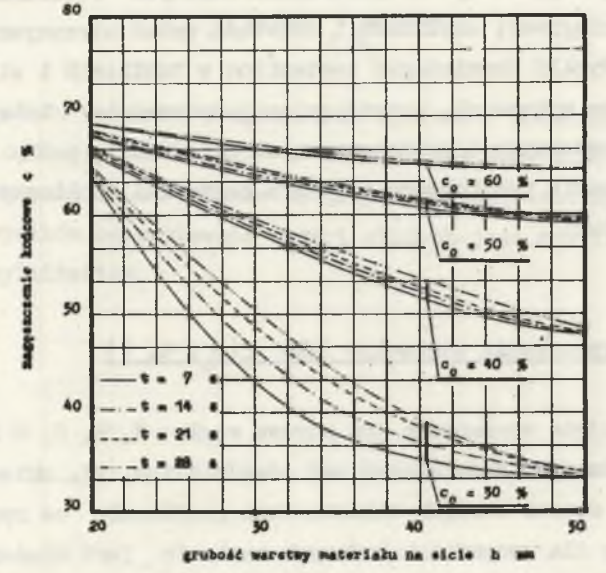
Poszczególne cykle doświadczeń przeprowadzono na zawiesinach sporządzonych przy użyciu odpowiednich węgli surowych o uziarnieniu 1-0 mm i wody wodociągowej; amplitudę i częstość wahań utrzymywano na stałym poziomie. Wyniki doświadczeń zestawiono w tablicach i zilustrowano graficznie na wykresach, przytaczając jednocześnie interpretację przebiegu stwierdzonych i zaobserwowanych zależności; próby ich matematycznego opisania przytoczono w formie zestawień tablicowych i odpowiednich funkcji.

7.1. Zmiana zagęszczenia zawiesiny jako $f(c_o, h, t)$

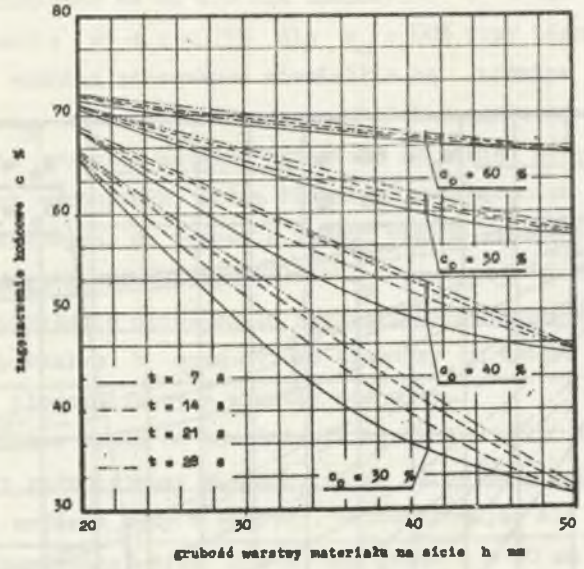
Badaniami objęto wymienione już surowe węgle A, B, C, D i E. Wyniki przeprowadzonych doświadczeń nad odwadnianiem, tj. zmianą zagęszczeń i uzysków części stałych zilustrowano graficznie na rys. 7.1 -1 do 5. Znamienny dla wszystkich badanych zawiesin jest spadek zagęszczenia c materiału na sicie, towarzyszący rosnącym wartościom grubości warstwy h i malejącym zagęszczeniom początkowym c_o oraz coraz krótszym czasom t trwania ruchu drgającego.



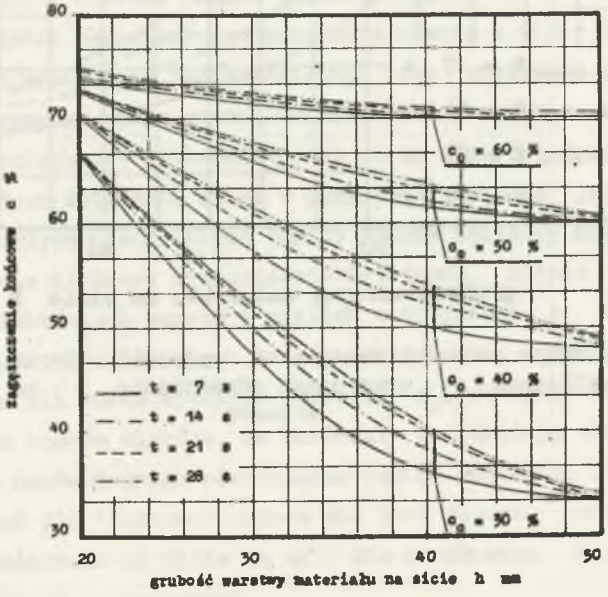
Rys. 7.1-1. Wpływ grubości warstwy h materiału A na sicie, zagęszczenia początkowego c_o oraz czasu odwadniania t na zagęszczenie końcowe c



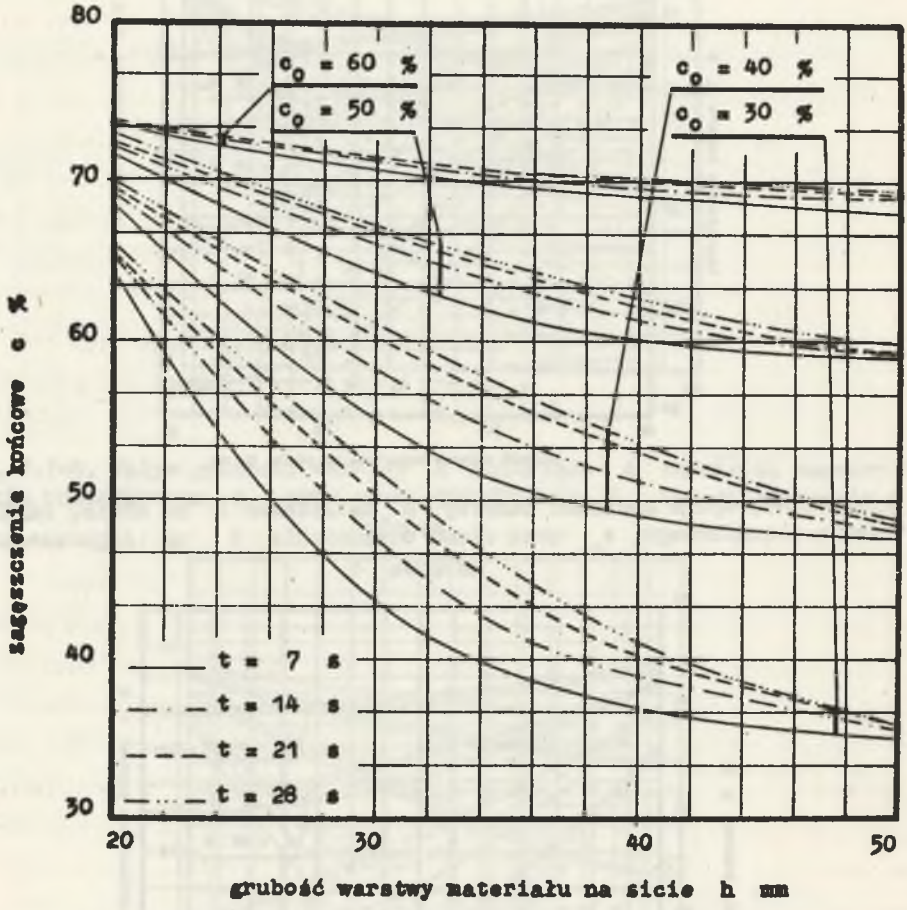
Rys. 7.1-2. Wpływ grubości warstwy h materiału B na sicie, zagęszczenia początkowego c_o oraz czasu odwadniania t na zagęszczenie końcowe c



Rys. 7.1-3. Wpływ grubości warstwy h materiału C na sicie, zagęszczenia początkowego c_o oraz czasu odwadniania t na zagęszczenie końcowe c



Rys. 7.1-4. Wpływ grubości warstwy h materiału D na sicie, zagęszczenia początkowego c_o oraz czasu odwadniania t na zagęszczenie końcowe c



Rys. 7.1-5. Wpływ grubości warstwy h materiału E na sicie, zagęszczenia początkowego c_o oraz czasu odwadniania t na zagęszczenie końcowe c

Za charakterystyczne można uznać oscylowanie maksymalnych wartości zagęszczeń w granicach 64 do 67% dla zawiesin o c_o = 30% przy h = 20 mm oraz uzyskiwanie $69 < c < 75\%$ dla c_o = 60% przy identycznej grubości warstwy; również stosunkowo niewielkie są różnice zagęszczeń dla innych h, c_o oraz t. Stwierdzony spadek zagęszczeń występujący przy wzroście grubości warstwy materiału na sicie przy identycznych pozostałych czynnikach, można tłumaczyć zwiększeniem długości kapilar międzyziarnowych, co powoduje wzrost oporów przepływu cieczy, a więc słabsze odwodnienie. Podwyższenie c_o zawiesiny wprowadzanej na sito powoduje uzyskanie odpowiednio większych zagęszczeń materiału odwodnionego przy stałym h oraz t, co tłumaczy potrzebę odprowadzenia mniejszych ilości cieczy z warstwy pod sito.

Analizując wpływ czasu na odwodnienie stwierdza się, że jego rola w procesie jest najmniejsza; wiadomo, że ze wzrostem czasu rośnie prawdopodobieństwo wyjścia wody z warstwy. Ustosunkowując się do bardzo małych różnic zagęszczeń przy h = 20 mm oraz h = 50 mm w stosunku do $20 < h < 50$ wywołanych przez różne czasy odwadniania można postawić następującą hipotezę: przy odwadnianiu cienkiej warstwy materiału osiąga się w krótkim czasie wartości zagęszczenia zbliżone do granicy możliwości mechanicznego usunięcia cieczy i wtedy dalsze przedłużanie czasu traci sens technologiczny. Przy większych grubościach warstw widać wyraźny wpływ czasu odwadniania na zagęszczenie końcowe, co tłumaczy konieczność pokonania przez ciecz dłuższej drogi. Dla grubych warstw efekt działania czasu w przyjętym zakresie jest znikomy, gdyż czas przepływu cieczy przez bardzo długie kapilary międzyziarnowe jest znacznie dłuższy; stwierdzenie istotnych różnic zagęszczeń przy dużych grubościach warstw i niskich wartościach c_o byłoby możliwe dla kilkakrotnie dłuższych czasów odwadniania. Różnice zagęszczeń końcowych dla coraz wyższych wartości c_o są coraz mniejsze dla poszczególnych czasów dlatego, że wartości c zbliżają się do granicy możliwości mechanicznego odwodnienia takich zawiesin. Przeprowadzenie doświadczeń dla dłuższych czasów nie jest celowe, ponieważ czas przebywania materiału na sicie na ogół nie przekracza 30 sekund - co limituje wydajność przesiewaczy.

Celem matematycznego opisania zależności $c = f(t, h, c_o)$ przybliżano wyniki pomiarów funkcjami cytowanymi w rozdziale 3. Tablice ułożono w taki sposób, że kolejno eliminowano najmniej istotne współczynniki regresji kierując się testem Studenta; Odpowiednie równania przytaczano dla przypadków, dla których wszystkie współczynniki regresji są istotne na 99,9%-owym poziomie ufności.

Próby aproksymacji wyników doświadczeń funkcją (3-8) okazały się negatywne, dlatego też wyników odpowiednich obliczeń nie podano.

Pozytywne rezultaty obliczeń wynikające z przybliżania wyników doświadczeń funkcją

$$c = e^{b_o + b_1 t + b_2 h + b_3 c_o + b_4 t^2 + b_5 h^2 + b_6 c_o^2} \qquad (7.1\text{-}1)$$

przedstawiono przy pomocy następujących równań:

dla mułu A otrzymano równanie

$$c = e^{3,865 - 0,0107\ h + 0,012\ c_o}, \qquad (7.1\text{-}2)$$

z którego widać, że czas odwadniania t został wyeliminowany.

Dla mułu B

$$c = e^{2,898 - 0,01\ h + 0,055\ c_o - 0,0005\ c_o^2} \qquad (7.1\text{-}3)$$

także w tym przypadku czynnik t nie występuje pomimo, że postać wzoru jest bardziej rozbudowana.

Dla mułu C

$$c = e^{3,867 - 0,012\ h + 0,0135\ c_o} \qquad (7.1\text{-}4)$$

dla mułu D

$$c = e^{3,793 - 0,011\ h + 0,015\ c_o} \qquad (7.1\text{-}5)$$

dla mułu E

$$c = e^{3,781 - 0,0104\,h + 0,0145\,c_o}. \qquad (7.1\text{-}6)$$

Mając na uwadze podobieństwo postaci funkcji (7.1-2, 4, 5 i 6)przeprowadzono niezbędne obliczenia celem przybliżenia rezultatów pomiarów dotyczących mułów A + B + C + D + E łącznie; otrzymano zależność

$$c = e^{3,818 - 0,0108\,h + 0,0137\,c_o}. \qquad (7.1\text{-}7)$$

Ze względu na to, że dla mułu B otrzymano inną postać zależności aniżeli dla pozostałych materiałów, przeprowadzono kolejną próbę przybliżenia wyników doświadczeń funkcją

$$c = e^{b_o} \cdot t^{b_1} \cdot h^{b_2} \cdot c_o^{b_3}. \qquad (7.1\text{-}8)$$

Uwzględniając wartości wariancji i testów Fischera i Studenta stwierdzono, że dla wszystkich badanych mułów można stosować tę samą postać funkcji z tym, że współczynniki regresji są różne:

dla mułu A $\quad c = e^{3,287} \cdot h^{-0,356} \cdot c_o^{0,528}$ (7.1-9)

dla mułu B $\quad c = e^{2,945} \cdot h^{-0,329} \cdot c_o^{0,595}$ (7.1-10)

dla mułu C $\quad c = e^{3,171} \cdot h^{-0,387} \cdot c_o^{0,594}$ (7.1-11)

dla mułu D $\quad c = e^{2,876} \cdot h^{-0,362} \cdot c_o^{0,654}$ (7.1-12)

dla mułu E $\quad c = e^{2,88} \cdot h^{-0,345} \cdot c_o^{0,635}$. (7.1-13)

Z uwagi na to, że aproksymowanie funkcją (7.1-8) okazało się korzystne, przeprowadzono obliczenia celem przybliżenia tej postaci dla

mułów A + B + C + D + E łącznie; otrzymana zależność jest następująca:

$$c = e^{3,032} \cdot h^{-0,356} \cdot c_o^{0,601} . \qquad (7.1\text{-}14)$$

Analizując stopień trafności przybliżenia podanych funkcji do rezultatów pomiarów łatwo stwierdzić, że pęki krzywych otrzymane dla różnych wartości h oraz c_o przy użyciu wzorów (7.1-7 i 14) są do siebie równoległe i układają się w kierunku osi zagęszczeń - co nie pokrywa się z zależnościami stwierdzonymi doświadczalnie a przedstawionymi na rys. 7.1-1 do 5.

Celem znalezienia możliwie prostej postaci takiej funkcji, która odzwierciedlałaby charakter zmian zagęszczeń materiału odwadnianego przy różnych zagęszczeniach początkowych i stopniowo zmienianej grubości warstwy na sicie - tym razem już z pominięciem czynnika czasu - przeprowadzono kolejną próbę przybliżenia wyników doświadczeń funkcją

$$c = b_1 + b_2 c_o + (b_3 - b_2 c_o)\, e^{b_4 h + b_5}, \qquad (7.1\text{-}15)$$

na podstawie której można podać równania dla poszczególnych mułów:

dla mułu A

$$c = -7,711 + 1,177\, c_o + (79,681 - 1,177\, c_o) e^{-0,051\, h + 0,843} \qquad (7.1\text{-}16)$$

dla mułu B

$$c = -9,526 + 1,268\, c_o + (79,732 - 1,268\, c_o) e^{-0,055\, h + 0,949} \qquad (7.1\text{-}17)$$

dla mułu C

$$c = -68,553 + 2,186\, c_o + (141,857 - 2,186\, c_o) e^{-0,022\, h + 0,345} \qquad (7.1\text{-}18)$$

dla mułu D

$$c = -19{,}301 + 1{,}495\ c_o + (94{,}977 - 1{,}495\ c_o)e^{-0{,}051\ h + 0{,}835} \quad (7.1\text{-}19)$$

dla mułu E

$$c = -7{,}658 + 1{,}28\ c_o + (83{,}899 - 1{,}28\ c_o)e^{-0{,}063\ h + 1{,}011}. \quad (7.1\text{-}20)$$

W przypadku potraktowania wszystkich wyników pomiarów przeprowadzonych dla mułów A + B + C + D + E łącznie otrzymuje się równanie

$$c = -16{,}545 + 1{,}389\ c_o + (90{,}009 - 1{,}389\ c_o)e^{-0{,}047\ h + 0{,}774}. \quad (7.1\text{-}21)$$

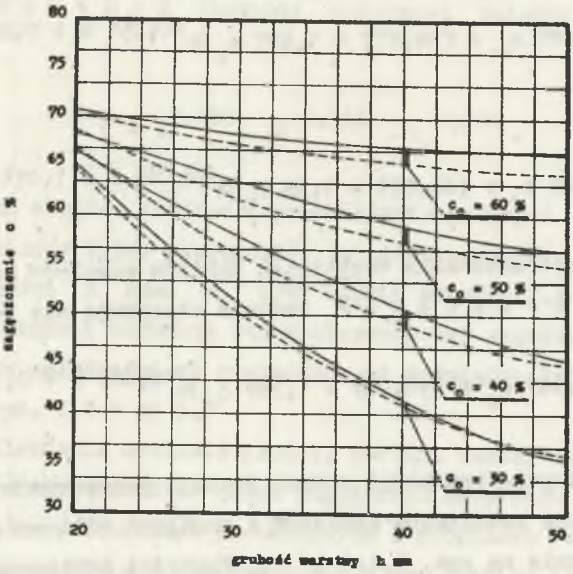
Określenie stopnia trafności doboru funkcji przeprowadzono na podstawie porównania rezultatów pomiarów z wynikami obliczeń, co zilustrowano graficznie na rys. 7.1-6 do 11. Wartości obliczone zestawiono z wynikami doświadczeń otrzymanymi po 21 sekundach odwadniania tj. w czasie uznanym za optymalny. Z wzajemnego układu krzywych można wnioskować, że z technologicznego punktu widzenia aproksymacja jest zadowalająca.

Przedstawione równanie pęku krzywych wybrano tak, aby wychodził z określonego punktu; odciętą tego punktu wyznacza iloraz $(-b_5/b_4)$ i wtedy $c = b_1 + b_3$. Dla rosnącej grubości warstwy h, wartości c dążą do wielkości $c = b_1 + b_2 c_o$; zależność ta wg równania jest liniowa - w praktyce zaś występują pewne odchylenia widoczne na rys. 7.1-1 do 5, spowodowane odmiennością własności badanych mułów. Współczynnik b_4 decyduje o szybkości zmiany wartości zagęszczeń w zależności od h.

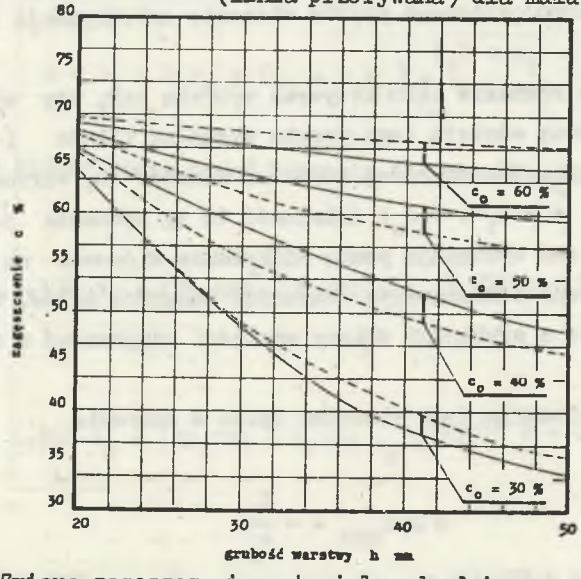
Rozpatrywana funkcja jest właściwa tylko w zakresie

$$h \geqslant h_{min} = -\frac{b_5}{b_4}$$

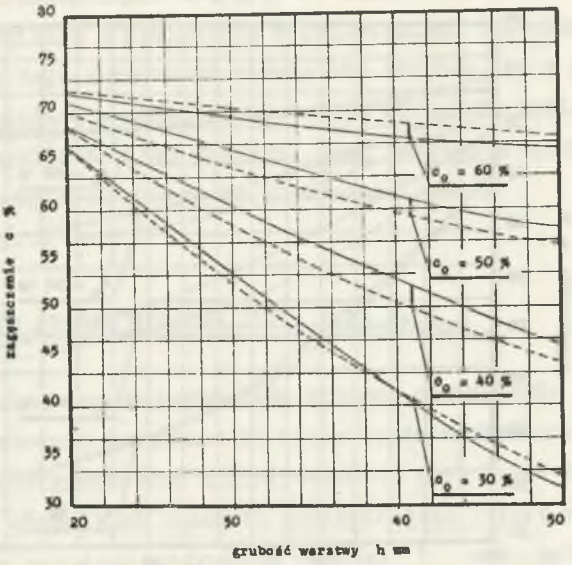
praktycznie można przyjąć $h_{min} = 20$ mm.



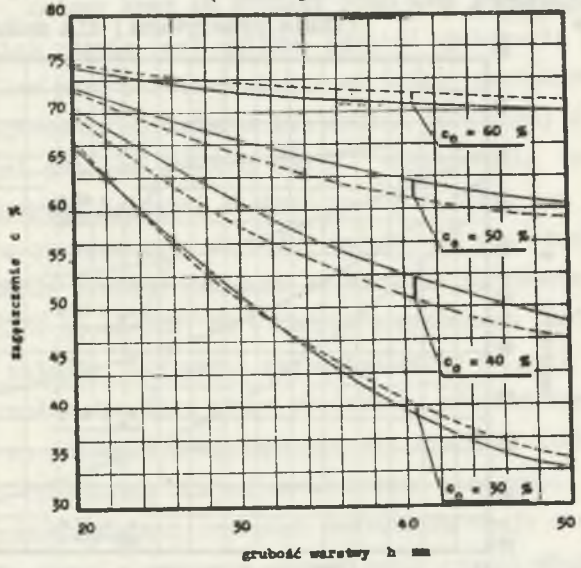
Rys. 7.1-6. Zmiana zagęszczenia materiału odwodnionego otrzymana z pomiarów (linia ciągła) i wg funkcji $c = -7{,}711 + 1{,}177\, c_o + (79{,}681 - 1{,}177\, c_o)e^{-0{,}051h} + 0{,}843$ (linia przerywana) dla mułu A po t = 21 s



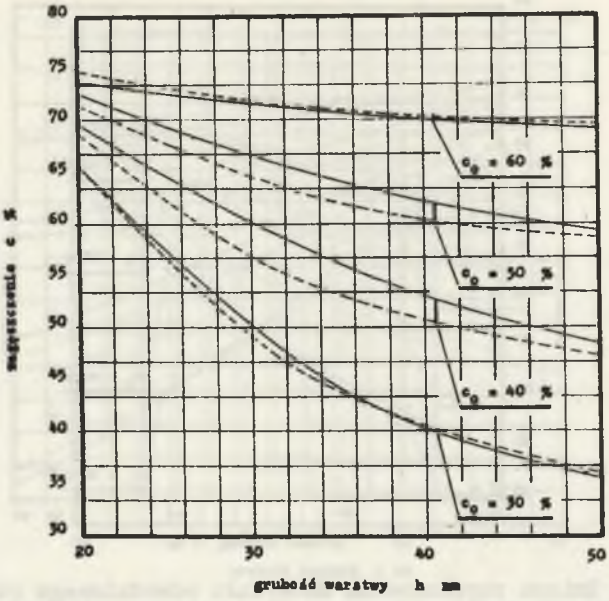
Rys. 7.1-7. Zmiana zagęszczenia materiału odwodnionego otrzymana z pomiarów (linia ciągła) i wg funkcji $c = -9{,}526 + 1{,}268\, c_o + (79{,}732 - 1{,}268\, c_o)e^{-0{,}0547h} + 0{,}949$ (linia przerywana) dla mułu B po t = 21 s



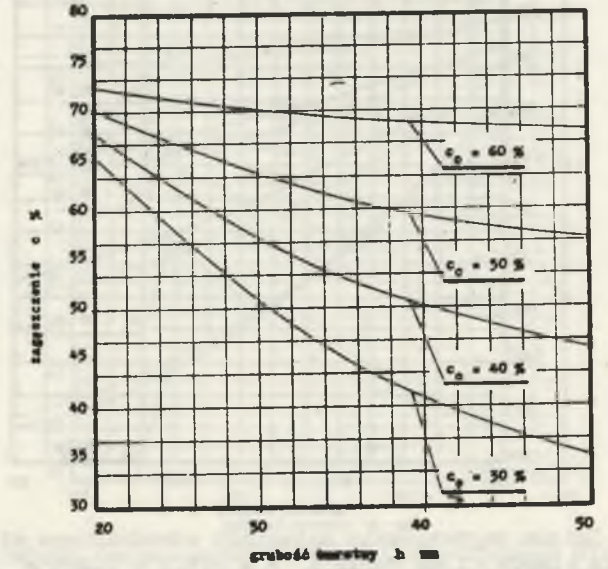
Rys. 7.1-8. Zmiana zagęszczenia materiału odwodnionego otrzymana z pomiarów (linia ciągła) i wg funkcji $c = -68{,}553 + 2{,}186\ c_o + (141{,}857 - 2{,}186\ c_o)e^{-0{,}022\ h} + 0{,}345$ (linia przerywana) dla mułu C po t = 21 s



Rys. 7.1-9. Zmiana zagęszczenia materiału odwodnionego otrzymana z pomiarów (linia ciągła) i wg funkcji $c = -19{,}3 + 1{,}495\ c_o + (94{,}977 - 1{,}495\ c_o)e^{-0{,}051\ h} + 0{,}835$ (linia przerywana) dla mułu D po t = 21 s



Rys. 7.1-10. Zmiana zagęszczenia materiału odwodnionego otrzymana z pomiarów (linia ciągła) i wg funkcji $c = -7{,}658 + 1{,}28\ c_o + (83{,}899 - 1{,}28\ c_o)e^{-0{,}063\ h + 1{,}01}$ (linia przerywana) dla mułu E po $t = 21$ s



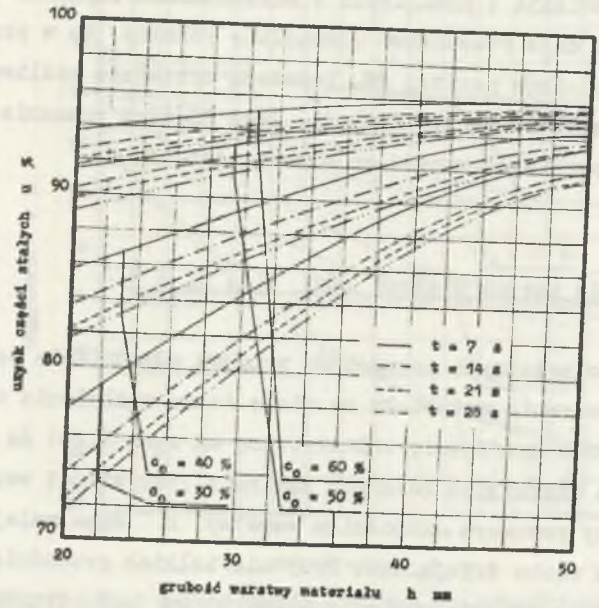
Rys. 7.1-11. Zmiana zagęszczenia materiału odwodnionego wg funkcji $c = -16{,}545 + 1{,}389\ c_o + (90{,}0 - 1{,}389\ c_o)e^{-0{,}047\ h + 0{,}774}$ dla mułu A, B, C, D i E łącznie

Odchylenia poszczególnych krzywych od zależności stwierdzonych doświadczalnie, wynikają z pominięcia w obliczeniach czynnika czasu odwadniania t, co daje stosunkowo niewielkie różnice, bo w przeważającej liczbie przypadków poniżej 2%. Istnieją wprawdzie możliwości jeszcze lepszego przybliżenia tej funkcji, lecz kosztem znacznie większego jej skomplikowania co uznano za nieuzasadnione.

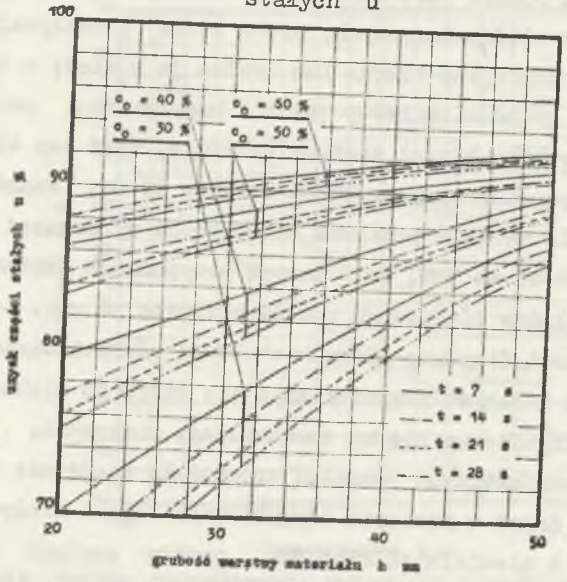
7.2. Odzyskiwanie części stałych jako $f(t, h, c_o)$

Zmiana technologicznych parametrów procesu odwadniania powoduje obok wahań zagęszczenia materiału na sicie także odchylenia uzysku części stałych, które graficznie zilustrowano na rys. 7.2-1 do 5. Charakterystyczny dla wszystkich badanych zawiesin jest wzrost wartości uzysku towarzyszący rosnącym grubościom warstwy h oraz malejącym czasom t trwania ruchu drgającego. Przy nievielkich grubościach warstw stwierdza się duże zróżnicowanie uzysków, które jest tym większe, im niższe jest c_o nadawy oraz im krótszy jest czas odwadniania. Przyczyną tak wielkich różnic jest zmienna gęstość upakowania ziarn i różna długość kapilar międzyziarnowych, przez które przepływająca ciecz transportuje najdrobniejsze ziarna lub osadza je w nich; z tego powodu zarówno wzrost grubości warstwy jak i zagęszczenia początkowego sprzyjają zatrzymywaniu części stałych na sicie. Fakt ten tłumaczy wysokie uzyski otrzymywane przy grubości warstwy 50 mm; znamienne jest przy tym zmierzanie wyników pomiarów do wartości wynoszącej dla poszczególnych mułów 93 do 98%, co w danych przypadkach można wyjaśnić zróżnicowaniem składów ziarnowych przedstawionych na rys. 4-1. Prawdopodobnie własności fizyczne ziarn kształtują również wartości uzysku przez wpływ na zdolność przyczepiania się ziarn do siebie, co jednak wobec ruchu drgającego nie ma zasadniczego znaczenia.

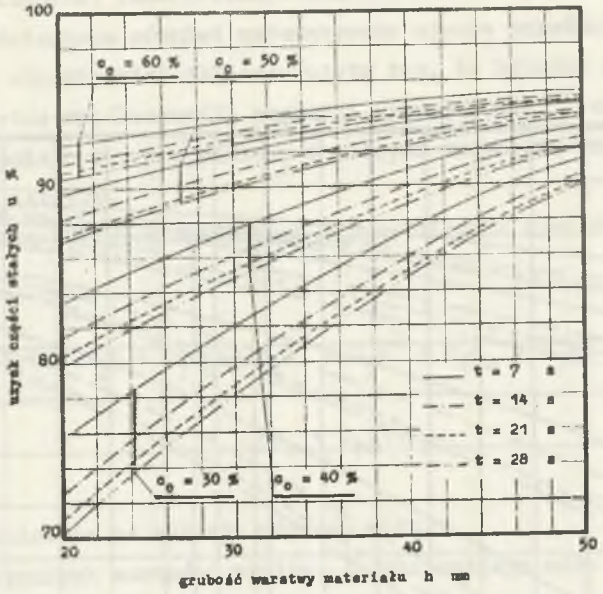
W świetle przedstawionych rozważań zrozumiałą staje się również rola czasu trwania drgań w procesie odzyskiwania części stałych; dla niskich zagęszczeń i niewielkich grubości warstw gęstość upakowania ziarn jest mała a kapilary międzyziarnowe są krótkie i dlatego ze



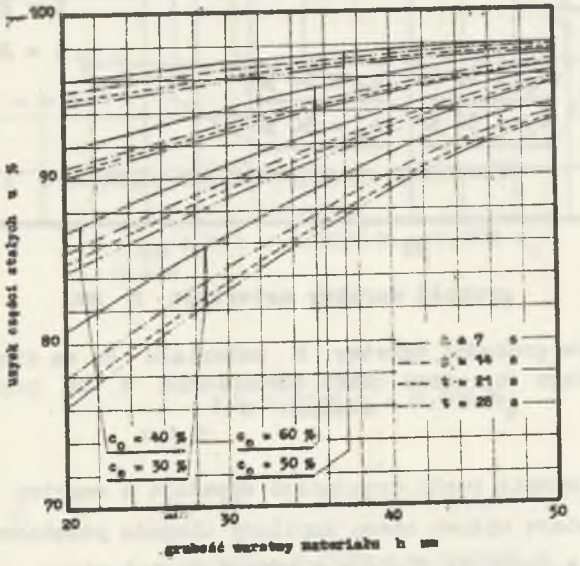
Rys. 7.2-1. Wpływ grubości warstwy h materiału A na sicie, zagęszczenia początkowego c_o oraz czasu odwadniania t na uzysk części stałych u



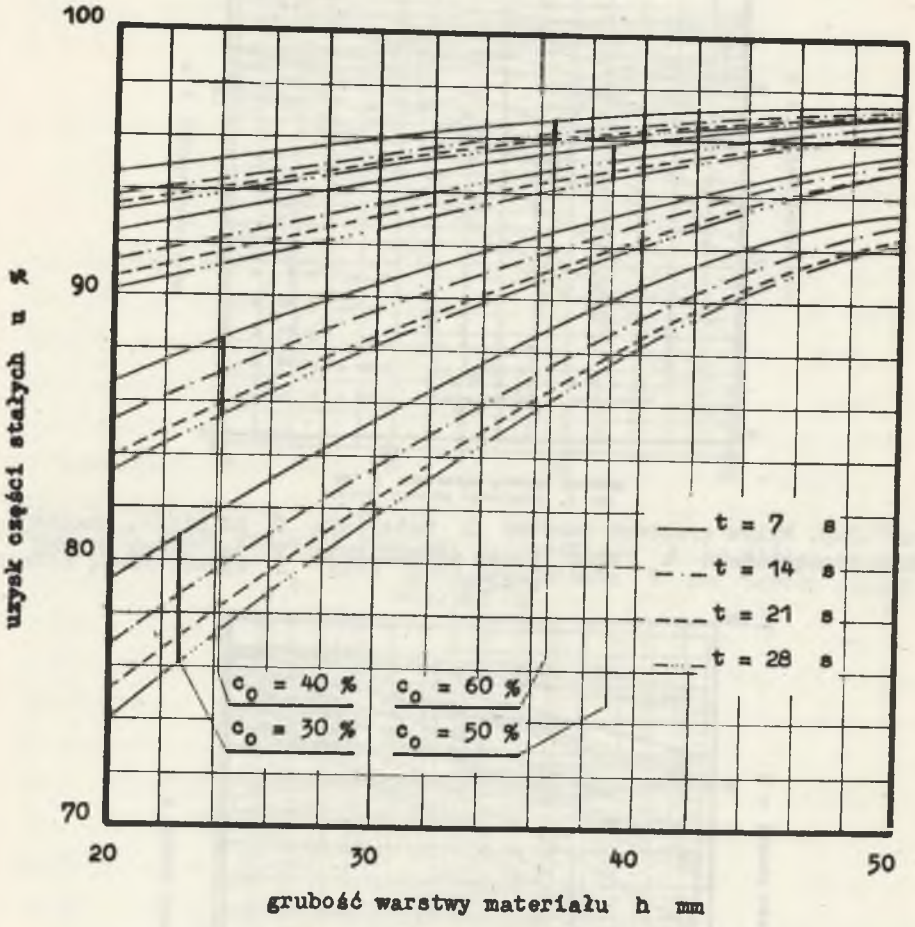
Rys. 7.2-2. Wpływ grubości warstwy h materiału B na sicie, zagęszczenia początkowego c_o oraz czasu odwadniania t na uzysk części stałych u



Rys. 7.2-3. Wpływ grubości warstwy h materiału C na sicie, zagęszczenia początkowego c_o oraz czasu odwadniania t na uzysk części stałych u



Rys. 7.2-4. Wpływ grubości warstwy h materiału D na sicie zagęszczenia początkowego c_o oraz czasu odwadniania t na uzysk części stałych u



Rys. 7.2-5. Wpływ grubości warstwy h materiału E na sicie, zagęszczenia początkowego c_0 oraz czasu odwadniania t na uzysk części stałych u

wzrostem czasu trwania ruchu drgającego wypadają z warstwy coraz to inne ziarna. W miarę upływu czasu kapilary ulegają poważnemu zatkaniu, warstwa staje się znacznie uboższa w wodę i ubytek ziarn gwałtownie maleje.

Obok fizycznej interpretacji mechanizmu zatrzymywania ziarn na sicie, przedstawiono również matematyczne ujęcie zależności $u=f(t,h,c_o)$. Rezultaty odpowiednich obliczeń ujęto tak, że kolejno eliminowano najmniej istotne współczynniki regresji kierując się testem Studenta; równania podano dla przypadków, w których wszystkie współczynniki regresji są istotne.

Rezultaty obliczeń wynikające z przybliżania wyników doświadczeń funkcją

$$u = b_o + b_1 t + b_2 h + b_3 c_o + b_4 t^2 + b_5 h^2 + b_6 s_o^2 + b_7 th + b_8 tc_o + b_9 hc_o + b_{10} thc_o \qquad (7.2\text{-}1)$$

opisano zależnie od rodzaju użytego mułu.

Z otrzymanych wartości wynika, że dla każdego mułu otrzymuje się inną postać funkcji, wobec czego niecelowe jest przytaczanie poszczególnych zależności tym bardziej, że przeprowadzono z lepszym skutkiem kolejne obliczenia przy pomocy funkcji

$$u = e^{b_o + b_1 t + b_2 h + b_3 c_o + b_4 t^2 + b_5 h^2 + b_6 c_o^2}. \qquad (7.2\text{-}2)$$

Dla mułu A otrzymuje się następującą zależność

$$u = e^{4{,}191 + 0{,}0036\, h + 0{,}004\, c_o} \qquad (7.2\text{-}3)$$

dla mułu B

$$u = e^{4 + 0{,}0046\, h + 0{,}006\, c_o} \qquad (7.2\text{-}4)$$

dla mułu C

$$u = e^{4{,}146 + 0{,}0039\, h + 0{,}0044\, c_o} \qquad (7.2\text{-}5)$$

dla mułu D

$$u = e^{4,235 + 0,0033\,h + 0,0037\,c_o} \qquad (7.2\text{-}6)$$

dla mułu E

$$u = e^{4,229 + 0,0034\,h + 0,0037\,c_o}. \qquad (7.2\text{-}7)$$

Mając na uwadze identyczną postać funkcji dla badanych rodzajów mułu przeprowadzono dodatkowe obliczenia mające na celu otrzymanie funkcji wspólnej dla mułów A + B + C + D + E łącznie, która przedstawia się następująco

$$u = e^{4,161 + 0,0037\,h + 0,0044\,c_o}. \qquad (7.2\text{-}8)$$

Niezależnie od przedstawionych prawidłowości przeprowadzono obliczenia mające na celu przybliżenie wyników doświadczeń funkcją

$$u = e^{b_o} \cdot t^{b_1} \cdot h^{b_2} \cdot c_o^{b_3}, \qquad (7.2\text{-}9)$$

a rezultaty odpowiednich obliczeń zestawiono poniżej.
Dla mułu A

$$u = e^{3,412} \cdot h^{0,119} \cdot c_o^{0,177} \qquad (7.2\text{-}10)$$

dla mułu B

$$u = e^{2,91} \cdot h^{0,149} \cdot c_o^{0,266} \qquad (7.2\text{-}11)$$

dla mułu C

$$u = e^{3,3} \cdot h^{0,128} \cdot c_o^{0,195} \qquad (7.2\text{-}12)$$

dla mułu D

$$u = e^{3,519} \cdot h^{0,109} \cdot c_o^{0,164}. \qquad (7.2\text{-}13)$$

Również dla mułu E postać funkcji jest podobna do wyżej przedstawionych

$$u = e^{3,505} \cdot h^{0,112} \cdot c_o^{0,163}. \qquad (7.2\text{-}14)$$

Kierując się podobieństwem postaci funkcji (7.2-10 do 14) przeprowadzono odpowiednie obliczenia celem otrzymania zależności wspólnej dla mułów A + B + C + D + E

$$u = e^{3,329} \cdot h^{0,124} \cdot c_o^{0,193}. \qquad (7.2\text{-}15)$$

Analizując trafność przybliżenia podanych funkcji do wyników doświadczeń łatwo stwierdzić, że pęki krzywych otrzymane z wzorów (7.2-8 i 15) są do siebie równoległe i układają się w kierunku osi uzysków - co nie jest zgodne z zależnościami stwierdzonymi podczas pomiarów, jak to zilustrowano na rys. 7.2-1 do 5.

Celem znalezienia prostej postaci takiej funkcji, która odzwierciedlałaby przebieg zmian uzysków części stałych na sicie przy różnych c_o oraz h - z pominięciem najmniej istotnego t - przeprowadzono kolejną próbę aproksymacji funkcją

$$u = b_1 + (b_2 + b_3 c_o)\, e^{b_4 h + b_5} \qquad (7.2\text{-}16)$$

i otrzymano następujące zależności:

dla mułu A

$$u = 96,9 + (-1509,4 + 23,5\, c_o)\, e^{-0,048\, h - 2,653} \qquad (7.2\text{-}17)$$

dla mułu B

$$u = 94,1 + (-1861,9 + 29,1\ c_o)e^{-0,039\ h} - 2,784 \qquad (7.2\text{-}18)$$

dla mułu C

$$u = 96,9 + (-1847,1 + 27,7\ c_o)e^{-0,041\ h} - 2,946 \qquad (7.2\text{-}19)$$

dla mułu D

$$u = 99,2 + (-2070,8 + 31,2\ c_o)e^{-0,042\ h} - 3,147 \qquad (7.2\text{-}20)$$

dla mułu E

$$u = 98,5 + (-284,7 + 4,319\ c_o)e^{-0,046\ h} - 1,1. \qquad (7.2\text{-}21)$$

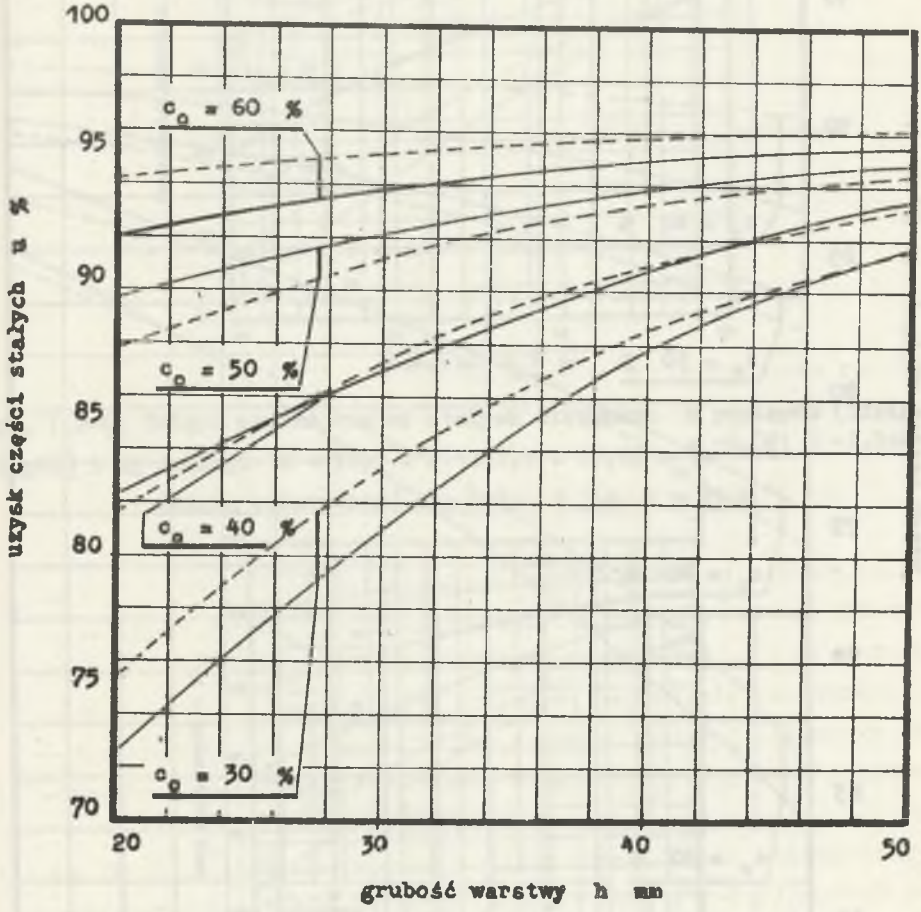
Traktując wyniki pomiarów otrzymanych dla mułów A + B + C + D + E łącznie, otrzymuje się równanie

$$u = 97,1 + (-1232,0 + 18,85\ c_o)e^{-0,043\ h} - 2,515. \qquad (7.2\text{-}22)$$

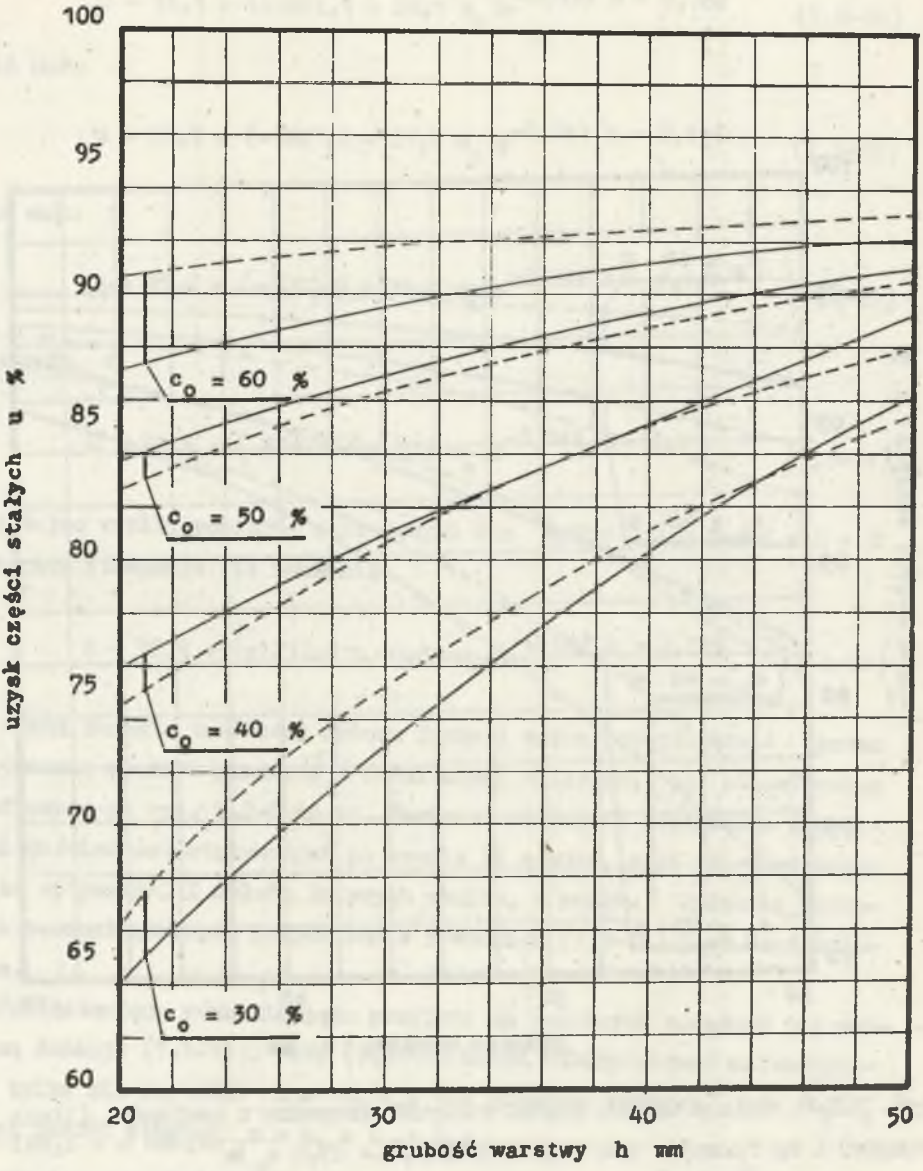
Ocenę stopnia trafności doboru funkcji można przeprowadzić przez porównanie wyników pomiarów z rezultatami obliczeń, co zilustrowano graficznie na rys. 7.2-6 do 11. Wartości obliczone zestawiono z wynikami doświadczeń otrzymanymi po czasie 21 sekund, gdyż ten czas uznano za optymalny. Z układu krzywych wynika, z punktu widzenia kryteriów technologicznych przybliżenie równaniem (7.2-16) jest zadowalające.

Przedstawione równanie pęku przyjęto na podobnych zasadach jak omówioną funkcję (7.1-15). Wzór (7.2-16) można interpretować matematycznie tylko dla wartości $h \geqslant -b_5/b_4$; dla grubości warstwy $h = -b_5/b_4$ uzysk części stałych $u = b_1 + b_2 + b_3 c_o$.

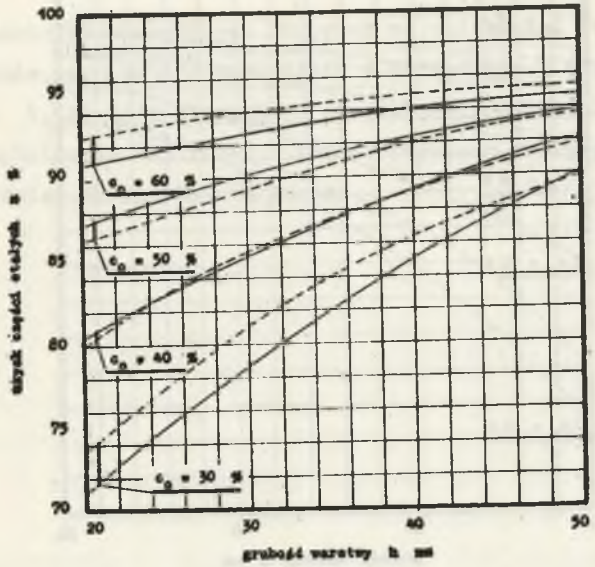
Przyjmując przykładowo $h = 0$ wtedy $u = b_1 + (b_2 + b_3 c_o)e^{b_5}$; rosnącym wartościom h odpowiada wzrost u, które dąży do b_1. Współczynnik b_4 decyduje o wartości u, zależnie od h w ten sposób, że im b_4 jest większe, tym u zmienia się szybciej.



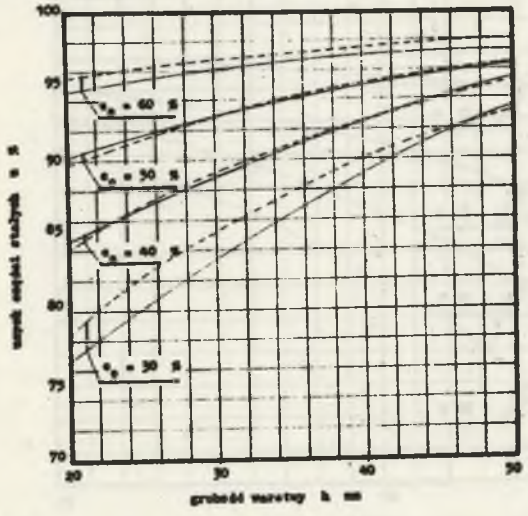
Rys. 7.2-6. Zmiana uzysku części stałych otrzymana z pomiarów (linia ciągła) i wg funkcji $u = 96{,}9 + (-1509{,}4 + 23{,}5\ c_o)e^{-0{,}048\ h} - 2{,}653$ (linia przerywana) dla mułu A po t = 21 s



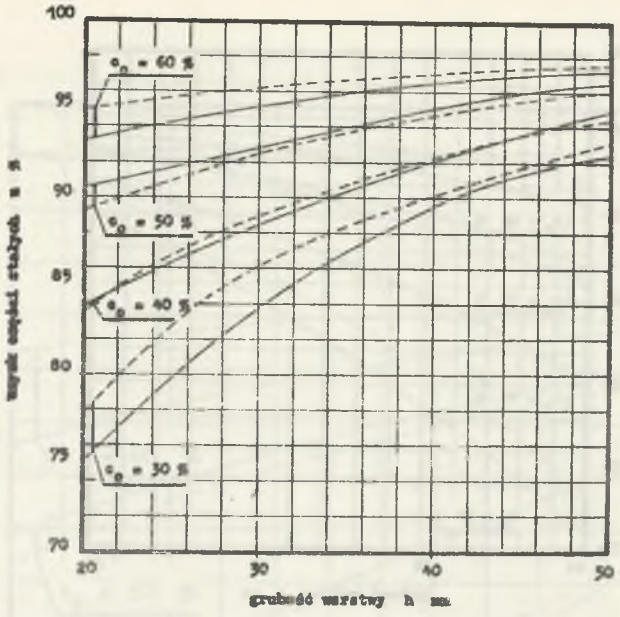
Rys. 7.2-7. Zmiana uzysku części stałych otrzymana z pomiarów (linia ciągła) i wg funkcji $u = 94{,}1 + (-1861{,}9 + 29{,}12\ c_o)e^{-0{,}039\ h - 2{,}784}$ (linia przerywana) dla mułu B po $t = 21$ s



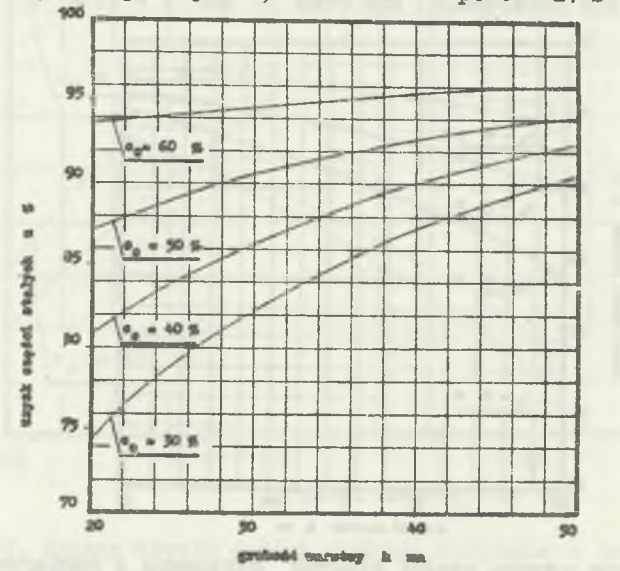
Rys. 7.2-8. Zmiana uzysku części stałych otrzymana z pomiarów (linia ciągła) i wg funkcji $u = 96{,}9 + (-1847{,}1 + 27{,}68\ c_o)e^{-0{,}041\ h - 2{,}946}$ (linia przerywana) dla mułu C po $t = 21$ s



Rys. 7.2-9. Zmiana uzysku części stałych otrzymana z pomiarów (linia ciągła) i wg funkcji $u = 99{,}2 + (-2070{,}8 + 31{,}23\ c_o)e^{-0{,}042\ h - 3{,}147}$ (linia przerywana) dla mułu D po $t = 21$ s



Rys. 7.2-10. Zmiana uzysku części stałych otrzymana z pomiarów (linia ciagła) i wg funkcji $u = 98,5 + (-284,7 + 4,319\ c_o)e^{-0,046h} - 1,1$ (linia przerywana) dla mułu E po t = 21 s



Rys. 7.2-11. Zmiana uzysku części stałych wg funkcji $u = 97,1 + (-1232 + 18,85\ c_o)e^{-0,043\ h} - 2,515$ dla mułu A, B, C, D i E łącznie

Odchylenia poszczególnych krzywych od zależności stwierdzonych doświadczalnie, wynikają z pominięcia w obliczeniach czynnika czasu odwadniania t, co daje stosunkowo niewielkie różnice. Z możliwości lepszego przybliżenia tej funkcji nie skorzystano, ze względu na jej znacznie bardziej skomplikowaną postać.

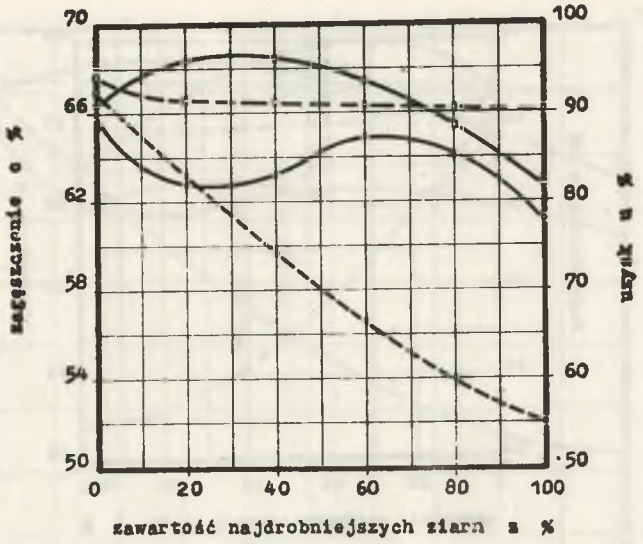
8. Odwadnianie zawiesin jako funkcja składu ziarnowego

Z przeprowadzonych doświadczeń nad wpływem na odwadnianie amplitudy i częstości wahań, zagęszczenia nadawy i grubości warstwy oraz czasu wynika, że rezultaty pomiarów zagęszczeń końcowych i uzysków przy zachowaniu stałych poziomów tych czynników wykazują różne wartości. Zasadniczym czynnikiem kształtującym te różnice jest skład ziarnowy części stałych, choć wpływ innych własności fizycznych i fizykochemicznych jest prawdopodobny.

Celem przebadania wpływu składu ziarnowego na odwadnianie, przeprowadzono serie doświadczeń z mułami A, B, C, D i E w klasach 1-0 oraz 1-0,1 mm przy różnych udziałach najdrobniejszych ziarn. Klasę 1-0,1mm stosowano dlatego, aby zmniejszyć wpływ ziarn najdrobniejszych i zawierających największe ilości substancji mineralnej. Wyniki doświadczeń zilustrowano graficznie na rys. 8-1 do 5.

Charakterystyczny dla wszystkich badanych przypadków jest podobny przebieg zmiany zagęszczenia mułów w klasie 1-0 mm oraz odmienna w stosunku do niego zależność występująca dla zbioru 1-0,1 mm - również analogiczna dla poszczególnych mułów.

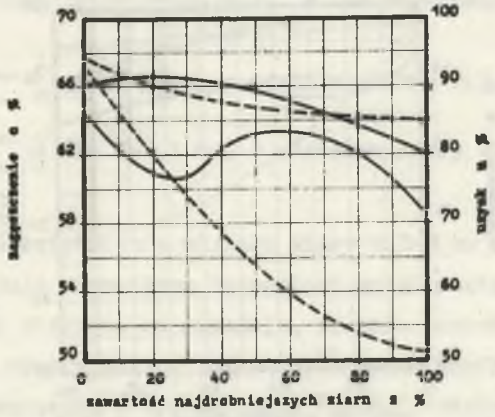
Interpretacja fizyczna przebiegu zmiany zagęszczenia materiału odwodnionego otrzymanego z nadawy w klasie 1-0 mm jest następująca: Zbiór ziarn 1-0,3 mm charakteryzuje się tym,że posiada duże przestrzenie międzyziarnowe, z których woda zostaje wytrząśnięta dlatego, ponieważ siła bezwładności przewyższa siły przylegania wody do ziarn; z tego powodu stwierdza się wysoką wartość zagęszczenia tej klasy - co widać na rys. 8-1 do 5. W przypadku, kiedy w skład nadawy wchodzi kilka do około 30% klasy 0,3-0 mm, przestrzenie pomiędzy ziarnami większymi zostają w niewielkiej części wypełnione ziarnami mniejszymi z tym, że woda otaczająca je zostaje tylko w pewnym stopniu usunięta podczas drgań i dlatego stwierdza się spadek odwodnienia, tzn. niższe za-



Rys. 8-1. Wpływ składu ziarnowego mułu A na zagęszczenie końcowe c i uzysk u

—o— c
—o— u dla 1-0 mm, z udziałem klasy 0,3-0 mm

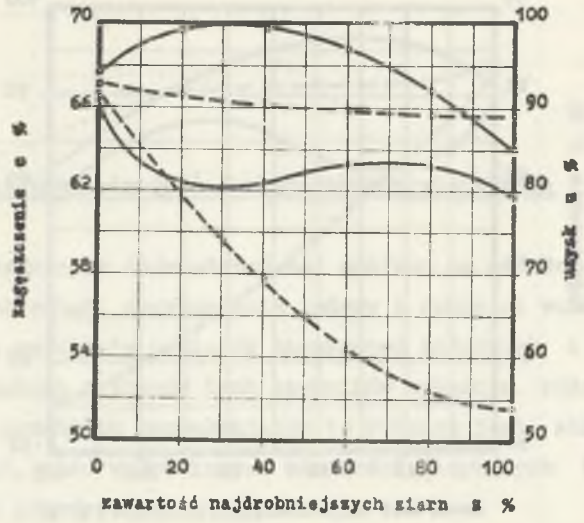
—□— c
—□— u dla 1-0,1 mm, z udziałem klasy 0,3-0,1 mm



Rys. 8-2. Wpływ składu ziarnowego mułu B na zagęszczenie końcowe c i uzysk u

—o— c
—o— u dla 1-0 mm, z udziałem klasy 0,3-0 mm

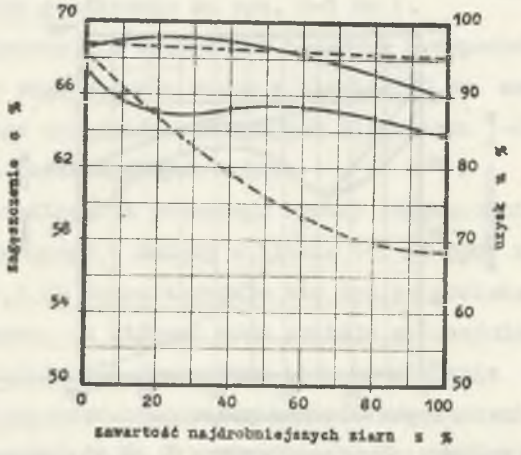
—□— c
—□— u dla 1-0,1 mm, z udziałem klasy 0,3-0,1 mm



Rys. 8-3. Wpływ składu ziarnowego mułu C na zagęszczenie końcowe c i uzysk u

—o— c
—o— u dla 1-0 mm, z udziałem klasy 0,3-0 mm

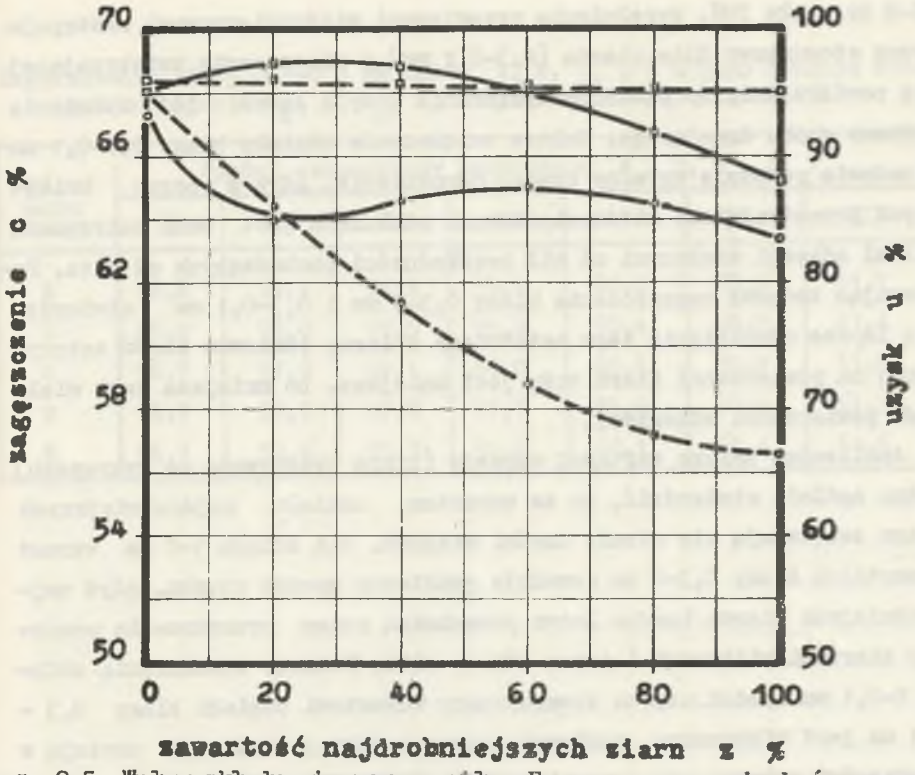
—□— c
—□— u dla 1-0,1 mm, z udziałem klasy 0,3-0,1 mm



Rys. 8-4. Wpływ składu ziarnowego mułu D na zagęszczenie końcowe c i uzysk u

—o— c
—o— u dla 1-0 mm, z udziałem klasy 0,3-0 mm

—□— c
—□— u dla 1-0,1 mm, z udziałem klasy 0,3-0,1 mm



Rys. 8-5. Wpływ składu ziarnowego mułu E na zagęszczenie końcowe c i uzysk u

——o—— c
——o—— u dla 1-0 mm, z udziałem klasy 0,3-0 mm

——□—— c
——□—— u dla 1-0,1 mm, z udziałem klasy 0,3-0,1 mm

gęszczenie. Dalsze zwiększenie udziału klasy 0,3-0 mm w granicach około 30 do 60% powoduje stosunkowo "szczelne" wypełnienie przestrzeni pomiędzy większymi ziarnami co powoduje, że woda pozostaje tylko na powierzchni ziarn oraz w makro i mikroszczelinach skutkiem czego jest podwyższenie zagęszczenia w tym zakresie składu ziarnowego. Zbiory ziarn o udziale klasy 0,3-0 mm ponad około 60% wykazują spadek zagęszczenia, ponieważ powierzchnia właściwa ziarn rośnie gwałtownie,a wraz z nią ilość zaadsorbowanej wody trudnej do mechanicznego usunięcia.

Odmiennie od przedstawionej przebiega zmiana zagęszczenia mułu w klasie 1-0,1 mm. W przypadku gdy udział klasy 0,3-0,1 mm zwiększa się

od 0 do około 30%, wypełnienie przestrzeni międzyziarnowych następuje przez stosunkowo duże ziarna (0,3-0,1 mm) o nieznacznie zwiększającej się powierzchni, co powoduje wyciskanie wody i łatwe jej usunięcie podczas ruchu drgającego. Dalsze zwiększenie udziału klasy 0,3-0,1 mm w nadawie powoduje wyraźny spadek odwodnienia, gdyż w coraz mniejszych przestrzeniach międzyziarnowych zamknięta jest woda zatrzymana siłami adhezji większymi od sił bezwładności pochodzących od sita. Porównując końcowe zagęszczenie klasy 0,3-0 mm i 0,3-0,1 mm stwierdza się lepsze odwodnienie tego ostatniego zbioru, ponieważ ilość zatrzymanej na powierzchni ziarn wody jest mniejsza, bo mniejsza jest wielkość powierzchni właściwej.

Analizując zmianę wartości uzysków (linia przerywana na wykresach) można ogólnie stwierdzić, że ze wzrostem udziału najdrobniejszych ziarn zwiększają się straty części stałych. Dla zbioru 1-0 mm wzrost zawartości klasy 0,3-0 mm powoduje gwałtowny spadek uzysku, gdyż najdrobniejsze ziarna bardzo łatwo przechodzą przez przestrzenie pomiędzy ziarnami większymi i przez otwory sita. Podczas odwadniania zbioru 1-0,1 mm spadek uzysku towarzyszący wzrostowi udziału klasy 0,3 - 0,1 mm jest nieznaczny, ponieważ ziarna o takiej wielkości zostają w większości zatrzymane w przestrzeniach międzyziarnowych.

Obszerne badania nad wpływem składu ziarnowego na rezultaty odwadniania wykazały, że przy określonym stałym poziomie czynników pozostałych, występuje przesunięcie krzywych o podobnym przebiegu w górę lub w dół zależnie od tego czy najważniejsze czynniki jak s_o, n, c_o, t przyjmują wartości wyższe, czy też niższe. Stwierdzono również, że dla identycznych udziałów określonych klas ziarnowych różnych mułów otrzymano inne wartości zagęszczeń i uzysków; przyczyną zróżnicowania są głównie różne składy ziarnowe klas 1-0,3 mm oraz 0,3-0 lub 0,3 - 0,1 mm. Łatwo wykazać, że używając do badań różnych mułów o prawie identycznej wielkości ziarn (0,5-0,3 mm), otrzymuje się w tych samych warunkach pomiaru odwodnienia prawie identyczne wartości zagęszczeń i uzysków co ilustruje tabl. 8-2; różnice mieszczą się w granicach błędu pomiarów. Wynika stąd, że inne własności fizyczne lub fizykochemiczne prawie monodyspersyjnego zbioru ziarn nie odgrywają istotnej roli w procesie odwadniania na sicie wprawionym w ruch drgający.

Tablica 8-2

Zagęszczenie klasy 0,5-0,3 mm mułów A, B, C, D i E jako funkcja różnych kombinacji s_o, n, c_o, h, t wyrażonych symbolami I-VII

Rodzaj mułu	Symbol oznaczający kombinację s_o, n, c_o, h, t						
	I	II	III	IV	V	VI	VII
A	56,6	58,1	59,3	59,9	60,2	60,8	61,7
B	56,8	58,0	59,5	59,8	60,4	60,7	61,4
C	56,7	57,9	59,1	60,0	60,5	60,9	61,8
D	56,9	58,2	59,4	59,7	59,9	60,6	61,3
E	56,7	58,0	59,3	59,8	60,1	60,4	61,6

9. Podsumowanie

Obok interpretacji fizycznej i matematycznego opisu zależności zachodzących podczas procesu odwadniania wieloskładnikowych i polidyspersyjnych mułów węglowych, celowym jest przeprowadzenie analizy zjawiska o otrzymanych rezultatach doświadczeń z punktu widzenia mechanizmu zatrzymywania wody w zbiorze ziarn.

Wykorzystanie lub adaptacja wzorów na prędkość przepływu cieczy przez warstwę porowatą (wzory 1.1-16 do 18 i 21) nie jest możliwe przede wszystkim z powodu trudności w znalezieniu odpowiedniego równoważnika różnicy ciśnień po obydwu stronach warstwy - co jest szczególnie dyskusyjne w ruchu drgającym. Duży problem stanowi również poprawne określenie wielkości powierzchni kinetycznej dla badanych zbiorów nie zdefiniowanych geometrycznie ziarn, ze względu na bardzo szeroką klasę ziarnową i względnie wysoki udział dużych ziarn, których powierzchnie trudno obliczyć z wystarczającą dokładnością, a jeszcze trudniej zmierzyć.

Obliczenie wartości sił kapilarnych (wzór 1.2-4) i granicznych (wzór 1.2-5) występujących w mieszaninach cieczy i wieloskładnikowych oraz polidyspersyjnych zbiorów ziarn nie jest możliwe z powodu różnych kątów zwilżania występujących przy poszczególnych składnikach, a także ze względu na poważnie zróżnicowane wielkości i kształty ziarn całego zbioru; tak więc nie jest możliwe określenie analogu siły spójności (jak na rys. 1.2-3) ani też jego odpowiednika - co wykonano dla modelu dwóch zetkniętych monolitycznych jednoskładnikowych kul. Z tych samych powodów nie udało się teoretycznie określić ilości wody zamkniętej przez polidyspersyjny i wieloskładnikowy zbiór ziarn analogicznie jak to zrobiono dla układu modelowego opisanego na rys.1.2-4.

Analizując pewne przypadki kontaktu ziarn z cieczą zilustrowane na rys. 1.2-5 łatwo stwierdzić, że dla kul monodyspersyjnych występuje

wiele kombinacji układów geometrycznych (bo aż 10), a dla kul o różnych średnicach takich układów istnieją setki; niecelowe więc byłoby poszukiwanie równań określających udział wody w poszczególnych zbiorach ziarn tym bardziej, że w praktyce spotykamy się z ziarnami o kształtach trudnych do zdefiniowania, jak to widać na rys. 1.2-6. Z podanych przyczyn konieczne było skierowanie uwagi na muły przemysłowe pod kątem ich odwodnienia, bez możliwości rozważania mechanizmu wiązania wody i wartości sił występujących w obrębie tzw. mostków wodnych.

Negatywnie należy również ocenić możliwość adaptacji wzoru (1.2-21) przeznaczonego do obliczania minimalnej zawartości wody w zbiorze ziarn dla przemysłowych mułów węglowych; przyczyna leży w trudności prawidłowego określenia wielkości powierzchni właściwej ziarn i w niemożliwości zastąpienia szerokiego zakresu wielkości ziarn odpowiednią wartością $D_{śr}$. Możliwość uzyskania zadowalających rezultatów obliczeń jest ograniczona różnorodnością substancji mułowej w tym także iłów.

Szczególnie znikome są możliwości obliczenia końcowej zawartości wilgoci w zbiorach ziarn podlegających podrzutowi np. na przesiewaczu; wiadomo, że podczas ruchu sita i materiału na nim następuje przemieszczanie się ziarn względem siebie oraz ich wzajemne upakowywanie, co powoduje nieustanne zmiany układu geometrycznego ziarn w otoczeniu płynu. Nadto, ciecz hamuje ruch ziarn względem siebie i sita, ponieważ siły spójności znacznie przekraczają oddziaływania dynamiczne pochodzące od przesiewacza. Nie bez znaczenia pozostaje również wzrost wartości wypełnienia podczas drgań w stosunku do przypadków, gdy ziarna są luźno usypane co zilustrowano na przykładzie układu dwudyspersyjnego na rys. 1.2-8. W świetle przedstawionej zależności nasuwa się wniosek, że konieczne jest uwzględnienie we wszelkich rozważaniach także zmiany porowatości warstwy wywołanej ruchem drgającym; należy przy tym pamiętać o wpływie czasu drgań na stabilizację wartości wypełnienia.

Ścisły związek z omawianymi czynnikami ma również liczba podrzutów warstwy na sicie, co jak wynika z rys. 1.2-9 ma pewne znaczenie dla

zmiany porowatości warstwy, tzn. także dla mechanicznego wyciskania wody z przestrzeni międzyziarnowych; przebieg tej zmiany uzależniony jest w poważnym stopniu od składu ziarnowego, co łatwo zauważyć na przykładzie rys. 1.2-10 i 12.

Reasumując można stwierdzić, że niezwykle skomplikowane zależności zachodzące pomiędzy ważniejszymi czynnikami kształtującymi proces odwadniania mułów przemysłowych na sitach, czynią bezskuteczne - starania ujęcia tych prawidłowości w postać funkcji wyłącznie z teoretycznego punktu widzenia. Z tego powodu najważniejsze zależności ujęto w formie wzorów empirycznych.

Kierując się informacjami zestawionymi w rozdziale 1.2, rozważono na ich tle podstawowe kryteria ruchu materiału na sicie, celem wybrania najwłaściwszych warunków doświadczeń. W takim ujęciu poddano krytycznej analizie tory ruchu nawet pojedynczego ziarna (wg rys. 1.3-1 i 2); jeżeli obserwuje się ruch polidyspersyjnego i wieloskładnikowego zawodnionego zbioru drobnych ziarn (np. poniżej 1 mm) wtedy można zauważyć, że tory ruchu warstwy i jej elementów na sicie są poważnie zniekształcone w stosunku do trajektorii obliczonej. Wspomniana deformacja polega na znacznym zmniejszeniu wysokości toru lotu ziarn, co spowodowane jest wzajemnym oddziaływaniem ich na siebie oraz udziałem wody, która "wiąże" ziarna ze sobą utrudniając im ruch względem siebie. W trakcie obserwacji poszczególnych faz odwadniania można zauważyć, że podczas wprowadzania zawiesiny na sito następuje prawie natychmiastowe przepłynięcie przeważającej objętości cieczy wraz z najdrobniejszymi ziarnami, natomiast w następnych sekundach trwania procesu obciekania ubytek wody znad sita jest niewielki - co potwierdziły w całej rozciągłości badania przeprowadzone na wszystkich pięciu mułach.

Bardzo słusznym okazał się wybór wartości amplitud i częstości wahań do przeprowadzenia doświadczeń, który poprzedzono obszernymi badaniami pilotującymi uwzględniając zależności pokazane na rys. 1.3-3, 4 i 5. Eksperymentalnie ustalono, że dolna wartość amplitudy jest wyraźnie ograniczona i wynosi około 2,5 mm; przy zbyt małych jej wartościach razem z ziarnami drga woda, która nawet w postaci kropel nie odrywa się od sita. Z tego powodu wszystkie doświadczenia poza pilo-

tującymi przeprowadzono przy amplitudach wyraźnie większych od wartości granicznej. Pomimo, że stwierdzenie to jest sprzeczne ze znaną zasadą "stosowania niskich wartości amplitud dla małych ziarn", to jednak w przypadkach odwadniania na przesiewaczach powinny być zachowane warunki nakreślone w niniejszej pracy, a więc i także znacznie wyższe wskaźniki podrzutu aniżeli w operacjach przesiewania.

Analizując wpływ obciążenia jednostkowej powierzchni sita na rezultaty odwadniania, przeprowadzono próby ujęcia efektu odwodnienia jako funkcji grubości warstwy lub zależnego od niej oporu właściwego filtracji; jeżeli dla statycznego obciekania zbioru ziarn wypełnionego cieczą podanie takiej zależności jest możliwe, to dla warstwy podrzucanej nie udało się ująć omawianą prawidłowość nawet przy pomocy współczynnika zależnego od wskaźnika podrzutu. Przyczyną tak dużych trudności jest zmiana wypełnienia warstwy przy różnych jej grubościach i składach ziarnowych oraz amplitudach i częstościach wahań.

Oddzielne miejsce w rozważaniach nad odwadnianiem mułów i odzyskiwaniem części stałych zajmuje wielkość otworów i rodzaj sita - co wynika z rys. 1.3-6 i 8. Po zakończeniu zasadniczych serii doświadczeń nad wpływem amplitudy i częstości wahań oraz czasu, zagęszczenia początkowego i grubości warstwy materiału na sicie na rezultaty odwadniania, przeprowadzono wyrywkowe próby sprawdzenia stwierdzonych zależności przy użyciu innych sit (rys. 1.3-8 i, j) w stosunku do siatki z fosforobrązu (rys. 1.3-8a). Doświadczenia wykazały, że przebieg zmiany zagęszczenia i uzysku nie ulega zasadniczej zmianie, choć wartości bezwzględne różnią się trochę, co wynika z nieco innej przepuszczalności sita i oporów ruchu stawianych przez nie. Można oczekiwać, że przy stosowaniu sit o specjalnych kształtach otworów może wystąpić istotna zmiana przebiegu zależności zagęszczenia i uzysku od badanych czynników (s_o, n, t, h, c_o), ponieważ ukształtowanie górnej powierzchni sita wpływa na zdolność rozdzielczą fazy stałej od ciekłej. Sito o profilu, jak np. na rys. 1.3-8g, działa w ten sposób, że górna część otworu zostaje wypełniona ziarnami pomiędzy którymi a sitem przedostaje się woda do dolnej części otworu tworząc dużą kroplę; podczas drgań o dostatecznie dużej amplitudzie i odpowiednio wysokim

wskaźniku podrzutu, kropla dzięki dużej masie zostaje oderwana od sita, a przez to zasysa do otworu nową porcję wody z warstwy mułu i tak aż do usunięcia całej ilości wody, która da się uwolnić na drodze mechanicznej.

Najistotniejsze zależności matematyczne i prawidłowości stwierdzone podczas badań prowadzonych z mułami A, B, C, D, E nie wymagają omówienia w tym miejscu i dlatego podano je w formie wniosków w następnym rozdziale.

10. Wnioski

Na podstawie analizy wyników i obserwacji przeprowadzonych badań nad odwadnianiem drobnoziarnistych zawiesin mułowych i odzyskiwaniem części stałych można wyciągnąć pewne ogólne wnioski:

1. Zależność pomiędzy zagęszczeniem mułu odwodnionego a amplitudą i częstością wahań sita występuje i została podana w postaci funkcji.

2. Zależność pomiędzy uzyskiem części stałych w mule odwodnionym a amplitudą i częstością wahań również zachodzi i została podana w postaci funkcji.

3. Istnieje możliwość zastąpienia w ocenie procesu amplitudy i częstości wahań sita wskaźnikiem podrzutu, którego wpływ na zagęszczenie odwadnianego mułu oraz na uzysk części stałych został podany jako zależności funkcyjne.

4. Najważniejszymi czynnikami technologicznymi procesu odwadniania mułów i odzyskiwania części stałych są grubość warstwy i zagęszczenie nadawy, co opisano odpowiednimi funkcjami.

5. Przy konstruowaniu i prowadzeniu ruchu przesiewaczy odwadniających należy zwrócić szczególną uwagę na czas przebywania materiału na sicie, gdyż rola tego czynnika jest znacznie mniejsza niż dotąd przypuszczano.

6. Duże znaczenie w procesie odwadniania ma skład ziarnowy - co należy uwzględnić przy projektowaniu procesów technologicznych w zakładach przeróbczych; ważnym jest zapewnienie odpowiedniego udziału tzw. większych ziarn w nadawie na przesiewacze odwadniające, co wynika z odpowiednich rezultatów doświadczeń.

7. Podane na podstawie badań wzory empiryczne mogą być wykorzystane zarówno przy konstruowaniu przesiewaczy odwadniających jak i przy projektowaniu technologii procesów odwadniania na tych urządzeniach oraz przy kontroli tych procesów w zakładach już pracujących.

8. Wyniki pracy wyłaniają również dalsze problemy, których rozwiązanie przyczyni się do pewnego obniżenia końcowej zawartości wilgoci w mułach odwodnionych; na szczególną uwagę zasługuje skoncentrowanie przyszłych badań nad odwadnianiem na przesiewaczach ultraszybkich o bardzo wysokich wskaźnikach podrzutu.

LITERATURA

1. R. Andrzejewski: Praca PAN 1968, nr T-187, Zakład Bad. Nauk. GOP Zabrze.
2. R. Andrzejewski, W. Gutowski: Fizyczne własności pyłów. Wyd. Śląsk 1968, s. 17-20, 277-311.
3. A. Ardouin: Vibro-Sieb zur Absiebung von feuchtem und klebrigem Haufwerk, Aufber. - T. 1967, nr 11, s. 606.
4. S.P. Artjuszin: Sbornik zadacz po obogaszczeniju uglja, Izd. II, Njedra 1968, s. 93-95.
5. D. Bachmann: Bewegungsvorgänge in Schwingmühlen mit trockener Mahlkörperfüllung, Verfahrenstechnik ZVDI, Beiheft, 1940 s.43-55.
6. W. Batel: Vorausberechnung der Restfeuchtigheit bei der mechanischen Flüssigkeitsabtrennung, Chem. - Ing. - Techn., 1955, nr 8/9 s. 497-501.
7. W. Batel: Vorgänge bei der mechanischen Entwässerung, Chem.-Ing.-Techn., 1954, nr 8/9, s. 497-502.
8. W. Batel: Neue Erkenntnisse über Siebvorgänge, VDJ-Z., 1955, nr 13, s. 393-400, nr 14, s. 417-424.
9. A. Battaglia: Technika wodno-mułowa zakładów przeróbki mechanicznej węgla, Seminarium J.M.Z.P.W. - Mysłowice, Z. 373, s. 11-21, 37-39.
10. A. Battaglia: Odwadnianie produktów wzbogacania i obiegu wodne płuczek, Wyd. II, WGH, 1963, s. 30.
11. A. Battaglia, T. Banaszewski: Analiza teoretyczna nasycania się obiegu wodnego zamkniętego, Archiwum Górnictwa 1965, Z. 1, s. 85.
12. C. Bernhardt: Untersuchungen zur Reproduzierbarkeit von Hand und Maschinenprüfsiebung, Bergakademie, 1966, nr 3, s. 157.
13. E. Blass: Geometrische und strömungstechnische Untersuchungen an Drahtgeweben, Chem.-Ing.-Techn., 1964, nr 7, s. 747-758.
14. N.G. Boczarow, A.W. Czernowa, O.M. Miljutin: Promyszlennyje ispytanija obezwożiwajuszczych rezenansnych grochotow, GRL-71 i 72, Ugol, 1966, nr 11, s. 67-70.
15. J. Bodziony: Mathematische Erfassung des Siebvorganges, Bergakademie, 1962, nr 2, s. 90-101.

16. W. Bongert: Elektromagnetische Vibrations - Entwässerungssiebe, Aufber. - T., 1967, nr 11, s. 599-600.

17. S. Böttcher: Beitrag zur Klärung der Gutbewegung auf Schwingrinnen, Fördern und Heben, 1958, nr 3, s. 127-131, nr 4, s. 235-240, nr 5, s. 307-315.

18. J.N. Bronsztejn, K.A. Siemiendiajew: Matematyka, Poradnik encyklopedyczny, PWN, 1970, s. 816-817, 824-829.

19. L. Brosch, A. Lang, W. Ternette: Transduktorische Steuerung und Reglung von Vibratoren, DK 621.375.3-52/ -53: 534.232, s. 3-11.

20. G.G. Brown: Operacje jednostkowe, PWT, 1960, s. 234-242, 32.

21. J. Ciborowski: Podstawy inżynierii chemicznej, WNT, 1965, s. 142.

22. A. Czubak: Przenośniki wibracyjne, Wyd. Śląsk, 1964, s. 27.

23. B. Dierijagin: Dokł. AN ZSRR, 1946, t. 53, s. 623.

24. Die Aufbereitungs- und Verfahrenstechnik auf den Industrie - Ausstellungen, Aufber. - T., 1969, nr 7, s. 371-375.

25. J. Dietrych: Teoria i budowa przesiewaczy, WGH, 1962, s. 61-62, 249, 73.

26. N.W. Djabin, A.P. Diomidow, L.F. Fominych: Wljanie skorosti peremieszczenija prosewajennych czastic po setkie na efektiwnost klasifikacji, Gornyj Żurnał, 1967, nr 9, s. 148.

27. H. Dörhoff, J. Udert: Siebboden für Schwingsiebe, Aufber. - T., 1963, nr 11, s. 524.

28. N.P. Dörner: Die Entwicklung der Schallsiebmaschinen, Aufber.-T., 1968, nr 6, s. 281-284.

29. Duenero Gummisiebe, Trelleborg, Schweden, 1967, s. 23.

30. J. Elder: Achwieving Top Performance From Vibrating Screens, Coal Age, 1966, nr 3, s. 62-63.

31. J. Elder: The care and feeding of screens, Engineering and Mining Journal, 1966, nr 1, s. 100-101.

32. G. Erlenstädt: Impulssteuerung bei elektromagnetisch angetriebenen Sieben, Aufber. - T., 1967, nr 11, s. 626-629.

33. G. Erlenstädt: Siebung feuchter Produkte durch Siebmaschinen mit Zusatzeinrichtung, Aufber. - T., 1970, nr 7, s. 418.

34. H. Freitag: Entwässerung von Kunststoffgranulat, Aufber. - T., 1967, nr 11, s. 596-597.

35. H. Freitag: Dimensionierung von Vibrationssieben, Aufber. - T., 1963, nr 11, s. 469.

36. N. Fuhrmann, M. Korn: Feinheitsbestimmung von Stauben im Bereich kleiner 40 µm mittels Nasssiebung, Aufber. - Techn., 1968, nr 6, s. 279.

37. R.A. Gaincewa, W.S. Kaminskij, W.N. Skworcowa, D.I. Szteinbert, M.T. Gubanow, W.G. Inkitin: Sozdanije i issledowanije nowych filtrowalnych peregorodok dla obezwożiwanija ugolnoj mjełoczi, Teoreticzeskije i eksperymentalnyje issledowanija obłast obezwożiwanija ugolnoj mjełoczi, Akad. Nauk SSSR, Nauka, 1969, s. 93-104.

38. W.A. Gray: The Packing of solid particles. London: Chapmann and Hall, 1968, s. 43-78.

39. F. Grünwald: Der elektromagnetische Vibrator, ein Motorloser Antrieb, AEG - Sonderdruck, X, 1954, s. 1-8.

40. R.S. Gutner, B.W. Owczyński: Matematyczne opracowywanie wyników doświadczeń, PWN, 1967, s. 152-154.

41. W. Gutowski: Praca PAN 1968, Nr T-192, Zakład Bad. Nauk. GOP Zabrze.

42. J.H. Healy, A.J. Carlson, M.L. Hovland, G.M. Marincel: Erie Mining Co. Patents New Method For Screening Ores in Very Fine Size Ranges, Mining Engineering, 1967, nr 4, s. 67, 69.

43. W. Hentzschel: Eine Untersuchung der Möglichkeiten der Erfassung des Kornformaufbaues von Schuttgütern, Freib. Forsch. - H. 1957, A 59, s. 96-108.

44. R. Herczyński: Archiwum Mechaniki Stosowanej 1963, nr 6, s. 729.

45. P. John: Zur dynamischen Entwässerung mittlerer bis feiner Körnungen, Aufber. - T., 1967, nr 11, s. 615-625.

46. P. John: Zur Verfahrenstechnik der Feinstkornsiebung, Aufber. - T., 1963, nr 11, s. 497-501.

47. A. Jowett: Assessment of screening efficiency formulae, Colliery Engineering, 1963, nr 10, s. 426, rys. 2.

48. H. Klockhaus: Fördergeschwindigkeiten von Schwingrinnen und Schwingsiebien, Erdöl und Kohle, 1952, nr 8, s. 493-495.

49. W. Kluge: Neuzeitliche Siebmaschinen für die Aufbereitung, Erdöl und Kohle, 1951, s. 705-711.

50. J. Kozeny: Akad. Wiss. Wien, Mathem. t. 136, IIa, 1927, s. 271.

51. F. Kreller: Über die Feinstabsiebung von trockenen Gekörnen, Suspensionen und Zähflüssigkeiten, Aufber. - Techn., 1968, nr 3, s. 107-108.

52. H. Krupp, G. Sandstede, K. Schramm: Zur Physik des Haftens fester Körper, Chemie - Ing. - Techn., 1960, nr 2, s. 99-105.

53. H. Krupp: Haftung kleiner Feststoffteilchen an Festkörperoberflächen, Chemie - Ing. - Techn., 1967, H, 5/6, s. 374.

54. H. Lehmann: Siebböden und Aufbereitungsanlagen, 1958, s. 10-48, 58-70.

55. A.T. Litwak, W.N. Poturajew, F.J. Markowskij: Rezonansnyj grochot dla obezwożiwanija ugolnogo szlama, Koks i Chimija, 1960, nr 5, s. 18-21.

56. Low - Head Horizontal Vibrating Screen, Allis-Chalmers USA, 1968, s. 9, 13.

57. H. Luther, O. Abel, K. Rittner, M. Gieseler, H.J. Schultz: Über den Einfluss von Formkörpern unterschiedlicher Stückgrösse und Gestalt auf den Strömungswiderstand von Schüttungen, Chem. - Ing.-Techn., 1971, nr 11, s. 658-666.

58. J. Maginot: Note de synthese concentrant le criblage a sec des charbons bruts humides, Charbonnages de France, Dokuments Techniques, nr 1-1965, s. 79-85.

59. G.L. Majdukow: Kriwolinijnyje grochoty w ugolnoj promyszlennosti Njedra, 1968, s. 29.

60. W. Mayer: Allgemeine Grundlagen der T-Kurven, Aufber. - T., 1967, nr 8, s. 436, 437. Berechnung des neuen Trennschärfe - Kennwertes aus den Teilungszahlen, Aufber. - T., 1971, nr 2, s. 82-90, nr 4, s. 203-211.

61. A. Meinel, H. Schubert: Zu den Grundlagen der Feinsiebung, Aufber. - Technik, 1971, nr 3, s. 129-130.

62. T. Mielecki: Węgiel. Wiadomości o własnościach i badaniu, WGH, 1962, s. 61-65.

63. P. Moiset, H. Heemskerk: Untersuchungen an einem Eindeckschwingsieb mit Exzenterantrieb als Hängekonstruktion, Aufber. - Technik, 1967, nr 3, s. 146-150.

64. O. Molerus, M.H. Pahl, H. Rumpf: Die Porositätsfunktion in empirischen Gleichungen für den Durchströmungswiderstand im Bereich $Re \leqslant 1$, Chem. - Ing. - Techn., 1971, nr 6, s. 376-378.

65. W.W. Nalimow, N.A. Czernowa: Statystyczne metody planowania doświadczeń ekstremalnych, WNT, 1967, s. 5, 70, 84.

66. J. Nawrocki: Przyczynek do teorii prędkości materiału na sicie przesiewacza, Zeszyty Naukowe Pol. Śl., Górnictwo, 1962, nr 71, s. 23-29.

67. J. Nawrocki; D. Constantin, J. Pakleza: Udoskonalenia metody określania powierzchni sit, Zeszyty Naukowe Pol. Śl., Górnictwo, 1967, nr 186, s. 160-161.

68. J. Nawrocki: Przesiewacze materiału na sicie w zależności od jego długości, Zeszyty Naukowe Pol. Śl., Górnictwo 1968, nr 218, s.95.

69. J. Nawrocki: Empiryczna metoda określania powierzchni sit, Zeszyty Naukowe Pol. Śl., Górnictwo 1962, nr 71, s. 85.

70. New Dewatering Device, Journal of the Institute of Fuel, 1957, nr 5, s. 238.

71. W. Oktaba: Elementy statystyki matematycznej i metodyka doświadczalnictwa, PWN, 1966, s. 250.

72. D. Pečinka: Kennwerte linearschwingender Entwässerungssiebmaschinen, Aufber. - Technik, 1968, nr 6, s. 291.

73. Performated metals for screening, grading, cleaning, sorting, filtering etc. Harvey, London 1962, s. 4, 11, 16, 18, 19, 28.

74. W. Pietsch, H. Rumpf: Haftkraft, Kapillardruck, Flüssigkeitsvolumen und Grenzwinkel einer Flüssigkeitsbrücke zwischen zwei Kugeln Chemie - Ing. - Techn., 1967, H. 15, s. 885-893.

75. W. Plate, W. Simonis, E. Szantho: Beschreiben der Kornform von Schüttgütern durch Kenzahlen, Glückauf - Forsch. - H., 1970, H. 5, s. 266-274.

76. R. Polke: Haftung von Feststoffteilchen an Festkörperoberflächen bei milden Sinterbedingungen, Chemie - Ing. - Techn., 1968, H. 21/22, s. 1057-1060.

77. I.W. Ponomariew: Droblenje i grochoczenje uglej, Izd. II, Njedra 1970, s. 167, 170-171.

78. J.P. Reyter: Le tamisage de produits fins sur cribles Rhewum, Revue de L'Industrie Minerale - Mines, nr 3, 1971, s. 240-251.

79. D. Richter: Die Wahrscheindlichkeitsrechnung - ein Hilfsmittel zur Berechnung von Siebbelägen, Bergakademie, 1968, nr 3, s. 160-162.

80. E.O. Riedel: Siebmaschinen, Technische Mitteilungen, 1957, nr 11, s. 398.

81. E.O. Riedel: Die historische Entwicklung der Abscherklassierer, Aufber. - T., 1963, nr 11, s. 507-510.

82. H. Rittner: Hinweise über den praktischen Einsatz von Siebböden, Bergbautechnik, 1956, nr 2, s. 89, rys. 2.

83. B. Roga, L. Wnękowska: Analiza węgla i koksu, WNT, 1966, s. 96 - 107.

84. O. Rudolf, H. Hollenbeck: Erfahrungen mit Siebmaschinen in einer neuen modernen Kiesaufbereitungsanlage, Aufber. - T., 1967, nr 11 s. 603.

85. H. Rumpf: Agglomeration, Wyd. W.A. Knepper, New York,London 1961, s. 379-418.

86. H. Rumpf, W. Hermann: Eigenschaften, Bindungsmechanismen und Festigkeit von Agglomeraten, Aufbereitungs - Technik, 1970, nr 3, s. 119-123.

87. H. Rumpf, K.F. Ebert: Darstellung von Kornverteilung und Berechnung der spezifischen Oberfläche, Chem. - Ing. - Techn., 1964, nr 5, s. 523-537.

88. H. Rumpf, A.R. Gupte: Einflüsse der Porosität und Korngrössenverteilung im Widerstandsgesetz der Porenströmung, Chem. - Ing. - Techn., 1971, nr 6, s. 367-375.

89. H. Schauss: Problematik der Wassergehaltsbestimmung von Feststoffen, Chem. - Ing. - Techn., 1964, nr 5, s. 473-478.

90. L. Schlebusch: Dünnschichtsiebung und Systematik der direkterregten Siebe, Aufber. - Techn., 1969, nr 7, s. 342-343.

91. L. Schlebusch: Feuchtabsiebung, Aufber. - T., 1963, nr 11, s.476.

92. P. Schmidt: Die dichte Lagerung körniger Stoffe insbesondere im feindispersen Bereich, Aufbereituns-Technik, 1964, nr 7, s. 355-365.

93. P. Schmidt, W. Geisel: Untersuchungen über die Siebleistung im feindispersen Bereich, Aufber.-Techn., 1967, nr 11, s. 613.

94. W. Scharmer: Entwässerungs-Schwingsiebmaschinen in der Aufbereitungs- und Verfahrenstechnik, Aufber. - Techn., 1967, nr 11, s. 593-595.

95. H. Schröder: Einsatzmöglichkeiten der mittels Unwuchtmotoren angetriebenen Schall- und Vibrations-Siebmaschinen, Aufber. - T., 1969, nr 7, s. 349-353.

96. H. Schubert: Experimentelle Bestimmung von Haftkraft und Randwinkel am System einer Flüssigkeitsbrücke zwischen zwei Kugeln, Chemie - Ing. - Techn., 1968, H. 15, s. 747.

97. H. Schubert, A. Meinel: Entwicklungsstand auf dem Gebiete der Wurfsiebung, Bergakademie, 1968, nr 8, s. 484, 486.

98. H. Schumann: Zur Porosität und Durchlässigkeit von Sandsteinen, Erdöl und Kohle, 1952, nr 8, s. 474.

99. Screen Troubles Eliminated, Coal Age, 1955, nr 5, s. 102-103.

100. K. Seiler: Erfahrungen auf dem Gebiet der Sandentwässerung unter besonderer Berücksichtigung des Einsatzes von Schwingsiebschleudern in der Kalksteinaufbereitung, Aufber. - T., 1965, nr 8, s. 449-450.

101. Sieb- und Filtergewebe aus Kunststoff-Fäden, Aufber. - Technik, 1969, nr 7, s. 390-391.

102. W. Simonis, E. Rubrecht: Opimaler Körnungsaufbau von Kokskohle, Glückauf - Forsch. - H., 1965, 26, s. 301-308.

103. J. Steinkühl: Schall-Siebmaschinen, Ergebnisse und Erfahrungen, Aufber. - T., 1963, nr 11, s. 502-506.

104. F. Stoff: Betrachtung über den Einfluss der Schwingungsdaten auf den Siebvorgang, Aufber. - Technik, 1963, nr 11, s. 464.

105. G. Taege: Hydrofors - Sandaufbereitung mit Klassierung, Aufber.-T., 1967, nr 12, s. 689.

106. A.F. Taggart: Handbook of Mineral Dressing Ores and Industrial Minerals, John Wiley and Sons, New York 1948, Section 7-05, Fig. 5.

107. E. Tallarek: Entwicklung und Erfahrungen mit Gummisiebbelägen in verschiedenen Industriezweigen, Aufber. - T., 1967, nr 11. s.660.

108. P.N. Tankowskij: Mieżzawowskaja szkoła po obejmu opytom obezwożiwanija obogaszczennych uglej, Koks i chimija, 1960, nr 8, s. 18-21.

109. M.J. Turpin, M.R. Hamant: Criblage, Deschlammage, Dépoussierage Revue de L'Industrie Minerale, 1958, nr specj. L3, s. 28-34, 40.

110. W. Wehmeier: Untersuchungen zum Fördervorgang auf Schwingrinnen, Fördern und Heben, 1961, nr 4, s. 217-237, nr 5, s. 375-384.

111. A.F. Wehner: Die Möglichkeiten der Zweiwegklassierung zur Verarbeitung siebschwieriger Gütter, Aufber. - T., 1968, nr 6, s. 272.

112. A.F. Wehner: Siebverfahren und Siebböden mit neuartigem Einsatz von gummielastischen Werkstoffen, Aufber. - T., 1970, nr 7, s. 400.

113. J. Wessel: Siebmaschinen, Aufber. - T., 1963, nr 11, s. 452-453, 456-457, 459-460.

114. J. Wessel: Grundlagen des Siebens und Sichtens, Aufbereitungs-Technik, 1967, nr 4, s. 167-174.

115. J. Wessel, K. Müller, A. Brunold: Das freischwingende Sieb mit Wuchtmassenantrieb als Schwingungsproblem, Aufbereitung-Technik, 1966, nr 6, s. 324.

116. J. Wessel: Grundlagen des Siebens und Sichtens Aufbereitungs-Technik, 1967, nr 2, s. 57, rys. 6.

117. Węgiel kamienny. Oznaczanie wilgoci PN/G-04511.

118. K. Wolff: Siebböden aus Gummi und Chemiewerkstoffen, Aufbereitungs-Technik, 1967, nr 11, s. 650, 654.

S t r e s z c z e n i e

W pracy omówiono zagadnienia z zakresu odwadniania obciekowego na przesiewaczach. Scharakteryzowano przepływ cieczy przez warstwę porowatą i przeanalizowano zjawiska warunkujące zatrzymywanie płynów w zbiorach ziarn, celem określenia maksymalnego stopnia odwodnienia. Przedstawiono zasadnicze czynniki procesu odwadniania na przesiewaczach i opisano technikę doświadczeń i metodykę badań. Przeprowadzono ocenę stopnia istotności poszczególnych czynników kształtujących obciekanie cieczy i odzyskiwanie części stałych; najważniejsze czynniki przebadano doświadczalnie. Zależności zachodzące pomiędzy zagęszczeniem materiału odwodnionego oraz amplitudą i częstością wahań opisano odpowiednimi wzorami empirycznymi; również doświadczalnymi wzorami opisano wpływ tych czynników na uzysk części stałych. Przedstawiono także próbę wyrażenia wielkości wyjściowych procesu jako funkcji wskaźnika podrzutu określonego na podstawie amplitudy i częstości wahań. Scharakteryzowano i opisano wzorami empirycznymi wpływ zagęszczenia początkowego zawiesiny, grubości warstwy materiału na sicie oraz czasu odwadniania na zagęszczenie końcowe i uzysk części stałych w produkcie górnym schodzącym z przesiewacza. Obok matematycznego opisu stwierdzonych zależności podano również ich fizykalną interpretację.

ОБЕЗВОЖИВАНИЕ УГОЛЬНЫХ ШЛАМОВ НА ГРОХОТАХ ЛИНЕЙНОГО ДВИЖЕНИЯ

Р е з ю м е

В работе описаны вопросы из области обезвоживания стеканием на грохотах. Схарактеризовано прохождение жидкости через пористый слой и проанализированы явления, обуславливающие задерживание жидкостей в скоплениях зерен с целью определения максимальной степени обезвоживания. Представлены главные факторы процесса обезвеживания на грохотах и описаны техника опытов и методика исследований. Сделана оценка степени важности отдельных факторов, формирующих стекание жидкости и обратное получение твердых тел; главнейшие факторы исследолись опытным путем. Зависимость, выступающая между сгущением обезвоженного материала и амплитудой и частотой колебаний изображена при помощи соответствующих эмпирических формул; также при помощи экспериментальных формул показано влияние этих факторов на получение твердых тел. Показана тоже попытка выражения исходных величин процесса как функции коэффициента подброса, определенного на основании амплитуды и частоты колебаний. Схарактеризовано и изображено эмпирическими формулами влияние нагальной сгущенности взвешенных частиц, толщины слоя материала на сите а также времени обезвоживания на конечную сгущенность и получение твердых тел в верхнем продукте, сходящем с грохота. Наряду с математическим описанием установленных зависимостей подано также их физическое толкование.

DEWATERING OF COAL-MUDS BY MEANS OF A LINEAR SCREEN

S u m m a r y

In the paper some problems dealing with dripping dewatering on screens have been discussed. Liquids' flow through the porous layer has been characterized and some phenomena conditioning the stopping of liquids in grain collections were analized to determine the maximum degree of dewatering. The principal factors of dewatering by means of screens have been presented and a technique of experiments as well as the investigations methodology have been described. An evaluation of the most important factors forming the liquids dripping and the recovery of solid parts has been carried out. Most important factors were investigated in an experimental way. Dependencies between dewatered materials concentration and the amlitude as well as frequency of oscillations have been described by means of empirical formulae. The influence of these factors on the output of solid parts

has been also described by means of empirical formulae. An attempt of expressing output quantity of the process as the throw up indicator, determined on the basis of amplitude and frequency of oscillations has been also presented. The influence of initial suspension, thickness of the material, layer on the sieve and the time of dewatering on the final concentration and output of solid parts of the upper product getting off the screen have been characterized and described with empirical formulae. Besides a mathematical description of confirmed dependencies their physical interpretation has been given too.

KT 27

ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ
ukazują się w następujących seriach:

A. AUTOMATYKA
B. BUDOWNICTWO
Ch. CHEMIA
E. ELEKTRYKA
En. ENERGETYKA
G. GÓRNICTWO
H HUTNICTWO
IS. INŻYNIERIA SANITARNA
JO. JĘZYKI OBCE
MF. MATEMATYKA-FIZYKA
M. MECHANIKA
NS. NAUKI SPOŁECZNE

Dotychczas ukazały się następujące zeszyty
serii G:

Górnictwo z. 1, 1956 r., s. 134, zł 20,—
Górnictwo z. 2, 1959 r., s. 96, zł 17,10
Górnictwo z. 3, 1961 r., s. 130, zł 21,—
Górnictwo z. 4, 1962 r., s. 134, zł 10,95
Górnictwo z. 5, 1963 r., s. 158, zł 11,90
Górnictwo z. 6, 1963 r., s. 154, zł 8,50
Górnictwo z. 7, 1963 r., s. 129, zł 6,80
Górnictwo z. 8, 1964 r., s. 175, zł 10,20
Górnictwo z. 9, 1964 r., s. 133, zł 10,50
Górnictwo z. 10, 1964 r., s. 157, zł 8,75
Górnictwo z. 11, 1964 r., s. 221, zł 13,10
Górnictwo z. 12, 1964 r., s. 304, zł 15,20
Górnictwo z. 13, 1965 r., s. 145, zł 8,40
Górnictwo z. 14, 1965 r., s. 78, zł 5,—
Górnictwo z. 15, 1966 r., s. 79, zł 5,—
Górnictwo z. 16, 1966 r., s. 91, zł 7,—
Górnictwo z. 17, 1966 r., s. 113, zł 8,—
Górnictwo z. 18, 1966 r., s. 291, zł 16,—
Górnictwo z. 19, 1966 r., s. 150, zł 11,—
Górnictwo z. 20, 1966 r., s. 84, zł 5,—
Górnictwo z. 21, 1967 r., s. 270, zł 17,—
Górnictwo z. 22, 1967 r., s. 196, zł 12,—
Górnictwo z. 23, 1967 r., s. 69, zł 4,—
Górnictwo z. 25, 1967 r.. s. 96, zł 5,—
Górnictwo z. 26, 1968 r., s. 137, zł 10,—
Górnictwo z. 27, 1967 r., s. 378, zł 24,—
Górnictwo z. 28, 1968 r., s. 185, zł 11,—
Górnictwo z. 29, 1968 r., s. 161, zł 9,—
Górnictwo z. 30, 1968 r., s. 237. zł 14,—
Górnictwo z. 31, 1968 r., s. 119, zł 8,—
Górnictwo z. 32, 1968 r., s. 97, zł 6,—
Górnictwo z. 33, 1968 r., s. 113, zł 6,—
Górnictwo z. 34, 1968 r., s. 111, zł 7,—
Górnictwo z. 35, 1968 r., s. 143.
Górnictwo z. 36, 1969 r., s. 243. zł 13,50
Górnictwo z. 37, 1969 r., s. 234, zł 14,—
Górnictwo z. 38, 1969 r., s. 167, zł 10,—
Górnictwo z. 39, 1969 r., s. 76, zł 4,50
Górnictwo z. 40, 1969 r., s. 107, zł 7,—
Górnictwo z. 41, 1969 r., s. 642, zł 42,—
Górnictwo z. 42, 1970 r., s. 84, zł 5,—
Górnictwo z. 43, 1970 r., s. 58, zł 5,—
Górnictwo z. 44. 1971 r., s. 199, zł 16,50
Górnictwo z. 45, 1971 r., s. 73, zł 5,—
Górnictwo z. 46, 1971 r., s. 63, zł 4,50
Górnitcwo z. 47, 1971 r., s. 67, zł 6,—
Górnictwo z. 48, 1972 r., s. 198, zł 15,—
Górnictwo z. 49, 1972 r., s. 206, zł 16,—
Górnictwo z. 50, 1971 r., s. 148, zł 10,—
Górnictwo z. 51, 1972 r., s. 60, zł 5,—
Górnictwo z. 52, 1972 r., s. 526, zł 39,—

BIBLIOTEKA GŁÓWNA
Politechniki Śląskiej
P. 3351/72/53