

ENERGETYKA z. 10

CZESŁAW GRACZYK

**BADANIA NAD PRZEBIEGIEM
ROZKŁADÓW CZĄSTEK PYŁOWYCH**

POLITECHNIKA ŚLĄSKA
ZESZYT NAUKOWY Nr 68 – GLIWICE 1962

SPIS TREŚCI

Przedmowa	3
Wykaz oznaczeń	5
1. Wiadomości wstępne	7
2. Prace obce dotyczące analitycznego przedstawienia rozkładów cząstek pyłowych	10
3. Przebieg i wyniki doświadczeń	14
4. Charakterystyka rozkładu wypadkowego	23
5. Analiza rozkładu wypadkowego	27
6. Wnioski	58
Wykaz literatury	62

POLITECHNIKA ŚLĄSKA

ZESZYTY NAUKOWE

Nr 68

Dr inż. CZESŁAW GRACZYK

**BADANIA NAD PRZEBIEGIEM
ROZKŁADÓW CZĄSTEK PYŁOWYCH**

PRACA HABILITACYJNA Nr 22

Data otwarcia przewodu habilitacyjnego 29. VI. 1961 r.

REDAKTOR NACZELNY ZESZYTÓW NAUKOWYCH
POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ

Fryderyk Staub

Dział Nauki — Sekcja Wydawnictw Naukowych — Politechniki Śląskiej

Oddano do wyk. 2. VIII. 1962 Zam. 1234 G-20 Ark. druk. 4^{10/16} Ark. wyd. 4^{9/16}
Papier offsetowy kl. V, 70×100, 70 g Nakład 100+215 Cena zł 5,50

Zakład Produkcji Pomocy Naukowych Politechniki Śląskiej w Gliwicach

PRZEDMOWA

Przedmiotem pracy jest opisanie oraz analityczne przedstawienie zmian rozkładu cząstek pyłu zachodzących w trakcie procesu rozdrabniania.

Podstawą pracy są doświadczenia, w wyniku których ustalona została pewna charakterystyczna i powtarzalna prawidłowość.

Dane eksperymentalne posłużyły do opisanie zjawiska i ustalenia wzorów, które w sposób bardziej dokładny aniżeli dotychczas stosowane wzory, ujmują rzeczywisty przebieg rozkładu cząstek pyłu.

Praca inspirowana była przez prof. H. Heywooda (Uniwersytet Londyński), dzięki pomocy i opiece którego wykonano część doświadczeń.

WYKAZ OZNACZEŃ

Alfabet łaciński:

a	mm $10^{-3}(\mu)$	- średni rozmiar cząstki pyłu,
b, n	-	- współczynniki równań wykładniczych,
c, d	-	- współczynniki rozkładu log. normalnego,
k	mm	- parametr charakterystyczny kruszarki,
p	%	- udział pyłu wtórnego w pyle wypadk.
R	%	- pozostałość sitowa,
x	mm $10^{-3}(\mu)$	- rozmiar cząstki,
s	-	- liczba korekcji rozkładu uciętego,
u, t, z	-	- zmienne pomocnicze,
W	%	- przepadłość sitowa

Alfabet grecki:

α, β	-	moduły na osiach współrzędnych,
ξ, η	-	parametry papieru normalnego,
σ	-	dyspersja,
τ	-	czas.

Indeksy I, II oznaczają numery rozkładów, znak * oznacza rozkład pełny nieucięty.

1. WIADOMOŚCI WSTĘPNE

Rozdrabnianie ciał stałych stosowane jest w wielu procesach technologicznych w różnych gałęziach przemysłu.

Bardzo często właściwy przebieg procesu technologicznego uzależniony jest nie tylko od składu chemicznego lecz również i od wielkości cząstek rozdrabnianego materiału.

Pyły monodispersyjne, zawierające cząstki tego samego rozmiaru praktycznie w technice nie istnieją. Na ogół pył składa się z cząstek różnej wielkości, których rozkład zależny jest od rodzaju substancji i sposobu rozdrabniania.

Z uwagi na polidispersję, stopień rozdrabniania pyłu może być jednoznacznie określony za pomocą funkcji $R = \varphi(x)$, gdzie R oznacza udział masowy wszystkich cząstek próby pyłu, większych od rozmiaru x . Niekiedy stosowana jest funkcja $W = 1 - R = f(x)$, przy czym W oznacza udział masowy wszystkich cząstek pyłu mniejszych od rozmiaru x .

Zwykle cząstkę pyłu traktuje się jako kulę, której średnica uważana jest za jej rozmiar x . Kształt cząstek pyłowych nie jest na ogół kulisty, a rozbieżność tę ujmuje tzw. liczba kształtu. Wyraża ją stosunek powierzchni średniej cząstki do powierzchni cząstki kulistej, tej samej objętości. Wartości liczby kształtu są większe od jedności i na przykład dla węgla zawarte są pomiędzy 1,3 a 1,6.

W konimetrii podstawową metodą rozdziału cząstek jest analiza sitowa, dlatego wielkość R oznaczana jest jako tzw. pozostałość sitowa, a wielkość W odpowiednio jako przepadłość sitowa.

Na rysunku 1a przedstawiono obydwie dystrybuanty przy czym skala R i W zawarta jest w granicach od 0 do 100%. Obie krzywe powstały przez połączenie punktów dyskretnych uzyskanych z analizy sitowej. Są one względem siebie odwrotne względem prostej $R=W=50\%$ równoległej do osi x . Stosunkowo częściej używana jest funkcja $R = \varphi(x)$ i w tej postaci zostały przedstawione wyniki doświadczeń zawarte w tabelach arkuszy pomiarowych.

Funkcja $R = \varphi(x)$ w statystyce matematycznej nosi nazwę kumulowanego szeregu rozdzielczego.

Między kumulowanym szeregiem rozdzielczym $R(x)$, a właściwym szeregiem rozdzielczym $R'(x)$ zwanym też gęstością funkcji $\varphi(x)$ lub też krótko rozkładem, istnieje dla każdego dowolnego punktu x_a następująca zależność

$$R'(x_a) = - \frac{dR}{dx} \Big|_{x_a} \quad (1)$$

przy czym udział masowy dR cząstek przypadających na frakcję dx określony jest powierzchnią zakreskowaną na rysunku 1b.

Całkowita powierzchnia pola zawartego między histogramem a osiami x jest całką oznaczoną równą sumie wszystkich udziałów masowych tj. 100%.

$$\int_0^{\infty} R'(x) dx = 100\% \quad (2)$$

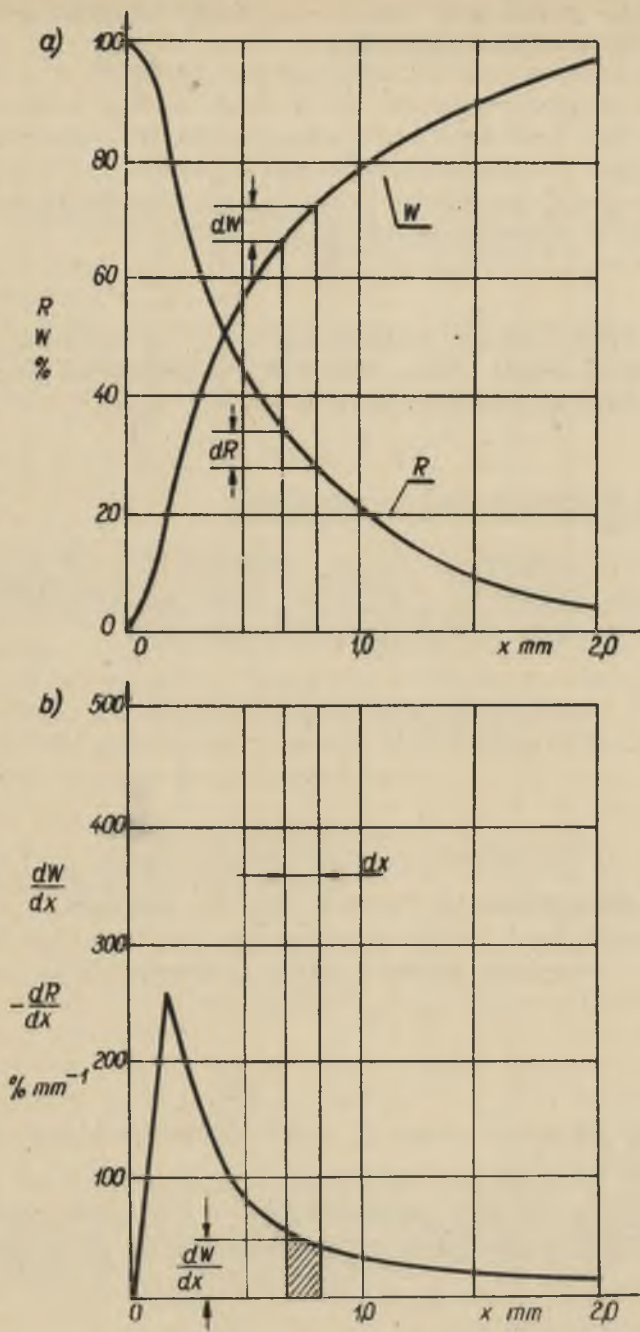
Krzywą dR/dx wykreśloną na rysunku 1b otrzymano drogą różniczkowania jednej z dwu krzywych całkowych z pominięciem znaku algebraicznego. Jest to graficzne przedstawienie rozkładu informującego o gęstości funkcji $R = \varphi(x)$ czyli o rozdziale masowym cząstek na poszczególne frakcje.

Rozkłady statystyczne występujące w technice dają się wyrazić wzorami rozkładów typowych takich jak rozkład normalny logarytmicznie normalny, gamma, beta i inne.

Problem dokładnego analitycznego określenia funkcji $R = \varphi(x)$ jest mimo wielu prac w tej dziedzinie do dziś praktycznie nie rozwiązany. Wszystkie proponowane formuły są empiryczne. Powstały one jako wynik aproksymacji dużej ilości dystrybuant otrzymanych z doświadczeń laboratoryjnych.

Proponowane formuły, nie wyłączając najbardziej rozpowszechnionego wzoru Rosina-Rammlera-Benneta opisują rzeczywisty przebieg funkcji $R = \varphi(x)$ w sposób przybliżony; wiadomo z praktyki, że dokładność tych formuł jest stosunkowo mała i zmienna w zależności od stanu rozdrobnienia materiału.

Wzory dotychczas stosowane noszą charakter równań "statycznych", gdyż nie uwzględniają parametru czasowego ujmającego aktualny stan rozdrobnienia materiału.



Rys.1. Wykresy dystrybuanty i rozkładu cząstek pyłu

Treścią pracy niniejszej jest próba analitycznego przedstawienia skomplikowanych zmian rozkładu cząstek pyłu zachodzących w trakcie rozdrabniania.

2. PRACE OBCE DOTYCZĄCE ANALITYCZNEGO PRZEDSTAWIENIA ROZKŁADU CZĄSTEK PYŁU

Problem analitycznego przedstawienia rozkładu cząstek pyłu był tematem wielu prac. Poniżej w porządku historycznym przedstawiono najważniejsze z nich.

a) Formuła Rosina-Rammlera-Benneta

W latach trzydziestych Rosin, Rammler [1] na podstawie badań nad pyłem węglowym ustalili, wzór empiryczny kumulowanego rozkładu pyłu w następującej postaci

$$R = 100 e^{-bx^n} \quad (3)$$

gdzie:

b, n - stałe współczynniki charakterystyczne.

Równanie (3) zmodyfikował Bennet [2] do postaci

$$R = 100 e^{-(x/x_m)^n} \quad (3a)$$

gdzie:

x_m - średni rozmiar cząstki pyłu odpowiadający wartości $R = 50\%$.

Równanie R.R.B. jest najpowszechniej stosowanym wzorem. Po przekształceniu i podwójnym zlogarytmowaniu przedstawia się następująco:

$$100 = e^{bx^n}, \quad \lg \frac{100}{R} = bx^n, \quad \lg \lg \frac{100}{R} = \lg b + n \lg x \quad (3b)$$

To ostatnie wyrażenie jest podstawą ogólnie stosowanego wykresu $\lg \lg \frac{100}{R} = f(\lg x)$ na którym kumulowany rozkład przedstawia się w postaci linii prostej o pochyleniu n i przesunięciu $\lg b$ (rys.2). Na tak skonstruowanym wykresie punkty rozkładu kumulowanego powinny układać się wedle linii prostej. Istnieją jednak w wielu przypadkach znaczne odchylenia, szczególnie występujące w obszarze frakcji drobnych cząstek (x) $< 20\mu$ gdzie można zaobserwować znaczne zwiększenie pochylenia n . Anselm [3] nazwał to zjawisko "zubożaniem małych cząstek".

Wzór R.R.B. po zróżniczkowaniu przedstawia się:

$$\frac{dR}{dx} = 100 n b x^{n-1} e^{-bx^n} \quad (4)$$

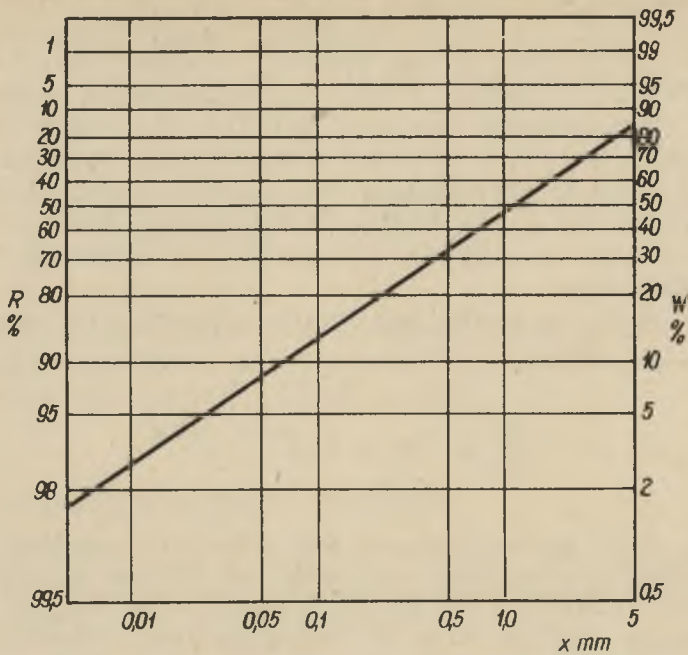
Wzór R.R.B. ze względu na swą prostotę znalazł szerokie zastosowanie w praktyce. Prowadzi on jednak w przypadku $n < 1$ (co często zachodzi) do nielogicznych rezultatów, gdyż wówczas funkcja dR/dx dla x równego zero przybiera wartość nieskończenie wielką. Przebieg krzywej rozkładu w zależności od parametru n najlepiej ilustruje rysunek 3. Oznacza to, że dla $n < 1$ powierzchnia właściwa pyłu będzie nieskończenie wielką co nie jest prawdziwe.

b) Formuła Heywooda

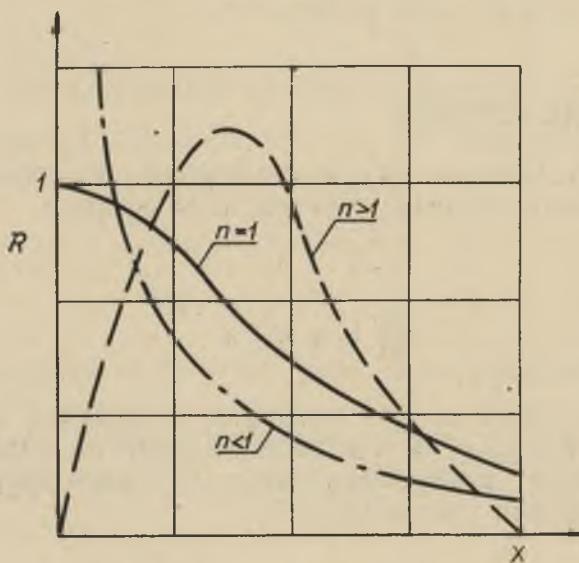
W 1933 r. Heywood [4] zaproponował, by rozkład cząstek pyłu ująć analitycznie następującym wzorem:

$$\frac{dW}{dx} = a x^3 e^{-bx^n} \quad (5)$$

Równanie to czyni zadość warunkom brzegowym, gdyż dla wartości $x = 0$ oraz $x = \infty$ funkcje dR/dx przyjmuje wartość zerową. Jedynie całkowanie wzoru (5) jest trudniejsze aniżeli w przypadku równania (4).



Rys.2. Wykres podwójnie logarytmiczny wg równania R.R.



Rys.3. Przebieg rozkładu wg równania R.R.

c) Formuła Schumanna

Podany przez Schumanna [5] wzór rozkładu cząstek pyłu przedstawia się następująco:

$$\frac{dW}{dx} = n C x^{n-1} \quad (6)$$

Znajduje on zastosowanie jedynie w ograniczonym zakresie frakcji cząstek drobniejszych, gdy $n > 1$. Gdy $n < 1$ to krzywa rozkładu ze wzrostem x rozbiega się.

d) Rozkład normalny

Istniały również próby [6], [7], [8] przedstawienia rozkładu cząstek pyłu jako normalnego rozkładu Gaussa. Wzór tego rozkładu przedstawia się następująco:

$$\frac{dR}{dx} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}} \quad (7)$$

gdzie:

a - średnia wartość x (mediana),

σ - dyspersja.

Parametr a określa położenie rozkładu w układzie współrzędnych, natomiast o kształcie decyduje dyspersja σ . Rozkład ten jest symetryczny względem wartości a , przybierając charakterystyczny kształt krzywej dzwonowej. Wielce pomocny jest tu tzw. papier normalny na którym punkty kumulowanego normalnego rozkładu powinny utworzyć linię prostą. Wówczas pochylenie prostej określa parametr σ , a wartość średnia określona jest przez pozostałość sitową $R = 50\%$.

Analizę porównawczą wzoru R.R.B. z wzorem Gaussa przeprowadził Batel [9] wskazując na dużą zgodność obu wzorów w przypadku, gdy współczynnik n wzoru R.R.B. przybiera duże wartości. Natomiast aproksymacja wzorem rozkładu normalnego pyłów o małej wartości n nie daje dobrych rezultatów.

e) Rozkład logarytmicznie normalny

Bardziej udoskonaloną postacią rozkładu normalnego jest tzw. rozkład logarytmiczny określony po raz pierwszy przez Razumowskiego i Kolmogorowa [10], [11].

W postaci analitycznej rozkład przedstawia się następująco:

$$\frac{dR}{dx} = \frac{1}{\sqrt{2x}} e^{-\xi/2} \quad (8)$$

przy czym

$$\xi = \frac{1}{c} \ln(cx) \quad (8a)$$

gdzie:

- c - współczynnik równy odwrotności mediany,
- d - współczynnik dyspersji.

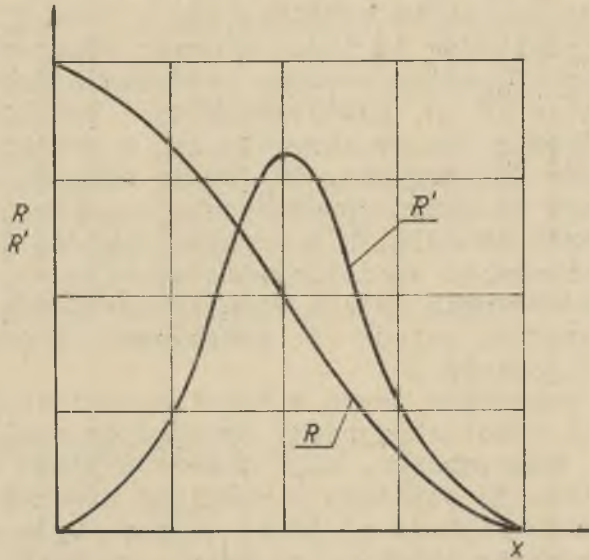
Podobnie jak dla rozkładu normalnego punkty kumulowanego logarytmicznie rozkładu na wykresie logarytmicznym normalnym tworzą linię prostą.

Według Gebeleina [12] rozkład logarytmiczny lepiej ujmuje zakres drobnych cząstek pyłu aniżeli wzór R.R.B. Natomiast daje wyraźne odchylenie od stanu rzeczywistego dla cząstek dużych i wymaga zastosowania dodatkowej korekcji.

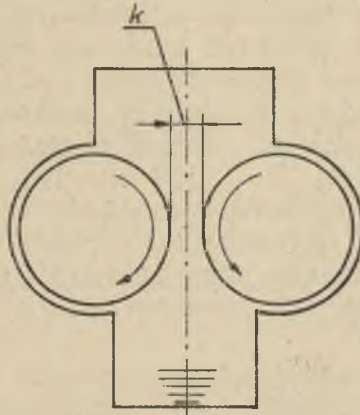
3. PRZEBIEG I WYNIKI BADAŃ

Przedmiotem badań było określenie przebiegu zmian rozkładu cząstek pyłów różnych materiałów w trakcie procesu rozdrabniania.

Seria doświadczeń, które autor wykonał w laboratorium Woolwich Polytechnic w Londynie (od 1.IX.58 do 1.VII.59) posłużyły do opracowania nowej metody analitycznej aproksymacji rozkładu cząstek pyłowych tworzonych w procesie rozdrabniania.



Rys.4. Funkcje $R(x)$ i $R'(x)$ rozkładu normalnego



Rys.5. Schemat kruszarki walcowej

a) Sposób przeprowadzenia badań

W doświadczeniach wykorzystano instalację używaną przez H. Heywooda dla prac badawczych o podobnym przeznaczeniu.

Instalacja pomiarowa składała się z maszyny do rozdrabniania oraz przyrządów do badań stopnia rozdrobnienia pyłu.

Zasadniczym elementem maszyny rozdrabniającej była para walców, średnicy 75 mm, ułożyskowanych i sprzęgniętych razem przekładnią zębatą. Walce obracały się z prędkością kątową wynoszącą około 500 obr/min. Obudowane szczelną osłoną blaszaną posiadały od góry doprowadzenie i odprowadzenie zmielonego materiału od dołu. W maszynie istniała możliwość regulacji i nastawiania szczeliny między walcami, co dawało możliwość produkowania pyłu o różnych rozkładach cząstek.

Pomiary rozstawu walców k dokonywano za pomocą warsztatowego szczelinomierza.

Aparatura pomiarowa użyta w doświadczeniach składała się z kompletu sit laboratoryjnych, wykonanych wedle norm brytyjskich B.S. wstrząsarki, wagi laboratoryjnej oraz wagi sedymentacyjnej. Ta ostatnia z uwagi na stosunkowo duże cząstki (średnio większe od 60μ) używana była sporadycznie.

Materiałem rozdrabnianym był żwir, anhydryt, kupek bitumiczny, szkło.

Rozdrabnianiu poddawano próbkę materiału o masie wynoszącej średnio 0,5 kg. Przed właściwymi pomiarami materiał rozdrabniano wstępnie przy jednakowym rozstawie walców wynoszącym 5 oraz 4 mm. Dla lepszego ujednorodnienia próby przed każdym rozdrabnianiem materiał mieszany był na płaskiej tacy. Materiały rozdrabniane przechowywane były przez długi czas w suchym pomieszczeniu i zawierały znikomą ilość wilgoci.

Pomiary rozpoczynano od rozdrabniania przy nastawianiu szczeliny na szerokość $k = 3,04$ mm. Pył przepuszczony przez tak nastawiony młyn poddawano analizie sitowej. Z kolei ustawiano rozstaw walców na następną wartość $k = 2,29$ mm, a otrzymany z jednorazowego przemielenia pył poddawano następnej analizie. Ten sam tok postępowania stosowano dla innych rozstawów walców.

Analizę sitową przeprowadzano zgodnie z przepisami normy brytyjskiej British Standard 1796-1952. Próba pyłu użyta w analizie posiadała masę 50 g. Ważono ją z dokładnością $\pm 0,025$ g. W pomiarach stosowano zestaw sit firmy Endecotts, których dane techniczne zawarte są w tabeli I.

Tabela I

Rozmiary stosowanych sit laboratoryjnych

Nr sita	7	14	25	52	100	170
Szerokość oczka (mikron)	2411	1204	599	295	152	89

W przypadkach, gdy badany pył zawierał dużą ilość cząstek mniejszych od 60μ analizę rozpoczynano od segregacji tych cząstek sitem o najdrobniejszych oczkach. Pozostałości sito- we ważono z dokładnością $\pm 0,01$ g. Wedle normy brytyjskiej B.S. 1796-1952 ubytek pyłu w czasie nie powinien przekroczyć 0,5% masy próby. Gdy warunek ten nie był dochowany, pomiar anulowano.

b) Opracowanie wyników badań

Wyniki doświadczeń zestawione są w arkuszach pomiarowych 1 do 11. Doświadczenia wykonywano w 3-ch seriach. Do pierwszej serii przynależą arkusze 1 do 3, do drugiej 4 do 7, do trzeciej 8 do 11. Każdy arkusz pomiarowy dotyczy innego materiału rozdrabnianego. W arkuszach pomiarowych podane są dla poszczególnych rozstawów walców k , pozostałości kumulowane R wyrażone w procentach. Stosowane rozstawy walców podane są w tabeli II.

Tabela II

Rozstawy walców

Rozmiar rozstawu k walców mm	3,04	2,29	1,52	0,76	0,38	0,19
Nastawienie szcze- linomierza cal	120/1000	90/1000	60/1000	30/1000	15/1000	7,5/1000

Na podstawie danych zawartych w arkuszach pomiarowych sporządzono wykresy dystrybuant $R = \varphi(x)$ w postaci funkcji ciągłej (album) łącząc punkty otrzymane z doświadczeń.

Z kolei krzywe $R = \varphi(x)$ przedstawione w postaci funkcji ciągłych zróżniczkowano graficznie. Funkcje $R = f(x)$ będące rozkładami cząstek są uwidocznione na wykresach zawartych w albumie. Obrazują one charakterystyczny przebieg zmian rozkładu cząstek. Dla uzyskania dobrej dokładności krzywe $R' = f'(x)$ wyznaczone przy użyciu średnio 25 punktów dystrybucyjności $R(x)$.

Arkusz pomiarowy nr 1

Pozostałości sitowe R%

Materiał: żwir

Rozstaw walców k mm		3,04	1,52	0,76	0,38	0,19
rozmiar oczka sita x _u (numer sita)	2411 (nr 7)	-	1,28	-	0,10	0,00
	1204 (nr 14)	-	17,50	-	2,04	0,00
	599 (nr 25)	-	41,54	-	22,00	1,70
	295 (nr 52)	-	73,90	-	61,90	19,74
	152 (nr 100)	-	93,91	-	87,51	69,80
	89 (nr 172)	-	97,3	-	94,8	86,00
	reszta	-	100,0	-	100,0	100,00

Arkusz pomiarowy nr 2

Pozostałości sitowe R%

Materiał: szkło

Rozstaw walców k mm		3,04	1,52	0,76	0,38	0,19
rozmiar oczka sita a _u (numer sita)	2411 (nr 7)	-	3,60	0,00	0,00	0,00
	1204 (nr 14)	-	29,6	11,0	1,60	0,00
	599 (nr 25)	-	58,3	51,2	25,7	3,08
	295 (nr 52)	-	77,9	75,0	61,3	31,2
	152 (nr 100)	-	89,5	88,2	80,5	69,2
	89 (nr 172)	-	95,0	93,8	89,7	84,7
	reszta	-	100,00	100,00	100,00	100,00

Arkusz pomiarowy nr 3

Pozostałości sitowe R%

Materiał: żwir

Rozstaw walców k mm		3,04	1,52	0,76	0,38	0,19
rozmiar oczka sita x μ (numer sita)	2411 (nr 7)	-	1,66	0,34	0,00	0,00
	1204 (nr 14)	-	17,7	6,46	0,55	0,22
	599 (nr 25)	-	41,2	32,60	23,7	2,32
	295 (nr 52)	-	72,7	72,8	66,7	30,5
	152 (nr 100)	-	94,7	94,0	89,8	74,2
	89 (nr 172)	-	98,2	97,7	96,5	87,2
	reszta	-	100,0	100,0	100,0	100,0

Arkusz pomiarowy nr 4

Pozostałości sitowe R%

Materiał: żwir

Rozstaw walców k mm		3,04	1,52	0,76	0,38	0,19
rozmiar oczka sita x μ (numer sita)	2411 (nr 7)	26,2	-	0,00	0,00	0,00
	1204 (nr 14)	80,2	-	16,5	0,68	0,00
	599 (nr 25)	93,5	-	64,7	19,9	5,22
	295 (nr 52)	97,7	-	83,2	62,5	46,3
	152 (nr 150)	98,8	-	91,5	82,5	77,8
	89 (nr 172)	99,3	-	95,2	90,6	88,6
	reszta	100,0	-	100,0	100,0	100,0

Arkusz pomiarowy nr 5

Pozostałości sitowe R%

Materiał: szkło

Rozstaw walców k mm		3,04	1,52	0,76	0,38	0,19
rozmiar oczka sita \times μ (numer sita)	2411 (nr 7)	-	7,56	0,00	0,00	-
	1204 (nr 14)	-	50,2	12,7	1,83	-
	599 (nr 25)	-	75,9	55,6	31,2	-
	295 (nr 52)	-	88,4	79,6	68,9	-
	152 (nr 150)	-	94,2	89,2	86,1	-
	89 (nr 172)	-	97,3	95,0	93,0	-
	reszta	-	100,0	100,0	100,0	-

Arkusz pomiarowy nr 6

Pozostałości sitowe R%

Materiał: anhydryt

Rozstaw walców k mm		3,04	1,52	0,76	0,38	0,19
rozmiar oczka sita \times μ (numer sita)	2411 (nr 7)	42,9	10,6	0,00	0,00	0,00
	1204 (nr 14)	93,0	71,5	14,2	5,82	0,2
	599 (nr 25)	99,5	89,2	58,8	17,70	1,82
	295 (nr 52)	99,9	94,2	77,5	58,1	30,2
	152 (nr 100)	99,9	96,2	84,0	72,2	58,5
	89 (nr 172)	99,9	96,4	86,6	76,8	66,2
	reszta	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Arkusz pomiarowy nr 7
Pozostałości sitowe R%

Materiał: kupek

Rozstaw walców k mm		3,04	1,52	0,76	0,38	0,19
rozmiar oczka sita x ^u (numer sita)	2411 (nr 7)	42,2	—	3,27	0,00	0,00
	1204 (nr 14)	92,2	—	37,5	10,1	2,27
	599 (nr 25)	99,7	—	72,4	39,8	15,9
	295 (nr 52)	99,7	—	85,1	72,8	56,5
	152 (nr 100)	99,7	—	91,7	85,2	77,3
	89 (nr 172)	99,7	—	94,5	90,5	85,2
	reszta	100,0	—	100,0	100,0	100,0

Arkusz pomiarowy nr 8
Pozostałości sitowe R%

Materiał: żwir

Rozstaw walców k mm		3,04	1,52	0,76	0,38	0,19
rozmiar oczka sita x ^u (numer sita)	2411 (nr 7)	63,8	20,7	0,00	0,00	0,00
	1204 (nr 14)	90,8	67,6	9,20	1,74	0,00
	599 (nr 25)	97,4	84,3	40,3	17,6	2,57
	295 (nr 52)	99,3	92,5	71,7	62,3	43,8
	152 (nr 100)	99,7	96,3	86,5	83,0	75,0
	89 (nr 172)	99,7	87,8	93,5	91,4	87,1
	reszta	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Arkusz pomiarowy nr 9
Pozostałości sitowe R%

Materiał: anhydryt

Rozstaw walców k mm		3,04	1,52	0,76	0,38	0,19
rozmiar oczka sita x_{μ} (numer sita)	2411 (nr 7)	55,0	16,8	0,00	0,00	0,00
	1204 (nr 14)	93,1	73,2	14,1	1,87	0,00
	599 (nr 25)	98,0	88,8	59,0	23,5	4,27
	295 (nr 52)	98,8	93,5	76,2	64,5	37,5
	152 (nr 100)	98,8	95,4	83,3	76,4	62,4
	89 (nr 172)	98,8	96,2	86,0	78,7	71,0
	reszta	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Arkusz pomiarowy nr 10
Pozostałości sitowe R%

Materiał: szkło

Rozstaw walców k mm		3,04	1,52	0,76	0,38	0,19
rozmiar oczka sita x_{μ} (numer sita)	2411 (nr 7)	-	4,27	0,00	0,00	0,00
	1204 (nr 14)	-	53,4	7,73	0,38	0,00
	599 (nr 25)	-	78,0	52,7	17,4	1,2
	295 (nr 52)	-	90,0	77,7	59,5	23,5
	152 (nr 100)	-	95,5	89,5	81,0	65,7
	89 (nr 172)	-	97,6	94,7	90,5	82,7
	reszta	-	100,0	100,0	100,0	100,0

Arkusz pomiarowy nr 11

Pozostałości sitowe R%

Materiał: żupek

Rozstaw walców k mm		3,04	1,52	0,76	0,38	0,19
rozmiar oczka sita x (μ (numer sita)	2411 (nr 7)	43,7	11,25	1,72	-	0,00
	1204 (nr 14)	89,0	53,3	30,8	-	6,05
	599 (nr 25)	98,2	81,3	70,0	-	26,4
	295 (nr 52)	98,9	90,4	85,8	-	65,3
	152 (nr 100)	99,3	94,5	92,0	-	81,5
	89 (nr 172)	99,5	96,2	94,8	-	87,9
	reszta	100,0	100,0	100,0	-	100,0

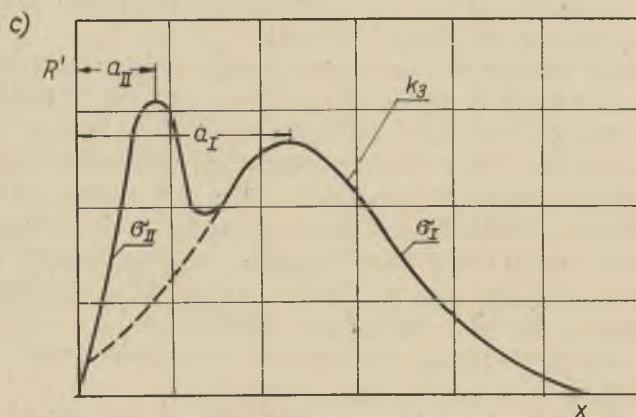
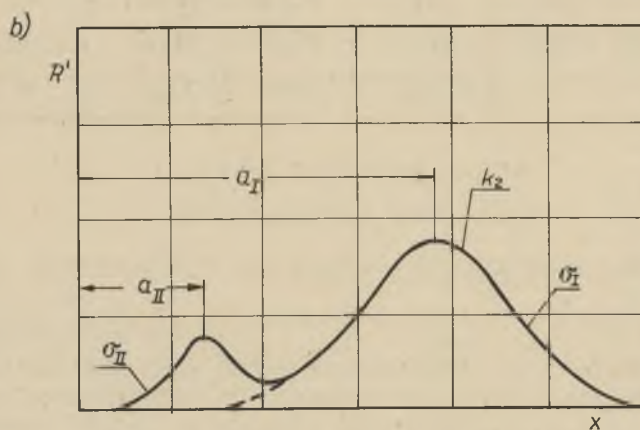
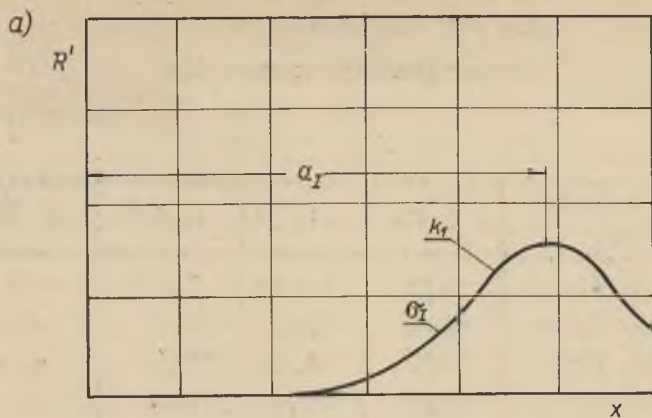
4. CHARAKTERYSTYKA ROZKŁADU WYPADKOWEGO

Kształtowanie się rozkładu cząstek pyłu najlepiej obrazują wykresy przedstawiające funkcje $R = f(x)$ w postaci ciągłej. W zależności od rozstawu walców k , w których odbywa się proces rozdrabniania, rozkład cząstek pyłu przybiera charakterystyczny przebieg (album).

Z porównania krzywych uwidocznionych na wykresach, wynika, że rozkład cząstek pyłu przybiera postać nietypową, zależną przede wszystkim od rodzaju rozdrabnianego materiału.

Rozkład cząstek pyłu jest rozkładem wypadkowym, składającym się z rozkładów składowych. Dla pewnych materiałów rozkład wypadkowy może być tylko jednym rozkładem, dla innych jest sumą rozkładów składowych. Najczęściej jednak rozkład wypadkowy składa się z dwóch rozkładów składowych. Można zaobserwować, że oba rozkłady składowe charakteryzują się pewnymi powtarzalnymi własnościami. Pokróćce można je scharakteryzować w następujący sposób.

Pierwszy rozkład składowy występuje w zakresie frakcji cząstek większych. Jego przebieg jest zbliżony do rozkładu normalnego względnie normalnego uciętego lewostronnie.



Rys. 6, Proces tworzenia się rozkładu wypadkowego

W miarę rozdrabniania materiału ($k \rightarrow 0$) pierwszy rozkład składowy wykazuje dwie charakterystyczne właściwości:

- a) przesuwanie się wartości średniej a_I w kierunku mniejszych wartości, oraz
- b) zmniejszanie się dyspersji σ_I .

Rozkład ten nazwano rozkładem pierwotnym. Przypuszcza się, że główny wpływ na przebieg zmian tego rozkładu ma obok rodzaju materiału, technologia rozdrabniania.

Rozkład drugi składowy umiejscowiony jest w zakresie frakcji drobnych cząstek. Kształt jego zbliżony jest do rozkładu normalnego. Drugi rozkład składowy w miarę zmniejszania się parametru k posiada następujące własności:

- a) zmniejszanie wartości średniej a_{II} ,
- b) zmniejszanie dyspersji σ_{II} .

Rozkład ten nazwano wtórnym. Jak to ilustruje porównanie wykresów (w albumie) parametry a_{II} oraz σ_{II} zależą głównie od struktury rozdrabnianego materiału.

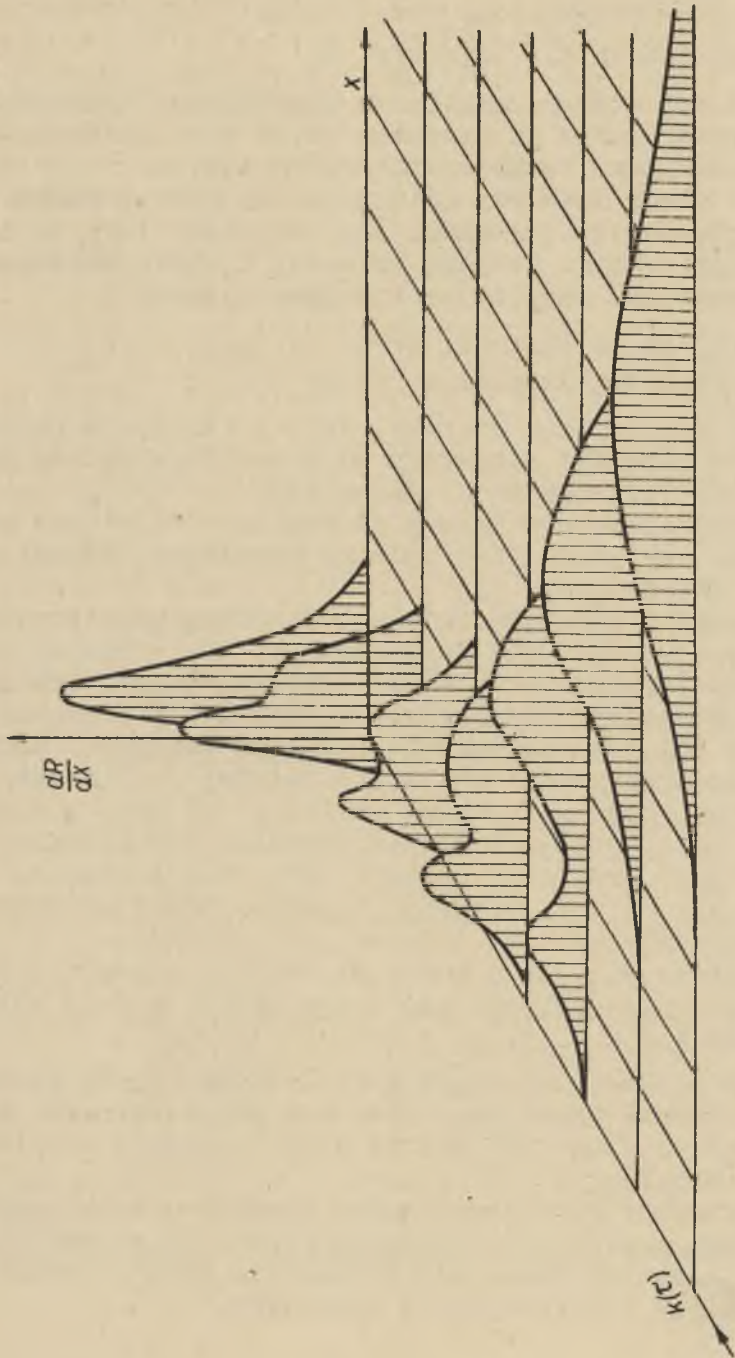
Oba wyżej opisane rozkłady pierwotny oraz wtórny uwidocznione są na wykresach jako wykresy wypadkowe, będące sumą rozkładów składowych.

Na rysunku 6 przedstawiono kolejne fazy kształtowania się wykresu wypadkowego. Dla parametru $k = k_1$ (rys.6a) prawie cały pył jest pyłem pierwotnym. Wówczas rozkład ten jest rozkładem normalnym nieuciętym. W punkcie $x = a_{II}$ na rys.6b zarysowuje się już powstawanie rozkładu wtórnego. Zaznacza się wyraźne przesuwanie wartości średniej a_I rozkładu pierwotnego w kierunku mniejszych wartości x oraz zmniejszanie dyspersji σ_I . Występuje również wyraźne zmniejszanie się dyspersji σ_{II} , przy czym wartość a_{II} maleje również. W następnej fazie $k = k_3$ (rys.6c) opisane zmiany występują jeszcze wyraźniej.

Przypuszcza się, że w końcowym efekcie wartość średnia rozkładu wtórnego pokryje się z wartością średnią rozkładu pierwotnego ($a_I \cong a_{II}$).

Wówczas rozkład wypadkowy zredukowałby się do jednego rozkładu. Charakterystyczny przebieg obu rozkładów składowych najlepiej ilustruje wykres przestrzenny o współrzędnych R', x, k (rys.7).

Przeprowadzone badania dotyczą cząstek o rozmiarach od 60μ do 3mm. Jest wielce prawdopodobnym, że zauważona cykliczność może powtarzać się w zakresie frakcji zarówno mniejszych jak i większych od zbadanych.



Rys.7. Wykres przestrzenny zmian rozkładu wypadkowego

Opisany przebieg rozkładu wypadkowego jest charakterystyczny dla szeregu materiałów badanych w pracy niniejszej. Istotną różnicę stanowią jedynie różne wartości parametrów rozkładów składowych. Rozkłady dwuskładnikowe tworzone są np. przez cząstki pyłu szklanego i łupka bitumicznego, oraz pyłu anhydrytu. Cząstki otrzymane z rozdrabniania żwiru stanowią rozkład, który można uważać za jednoskładowy.

Porównując rozkłady wypadkowe szkła i łupka bitumicznego zaobserwować można wyraźną różnicę między obu rozkładami. Rozkład strukturalny pyłu szklanego posiada parametr a_{II} znacznie większy od parametru a_{II} rozkładu wtórnego łupka bitumicznego przy tej samej wartości k . Również dyspersje σ_{II} obu materiałów zachowują się podobnie. Występuje też różnica parametrów rozkładów pierwotnych. Parametr a_I pyłu szklanego jest większy od parametru a_I łupka podobnie jak parametry σ_I obu rozdrabnianych materiałów.

Rozkład wypadkowy anhydrytu ma przebieg zbliżony do rozkładu łupka bitumicznego. Rozkład wtórny anhydrytu usytuowany jest w zakresie bardzo małych cząstek ($a_I \approx 200 \text{ mm } 10^{-3}$). W czasie graficznego różniczkowania wykresów $R = \varphi(x)$ okazało się, że istnieje prawdopodobnie i trzeci rozkład składowy. Rozkład ten jest znikomo mały w porównaniu do poprzednich i dlatego pominięto go w rozważaniach.

Rozkład dwuskładowy na przykładzie anhydrytu występuje bardzo wyraźnie i dlatego wyniki doświadczeń uzyskane przy jego rozdrabnianiu posłużyły dalej do sporządzenia obliczeń przedstawionych w rozdziale 5 pracy.

5. ANALIZA ROZKŁADU WYPADKOWEGO

Analizę rozkładu wypadkowego oparto na aproksymacji rozkładu rzeczywistego rozkładem dwuskładowym.

Pył wypadkowy jak to już opisano w rozdziale 4 pracy, można traktować jako sumę dwóch pyłów: pierwotnego i wtórnego.

W wyniku szeregu prób okazało się, że rozkład pierwotny można najlepiej opisać za pomocą rozkładu normalnego uciętego lewostronnie.

Natomiast rozkład wtórny, którego udział w pyłe wypadkowym jest stosunkowo mały, może być aproksymowany rozkładem normalnym, nieuciętym.

Tak więc w przypadku rozkładu wypadkowego - dwuskładowego występuje aż 5 zmiennych; p - udział pyłu wtórnego w pyłe wypadkowym, a_I , a_{II} - średnie wartości cząstek obu pyłów oraz σ_I , σ_{II} - ich dyspersje.

Metoda iteracyjnego postępowania aproksymującego zaproponowana w pracy polega na wyznaczeniu tych 5 parametrów w zależności od wyróżnionego parametru k charakteryzującego stadia rozdrabniania.

W dalszych rozważaniach stosowana będzie wyłącznie funkcja $W(x)$ i jej pochodna $W'(x)$, którymi wygodnie jest operować z uwagi na znak. (Funkcja $W(x)$ związana jest z $R(x)$ prostą zależnością $W(x) = 100 - R(x)$ skąd wynika; $W'(x) = -R'(x)$).

Rozkład wypadkowy, dwuskładowy przedstawia następująca zależność:

$$W'(x) = p W'_{II}(x) + (1 - p) W'_I(x) \quad (9)$$

gdzie:

- p - udział pyłu wtórnego w pyłe wypadkowym,
- $(1-p)$ - udział pyłu pierwotnego w pyłe wypadkowym,
- $W'_I(x)$ - pierwotny rozkład składowy,
- $W'_{II}(x)$ - wtórny rozkład składowy.

Rozłożenie rozkładu wypadkowego na rozkłady składowe nie jest zagadnieniem prostym.

W pracy wykorzystano sposób zaproponowany przez Danø. [13]

Wartości rozkładu naniesione na papier półlogarytmiczny tworzą parabolę.

Jeżeli przedział Δt jest dostatecznie mały to dla rozkładu normalnego otrzymuje się:

$$b_i \approx n \int_{t_i - \frac{\Delta t}{2}}^{t_i + \frac{\Delta t}{2}} W'(x) dx \approx n \cdot \Delta t \cdot W'(t_i) = \frac{n \cdot \Delta t}{\sqrt{2\pi}\sigma} \cdot e^{-\frac{(t_i - a)^2}{2\sigma^2}} \quad (10b)$$

stąd

$$\lg b_i \approx \lg \left(\frac{n \cdot \Delta t}{\sqrt{2\pi} \sigma} \right) - \frac{0,4343}{2} \frac{(t_i - a)^2}{\sigma^2} \quad (10b)$$

Z wzoru (10b) wynika, że punkty t_i , $\lg b_i$ tworzą parabolę o osi symetrii $t = a$.

Jeżeli na papierze półlogarytmicznym wykreśli się rozkład dwuskładowy to można go rozdzielić na dwie parabole, jak to przedstawiono na rys. 8a.

Rozkład pierwotny występuje w zakresie dużych cząstek pyłu. Aproksymuje się go rozkładem normalnym, lewostronnie uciętym, gdyż w rozkładzie nieuciętym tzw. "ujemne cząstki" nie mają logicznego uzasadnienia, przy czym pole objęte krzywą dzwonową i osiami powinno wynosić 100%. Próby opisanie tego rozkładu w inny sposób np. za pomocą rozkładu logarytmicznie normalnego nie dały pozytywnych rezultatów.

Rozkład normalny, ucięty lewostronnie określony jest dla zakresu $0 < x < \infty$ następującym wzorem

$$\begin{aligned} W'_I(x) &= \frac{\frac{100}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_I} \exp \left[-\frac{(x - a_I)^2}{2 \cdot \sigma_I^2} \right]}{1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_I} \int_{-\infty}^0 \exp \left[-\frac{(x - a_I)^2}{2 \cdot \sigma_I^2} \right] dx} = \\ &= \frac{\frac{100}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_I} \exp \left[-\frac{(x - a_I)^2}{2 \cdot \sigma_I^2} \right]}{1 - \Phi \left(-\frac{a_I}{\sigma_I} \right)} = \\ &= \frac{100 W^*(x)}{100 - W^*(0)} \end{aligned} \quad (11)$$

We wzorze tym wzór rozkładu normalnego jest mnożony przez czynnik korekcyjny s , będący stosunkiem powierzchni

$$\begin{aligned}
 s &= \frac{1}{1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_I} \int_{-\infty}^0 \exp\left[-\frac{(x-a_I)^2}{2\sigma_I^2}\right] dx} \\
 &= \frac{1}{1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{-a_I/\sigma_I} \exp\left[-\frac{t^2}{2}\right] dt} = \frac{1}{1 - \Phi\left(-\frac{a_I}{\sigma_I}\right)} \\
 &= \frac{100}{100 - W_I^*(o)} \quad (11a)
 \end{aligned}$$

przy czym $W_I^*(o) = 100 \cdot \Phi\left(-\frac{a_I}{\sigma_I}\right)$ jest tzw. stopniem ucięcia (Indeks gwiazdka oznacza rozkład normalny nieucięty). We wzorze na czynnik korekcyjny zastosowano funkcję normalną o zmiennej standaryzowanej $t = \frac{x - a_I}{\sigma_I}$ wyrażającą się wzorem

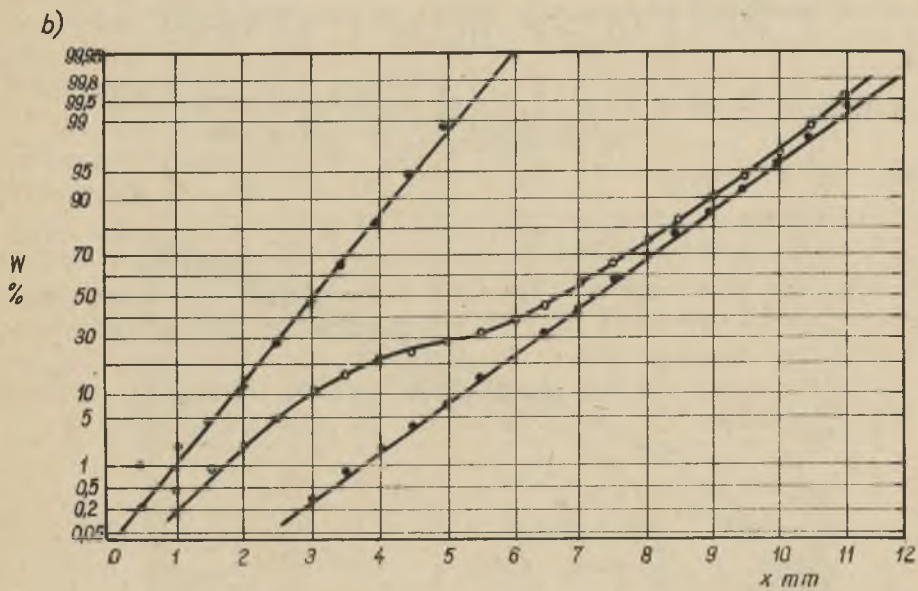
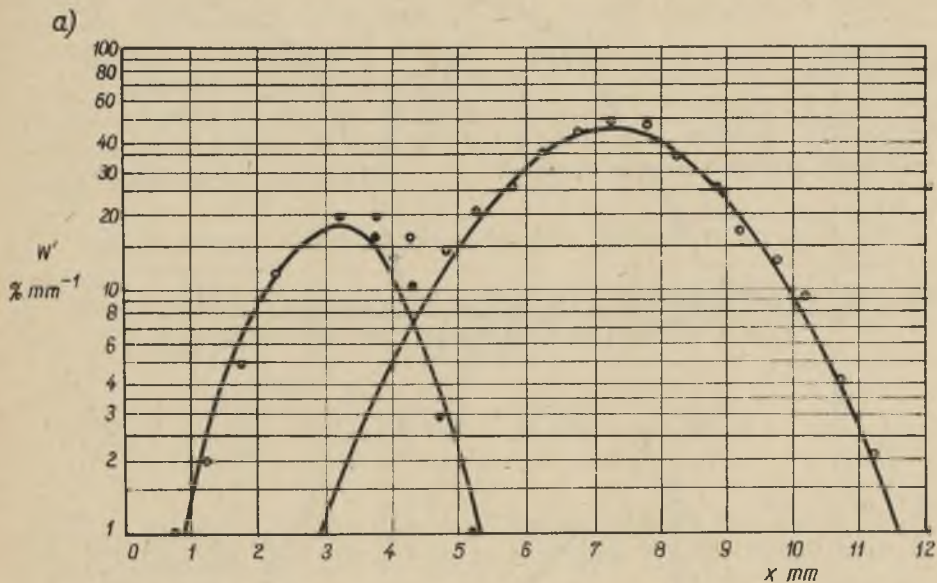
$$\Phi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t \exp\left[-\frac{t^2}{2}\right] dt.$$

Wartości funkcji $\Phi(t)$ są tabelaryzowane. [14]

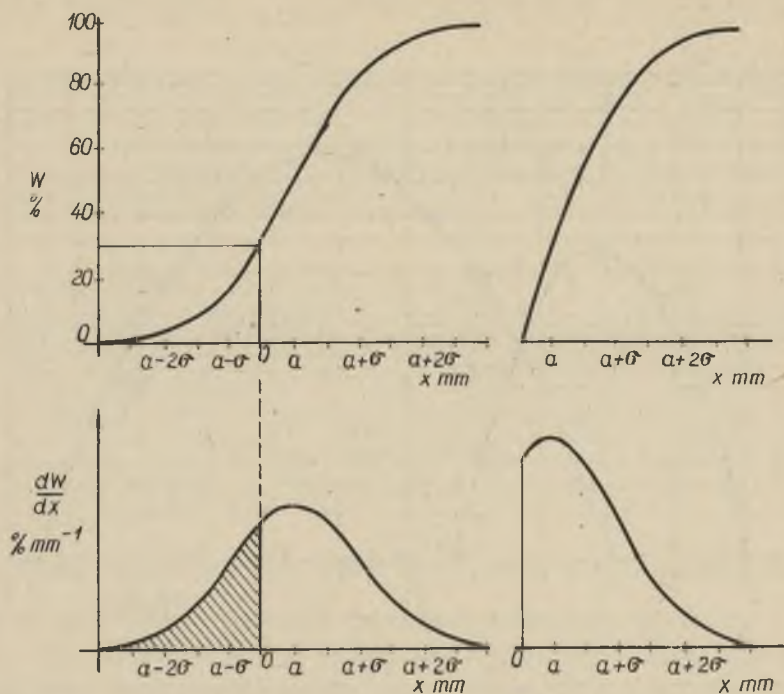
W przypadku gdy $a_I \gg \sigma_I$ czynnik korekcyjny s praktycznie równy jest jedności, a pył pierwotny można opisać rozkładem normalnym nieuciętym.

Dystrybuantę rozkładu normalnego uciętego lewostronnie przedstawia wzór:

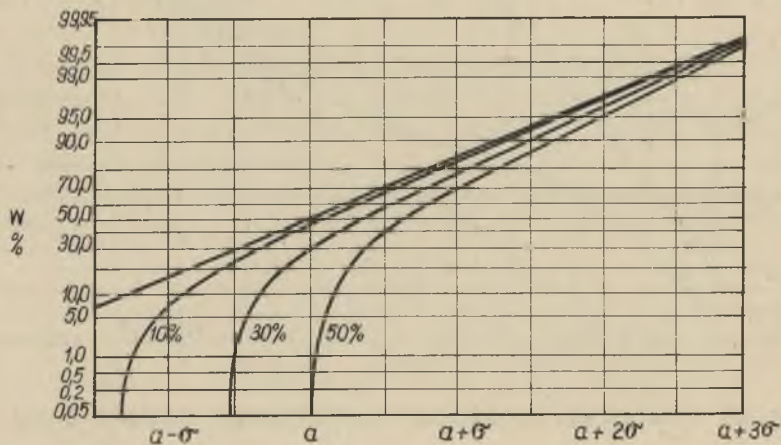
$$\begin{aligned}
 W_I(x) &= \frac{\frac{100}{\sqrt{2\pi}\sigma_I} \int_0^x \exp\left[-\frac{(x-a_I)^2}{2\sigma_I^2}\right] dx}{1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_I} \int_{-\infty}^0 \exp\left[-\frac{(x-a_I)^2}{2\sigma_I^2}\right] dx} = \\
 &= \frac{\Phi\left(\frac{x-a_I}{\sigma_I}\right) - \Phi\left(-\frac{a_I}{\sigma_I}\right)}{1 - \Phi\left(-\frac{a_I}{\sigma_I}\right)} 100 = \frac{W_I^*(x) - W_I^*(o)}{100 - W_I^*(o)} 100 \quad (12)
 \end{aligned}$$



Rys. 8. Rozdział rozkładu wypadkowego metodą Danø



Rys.9. Krzywe $W(x)$ i $W'(x)$ rozkładu normalnego i normalnego z 30% ucięciem



Rys.10. Dystrybuanty trzech uciętych rozkładów normalnych przedstawione na papierze normalnym

Na rysunku przedstawiono obie funkcje $W_I(x)$ oraz $W_I'(x)$ rozkładu uciętego dla 30% - stopnia ucięcia oraz związane z nimi funkcje $W_I^*(x)$ i $W_I^{**}(x)$ rozkładu nieuciętego. Pole zakreskowane względnie odcinek $W_I^{**}(0)$ przedstawiają udział nieistniejący "ujemnych" cząstek pyłu.

Na papierze normalnym (rys.10) wykreślony jest przebieg trzech dystrybuant z stopniem ucięcia równym 10, 20 i 30%. Krzywe posiadają pionowe asymptoty w punktach przecięcia. Przy dużych wartościach x krzywe przebiegają prawie linioowo.

Analityczne określenie stopnia przecięcia nie jest sprawą łatwą.

W pewnych przypadkach można się posłużyć następującą metodą. Z przekształcenia wzoru (12) wynika:

$$W_I^{**}(x) = \frac{1}{100} W_I(x) [100 - W_I^*(0)] + W_I^*(0) \quad (13)$$

Jeżeli znana jest wartość stopnia ucięcia $W_I^*(0)$, to funkcja $W_I^{**}(x)$ powinna na papierze normalnym przedstawić się w postaci linii prostej.

Drogą kolejnych przybliżeń ustalić można najodpowiedniejszą wartość $W_I^*(0)$. Korzystając z właściwości papieru normalnego można ustalić parametry σ_I i a_I .

Znacznie szybsze i dokładniejsze rezultaty osiągnąć można wykorzystując metodę opisaną przez Fischera [15].

Niech $(W_I')_1, (W_I')_3, (W_I')_5 \dots (W_I')_n$ oznaczają n zmierzonych wielkości rozkładu uciętego odpowiadających kolejnym wartościom $x_1, x_3, x_5 \dots x_n$ rozmieszczonych w równych odcinkach na osi odciętych. Celem uproszczenia przeliczeń arytmetycznych w praktyce przyjmuje się zamiast wielkości $x_1, x_3, x_5 \dots$ wielkości $t_1 = 1, t_3 = 3, t_5 = 5$ przy czym między x i t istnieje zależność $x = c \cdot t$.

Z kolei wyznacza się 3 pomocnicze wielkości

$$n = \sum_{i=1}^{i=m} (W_I')_i \quad (14)$$

$$S = c \sum_{i=1}^{i=m} (W_I')_i \cdot t_i \quad SS = c^2 \sum_{i=1}^{i=m} (W_I')_i \cdot t_i^2$$

Wielkości powyższe wykorzystane są dla wyznaczenia liczby y wg wzoru

$$y = \frac{n \cdot SS}{2 \cdot S^2} \quad (15)$$

Posługując się tabelami Fischera określa się zależność $z = \left(-\frac{a_I}{\sigma_I} \right) \cdot f(y)$. Orientacyjny przebieg funkcji $z = f(y)$ przedstawia rysunek (11a).

Znając z łatwo przy użyciu tabel zmiennej standaryzowanej określić stopień ucięcia $W_I^*(0)$.

Wartość dyspersji σ_I rozkładu nieuciętego oblicza się wzorem:

$$\sigma_I \approx \frac{S}{n} g(z) \quad (16)$$

przy czym funkcja $g(z)$ przedstawiona jest w tabelach Fischera. Przebieg funkcji $g(z)$ obrazuje rysunek (11b).

Wartość średniej a_I określa wzór:

$$a_I = -z \cdot \sigma_I \quad (17)$$

Rozkład drugi występuje w zakresie małych cząstek pyłu. Jest on aproksymowany rozkładem normalnym, nieuciętym. Rozkład ten określa dla $0 < x < \infty$ poniższy wzór:

$$W_{II}^*(x) = \frac{100}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_{II}} \exp \left[-\frac{(x - a_{II})^2}{2 \sigma_{II}^2} \right] \quad (18)$$

Odpowiednio wzór dystrybuanty przedstawia się następująco:

$$\begin{aligned} W_{II}(x) &= \frac{100}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_{II}} \int_0^x \exp \left[-\frac{(x - a_{II})^2}{2 \sigma_{II}^2} \right] dx = \\ &= \left[\Phi \left(\frac{x - a_{II}}{\sigma_{II}} \right) - \Phi \left(-\frac{a_{II}}{\sigma_{II}} \right) \right] \cdot 100 \end{aligned} \quad (19)$$

Przebieg rozkładu i dystrybuanty przedstawiono na rys.4.

Aproksymację rozkładu wtórnego przeprowadza się podobnie jak w przypadku rozkładu pierwotnego wykorzystując metodę Danø.

Uzyskane metodą Danø rozkład wtórny uzupełnia się do rozkładu pełnego tzn. takiego, którego powierzchnia wynosi 100%.

W tym celu wyznacza się wartość udziału p przez planimetrywanie powierzchni jednego z rozkładów najlepiej większego 50.

Drogą graficznego całkowania rozkład pełny przekształca się w rozkład kumulowany i nanosi się punkty dystrybuanty na papier normalny.

Arkusz papieru normalnego jest wykresem funkcyjnym o równaniach:

$$\xi = \alpha \cdot x, \quad \eta = \beta \cdot \Phi^{-1}(W) \quad (20)$$

gdzie: α, β są modułami na osiach papieru a $\Phi^{-1}(W)$ jest funkcją odwrotną do funkcji:

$$W = \Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z \exp\left[-\frac{u^2}{2}\right] du$$

Na papierze funkcyjnym o równaniach (20) funkcja

$$W = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} \cdot \int_0^x \exp\left[-\frac{(t-a)^2}{2 \sigma^2}\right] dt$$

ma wykres prostoliniowy:

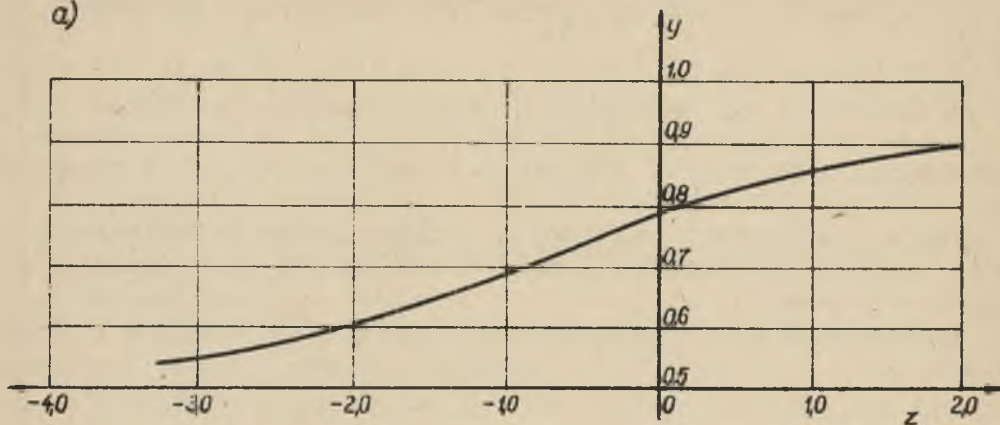
$$\eta = \frac{\beta}{\alpha \cdot \sigma} \xi - \frac{\beta \cdot a}{\sigma} \quad (21)$$

Z równań (21) widać, że parametr a można obliczyć najłatwiej gdy $\eta = 0$ (co odpowiada $W = 50\%$).

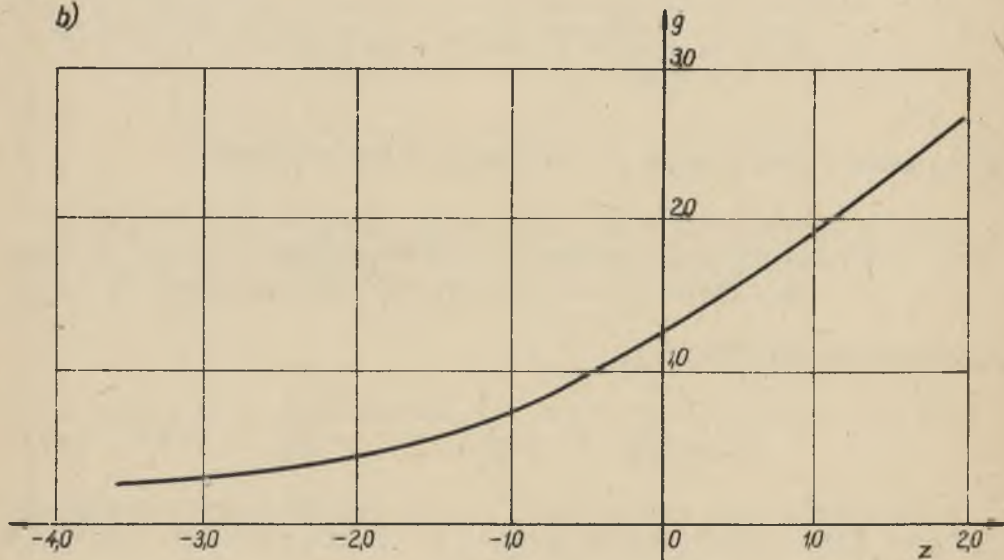
Wówczas:

$$a = \frac{\xi}{\alpha} = x \quad (22)$$

a)



b)



Rys. 11. Przebieg zależności $y(z)$ i $g(z)$

Oznacza to, że wartość parametru a jest równa wartości x w punkcie przecięcia prostej z osią $\eta = 0$ lub $W = 50\%$.

Obierając dowolnie dwa punkty prostej na przykład punkty $P_1(\xi_1, \eta_1)$ i $P_2(\xi_2, \eta_2)$ otrzymany

$$\sigma = \frac{\beta}{\alpha} \frac{\xi_2 - \xi_1}{\eta_2 - \eta_1} \quad (23)$$

Najwygodniej jest obrać jako P_1 i P_2 punkty przecięcia prostej z dwoma liniami poziomymi np. $\eta_1 = 0$ i $\eta_2 = 1$ (lub $\eta_2 = -1$), co odpowiada wartościom $W(x) = 50\%$, oraz 84% (lub 16%).

Zaproponowany sposób matematycznego ujęcia zjawiska przemieszczania się rozkładów w cząstek pyłowych jest metodą grafanoalityczną. Ścisłe wyznaczenie parametrów p_{1-1} , a_1 , σ_1 wyłącznie w oparciu o analizę matematyczną wymagałoby np. dla pyłu dwuskładowego rozwiązania układu pięciu, skomplikowanych równań typu (9), co jest praktycznie niewykonalne.

Jak to wynika z przytoczonych niżej przeliczeń zależności między p , a_I , σ_I , a_{II} , σ_{II} a parametrem k można w badanym zakresie linearyzować.

Przykład obliczeniowy

Celem sprawdzenia słuszności proponowanych wzorów oraz zaproponowanej metody analitycznej aproksymacji doświadczeń wykonano przykład obliczeniowy.

Podstawą obliczeń są arkusze pomiarowe 6 i 9 zawierające dane dotyczące rozdrabniania anhydrytu. Materiał ten wybrano celowo ze względu na szczególnie wyraźnie występujące tu zjawisko tworzenia się dwóch rozkładów. Wykorzystano wartości średnie obu arkuszy, gdyż obie serie pomiarów wykonywane były w tych samych warunkach.

Średnie wartości przepadłości sitowych $W(x) \%$ oraz różnic przepadłości $W(x) \%$ anhydrytu w zależności od rozmiaru szczytowej k podane są w tabeli III.

Wykorzystując dane zawarte w tabeli III i posługując się zależnością $W'(x) = \frac{\Delta W}{\Delta x} \% \cdot \text{mm}^{-1}$, przy czym Δx mm jest różnicą rozmiarów cząstek pyłu odpowiadającą zważonej różnicy przepadłości sitowej ΔW , określono wartości rozkładu wypadkowego $W(x)$ dla różnych wartości parametru k .

Wartości rozkładu wypadkowego $W'(x)$ anhydrytu przedstawia tabela IV. (Podane w tabeli IV wartości x są średnimi rozmiarami cząstek w odpowiednim przedziale).

Jak to uzasadniono w rozdziale 5 rozkład wypadkowy $W'(x)$ tworzy na papierze pół logarytmicznym krzywą składającą się z dwóch parabol (rys. nr 12).

Rozkład pierwotny $W_I'(x)$ jest rozkładem, którego udział wyraźnie przeważa w rozkładzie wypadkowym. Zezwala to na dokładniejszą jego analizę w porównaniu z rozkładem wtórnym.

Z tego też względu korzystając z właściwości papieru półlogarytmicznego wyznaczono wartości rozkładu pierwotnego w zakresie wszystkich cząstek pyłu (również i tych przy których występuje rozkład wtórny).

Wartości rozkładu pierwotnego, traktowanego jako rozkład normalny, ucięty lewostronnie (w punkcie $x = 0$) uzyskane z wykresu półlogarytmicznego przedstawione są w tabeli V.

Z kolei celem wyznaczenia udziału p rozkładu wtórnego z rozkładem wypadkowym dane tabeli V przedstawiono w postaci wykresu w układzie współrzędnych prostokątnych (rys. 13).

Droga planimetrowania powierzchni rozkładu pierwotnego F ustala się udział p wg wzoru:

$$p = \frac{100 - \int_0^{\infty} W_I'(x) dx}{100}$$

Rysunek 13 jest wykresem funkcyjnym o równaniach

$$\xi = \alpha \cdot x$$

$$\eta = \beta \cdot W_I'(x)$$

gdzie: α, β są modułami na osiach.

$$\text{W pracy wykorzystano moduły: } \alpha = 100 \frac{[\text{mm}]}{\text{mm}}, \quad \beta = 1 \frac{[\text{mm}]}{\% \text{ mm}^{-1}},$$

gdzie [mm] oznacza podziałkę skali wykresu. Wówczas pole rozkładu pierwotnego $W_I'(x)$ wyznacza wzór

$$\int_0^{\infty} W_I'(x) dx = \frac{1}{\alpha \beta} \int_0^{\infty} \eta d\xi = \frac{1}{100} \int_0^{\infty} \eta d\xi \%$$

Tabela III

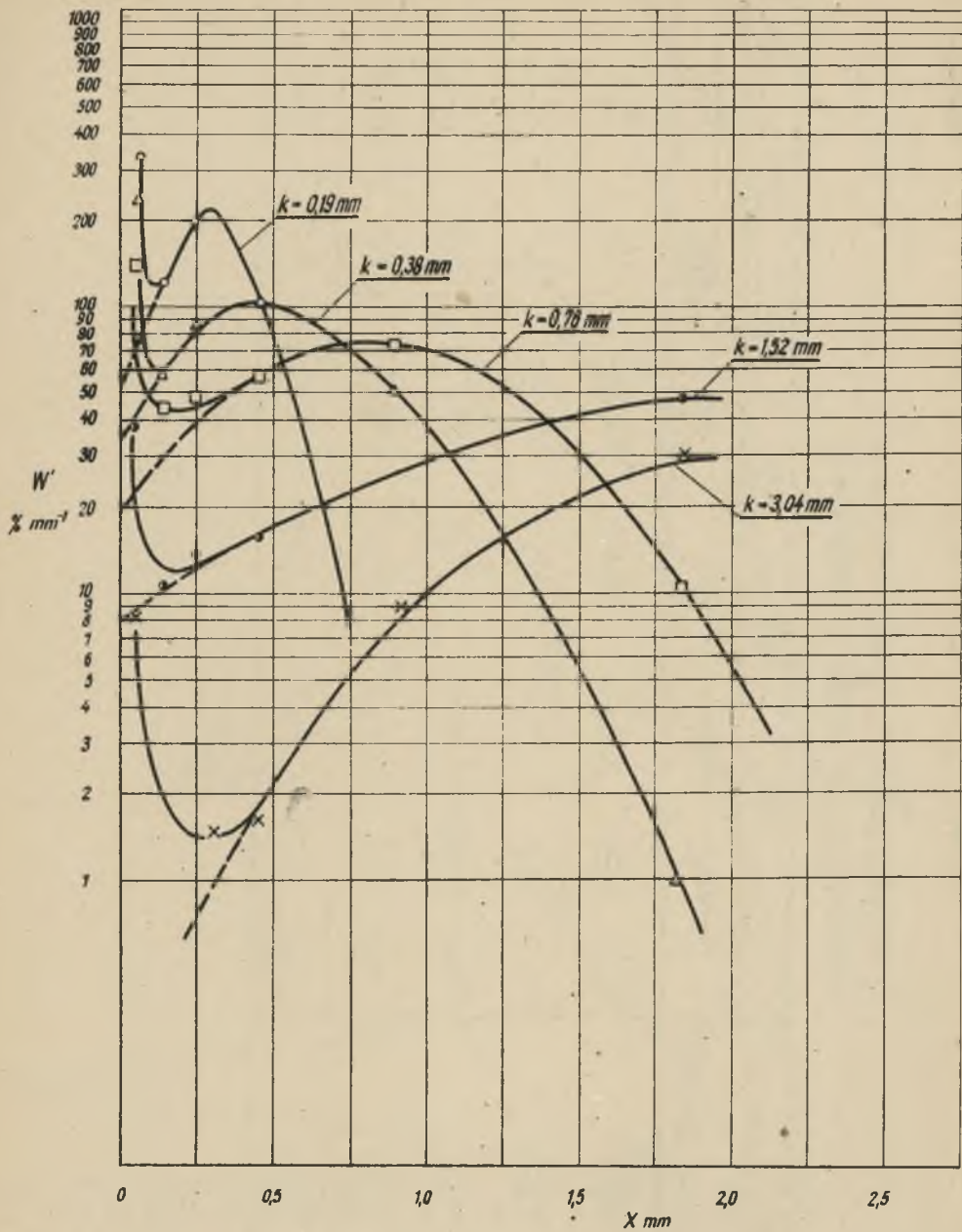
Średnie przepadości sitowe $W(x)\%$ anhydrytu w zależności od parametru k

Ip.	k mm	$x(\text{mm } 10^{-3})$								
		0	89	152	295	599	1204	2411		
a	0,19	ΔW	{	15,63	3,56	13,74	15,38	1,51	0,0	
			%	31,3	7,2	27,5	30,9	3,0	0,0	
b	0,38	ΔW	{	0	31,3	38,5	66,0	96,8	99,8	100,0
			%	10,9	1,76	6,4	13,8	15,8	0,6	
c	0,76	ΔW	{	21,8	3,5	12,8	27,6	31,7	1,2	
			%	0	21,8	25,3	38,1	65,7	97,4	98,6
d	1,52	ΔW	{	7,0	1,37	3,04	8,95	22,2	7,2	
			%	14,0	2,68	6,82	17,9	44,4	14,4	
e	3,04	ΔW	{	0	14,0	16,7	23,5	41,4	85,6	100,0
			%	1,81	0,33	0,98	2,42	8,31	29,2	
f	1,52	ΔW	{	3,62	0,66	1,96	4,84	16,62	58,4	
			%	0	3,62	4,28	6,24	11,1	27,72	86,6
g	3,04	ΔW	{	0,37	0,0	0,0	0,25	2,87	17,5	
			%	0,74	0,0	0,0	0,50	5,74	45,04	
h	1,52	ΔW	{	0	0,74	0,74	0,74	1,24	6,78	51,82
			%	0	0,74	0,74	0,74	1,24	6,78	51,82

Wartości rozkładu wypadkowego

$$w'(x) = \frac{\Delta w}{\Delta x} \cdot 5 \text{ mm}^{-1}$$

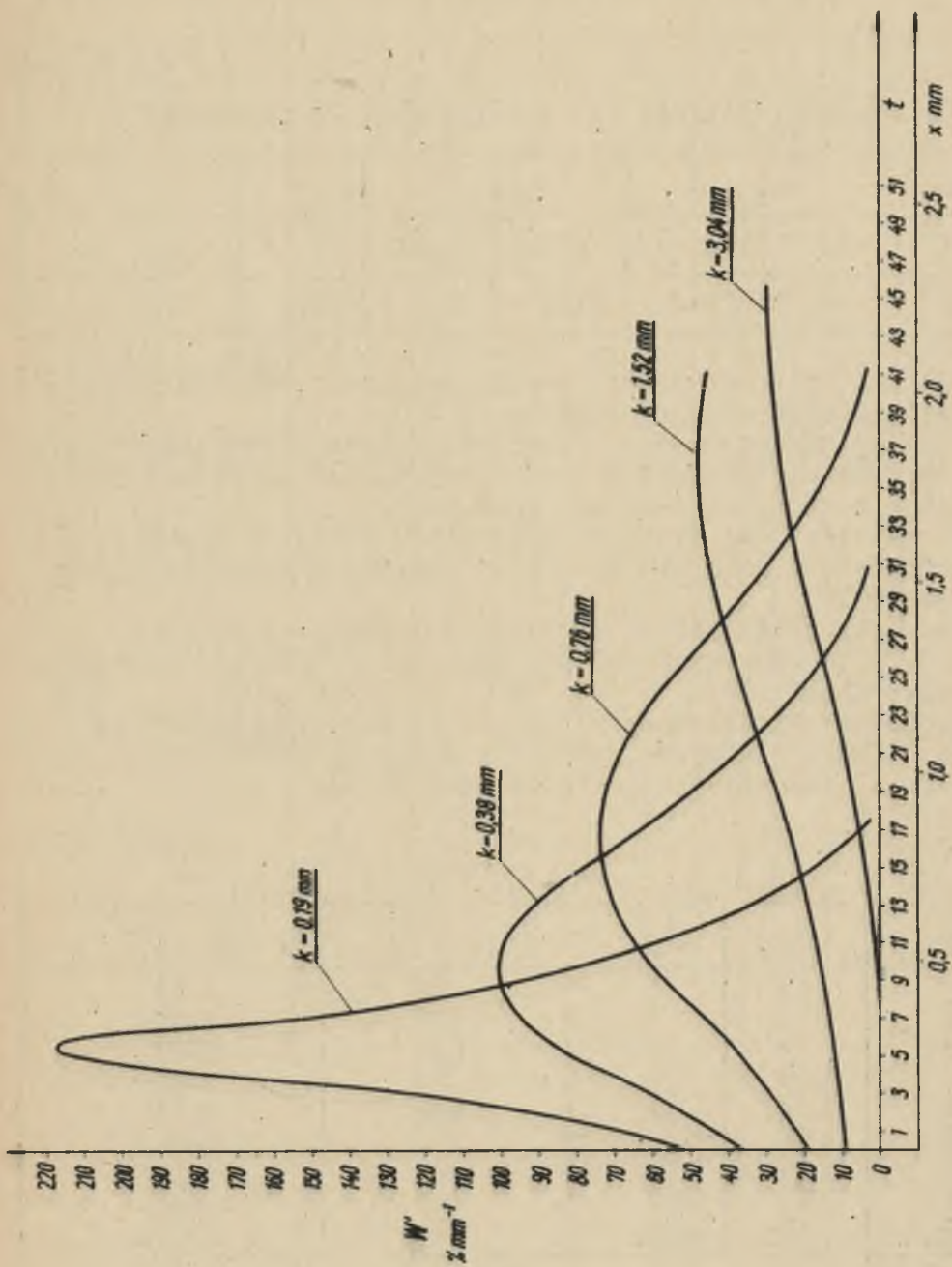
Lp.	k	x mm 10^{-3}	w									
			0	89	152	295	599	1204	2411	1207		
	Δx mm 10^{-3}	89	63	143	304	605	1207	2411	4822		9644	19288
a	0,19		352	114,3	192,4	101,4	4,96					0,0
b	0,38		245	55,6	89,5	90,8	52,4					0,99
c	0,76		157,4	42,6	47,7	58,9	73,4					11,93
d	1,52		40,7	10,5	13,7	15,9	27,5					48,4
e	3,04		8,3	0,0	0,0	1,65	9,5					40,4



Rys. 12. Rozdział rozkładu wypadkowego na papierze półlogarytmicznym

Wartość rozkładu $W'_I(x)$ % mm^{-1}
 pierwotnego, uciętego i niepełnego

Lp.	k	x mm 10^{-3}	0	89	152	295	599	1204	2411
		mm X_{gr} , mm 10^{-3}	44,5	120	223	447	898	1811	
a	0,19		52,0	71,0	115,0	190,0	104,0	1,4	0,0
b	0,38		34,0	42,5	57,0	77,0	100,0	53,0	1,0
c	0,76		19,0	23,0	28,5	37,0	59,0	74,0	11,8
d	1,52		8,4	9,1	10,5	12,2	16,5	27,0	49,0
e	3,04		0,2	0,25	0,37	0,64	1,8	8,5	29,0



Rys. 13. Przebieg rozkładu pierwotnego

Wartość udziału p rozkładu wtórnego w rozkładzie wypadkowym dla różnych wartości parametru k przedstawia tabela VI.

Tabela VI

Wartości udziału p w zależności od parametru k

nr	a	b	c	d	e
k mm	0,19	0,38	0,76	1,52	3,04
p %	27,0	21,0	17,5	6,5	6,0

Rozkład pierwotny jest aproksymowanym rozkładem normalnym uciętym lewostronnie w punkcie $x = 0$.

Posługując się metodą Fischera opisaną w rozdziale 5 pracy określa się parametry charakterystyczne rozkładów pierwotnych przedstawionych na rysunku 13.

W metodzie tej nie jest przeszkodą fakt, że rozkłady nie są rozkładami pełnymi, to znaczy takimi, których pole jest równe 100%.

Oś odciętych wykresu podzielona została na odcinki $t = 0,05$ mm oznaczone kolejno numerami 1,2,3,4... tworzącymi nową skalę t .

Poniżej przedstawiono 4 tabele VIIa,b,c,d zawierające dane służące dla wyznaczenia wielkości charakterystycznych S , SS , n dla różnych wartości parametrów.

Tabela VIIa

$k = 0,18$ mm

W'_{ii}	t_i	t_i^2	$W'_{ii} \cdot t_i$	$W'_{ii} \cdot t_i^2$
69	1	1	69	69
131	3	9	393	1179
209	5	25	1045	5225
167	7	49	1169	8183
106	9	81	954	8586
70	11	121	770	8470
43	13	169	559	7267
24	15	225	360	5400
8	17	289	136	2312

$n = 827$

$S = 5455$

$SS = 46.691$

$$k = 0,38 \text{ mm}$$

W_{Ti}	t_i	t_i^2	$W'_{Ti} \cdot t_i$	$W'_{Ti} \cdot t_i^2$
44	1	1	44	44
61	3	9	183	549
80,5	5	25	402,5	2012,5
93,5	7	49	654,5	4581,5
100,0	9	81	900	8100
99	11	121	1089	11979
91	13	169	1183	15379
77	15	225	1155	17325
62	17	289	1054	17918
48	19	361	912	17328
36,5	21	441	766,5	16096,5
26	23	529	598	13754
18	25	625	450	11250
11	27	729	297	8019
5,5	29	841	159,5	4625,5
2	31	961	62	1922
0	33	1089	0	0

$$n = 855,0$$

$$S = 9910,0$$

$$150882,5 = SS$$

$$k = 0,76 \text{ mm}$$

W'_{Ii}	t_i	t_i^2	$W'_{Ii} \cdot t_i$	$W'_{Ii} \cdot t_i^2$
22,5	1	1	22,5	22,5
30	3	9	90	270
38,5	5	25	192,5	962,5
47	7	49	329	2303
57,5	9	81	517,5	4657,5
65	11	121	715,0	7865,0
70	13	169	910	11830
73	15	225	1095	16425
74	17	289	1258	21386
72	19	361	1368	25992
68	21	441	1428	29988
62	23	529	1426	32798
53	25	625	1325	33125
45	27	729	1215	32805
37	29	841	1073	31117
29	31	961	899	27869
21	33	1089	693	22869
15	35	1225	525	18375
10	37	1369	370	13690
6	39	1521	234	9126
3,5	41	1681	143,5	5835
1,5	43	1849	64,5	2773,5
0	45	1980	0	0

$$n = 900,5$$

$$S = 15893,5$$

$$352084 = SS$$

Tabela VIId

 $k = 1,52 \text{ mm}$

W'_{ii}	t_i	t_i^2	$W'_{ii} \cdot t_i$	$W'_{ii} \cdot t_i^2$
9,5	1	1	9,5	9,5
11	3	9	33	99
12	5	25	60	300
14	7	49	98	686
15,5	9	81	139,5	1255,5
18	11	121	198	2178
20	13	169	260	3380
22	15	225	330	4950
24,5	17	289	416,5	7080,5
27,5	19	361	525	9927
31,5	21	441	661,5	13671
35	23	529	805	18515
38	25	625	950	23750
41	27	729	1107	29889
43	29	841	1247	36163
45	31	961	1395	43245
47	33	1089	1551	51183
48	35	1225	1680	58800
49	37	1369	1813	67087
47	39	1521	1833	71487
45	41	1681	1845	75645
43	43	1849	1849	79507
41	45	1980	1845	81180
38	47	2209	1786	83942
35	49	2401	1715	84035
31,5	51	2601	1606,5	81931,5
27,5	53	2809	1457,5	77247,5
24,5	55	3025	1347,5	74112,5
22	57	3249	1254,5	71478
20	59	3481	1180	69620
18	61	3721	1098	66978
15,5	63	3969	965	61519,5
14	65	4225	910	59150
12	67	4489	804	53868
11	69	4761	759	52371
9,5	71	5041	674,5	47899
8	73	5329	584	42632
7	75	5625	525	39375
5,5	77	5929	423,5	32609,5
4	79	6241	316	24964
3	81	6561	243	19683
2	83	6889	166	13778
1	85	7225	85	7225
0	87	7569	0	0

 $n = 1036,5$ $S = 38559,5$ $1744401 = SS$

Posługując się wyznaczonymi wartościami n , S , SS przy użyciu tabel Fischera [15] wyznaczono wartości funkcji z , $g(z)$ a następnie parametry a_I , σ_I oraz stopień ucięcia $W_I^*(c)$. Dane te zawiera tabela VIII. Przebieg dystrybuanty $W_I^*(x)$ oraz $W_I(x)$ przedstawiony jest na papierach normalnych rys. 14a,b,c,d,e.

Następnie wyznaczone zostały parametry rozkładu wtórnego a_{II} , σ_{II} . Z powodu zbyt szczupłej ilości punktów pomiarowych odtworzenie rozkładu wtórnego wg metody Danó nie było możliwe. Przebieg rozkładu odtworzono szacunkowo prowadząc prostą dystrybuantę pyłu przez punkt $x = a_{II}$ leżący na linii 50% papieru normalnego oraz stycznie do dystrybuanty pyłu wypadkowego. Punkty $x_i = (a_{II})_i$ są punktami przecięcia dystrybuant pyłu wypadkowego (rys. 15).

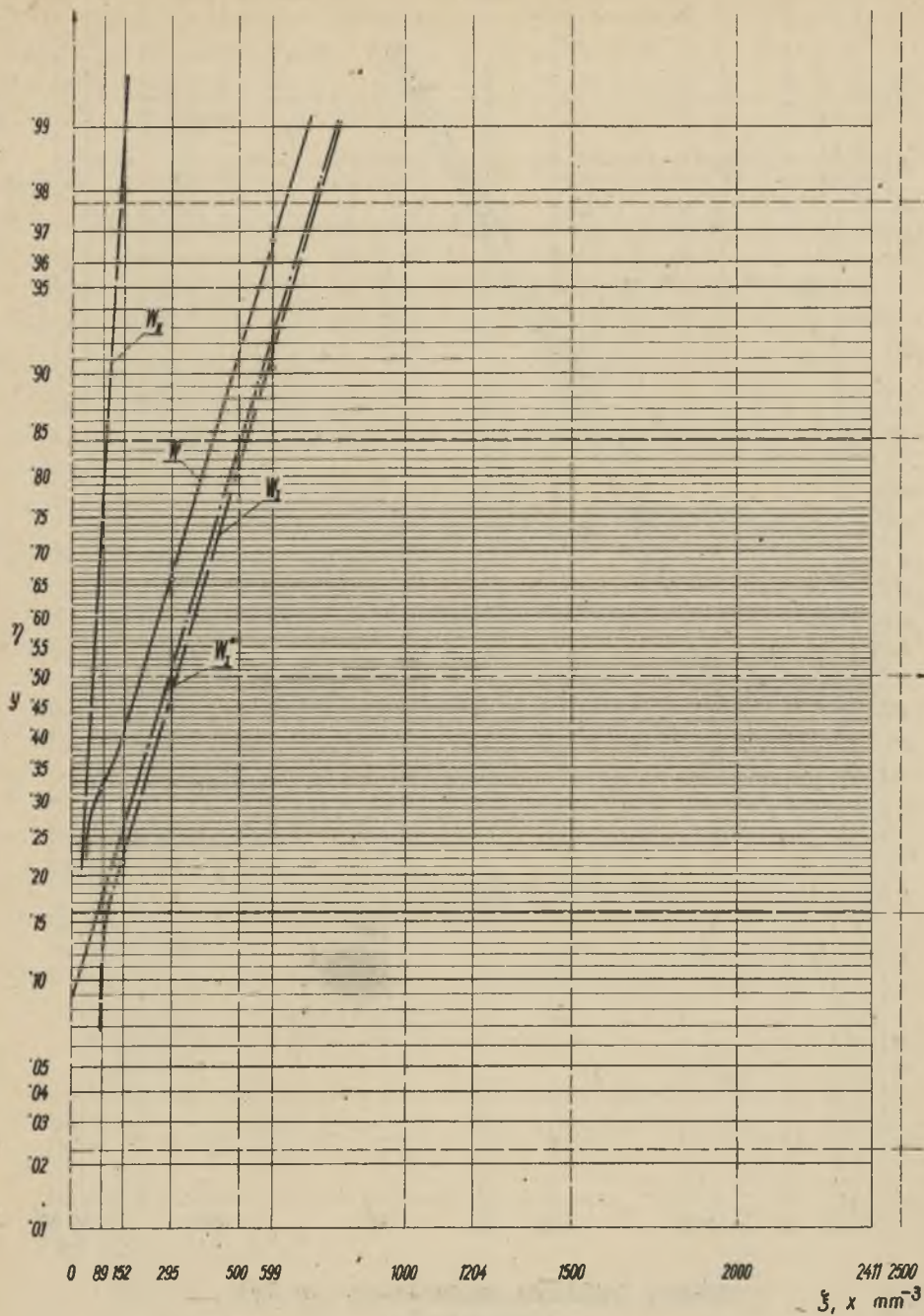
Wartości parametrów pyłu wtórnego a_{II} , σ_{II} zawiera tabela IX.

Tabela IX

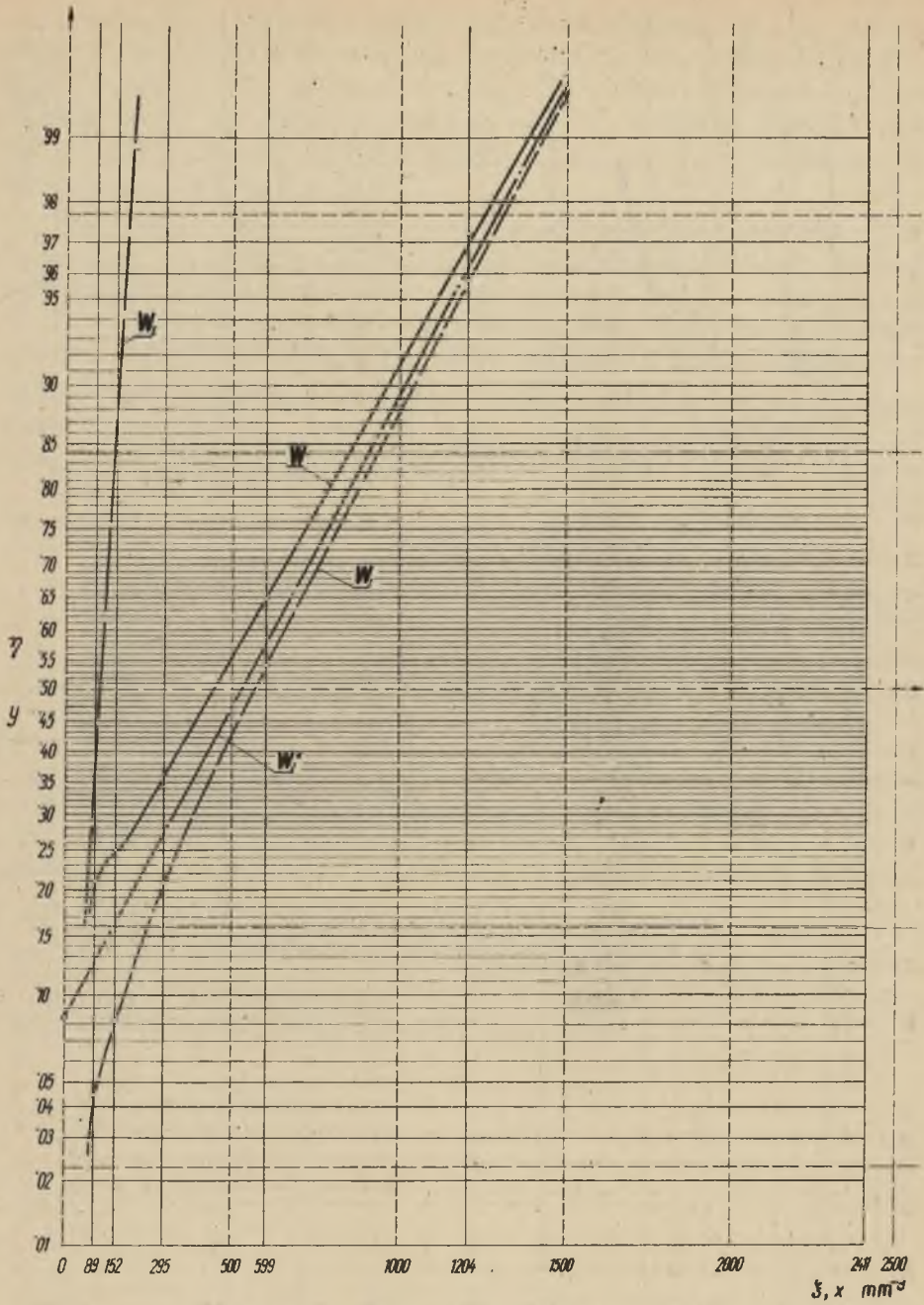
Wartości a_{II} , σ_{II} w zależności od parametru k

nr	a	b	c	d	e
k mm	0,19	0,38	0,76	1,52	3,04
a_{II} mm 10^{-3}	71,5	100,5	143	214	-
σ_{II} mm 10^{-3}	39,2	51,0	64,2	75,2	-

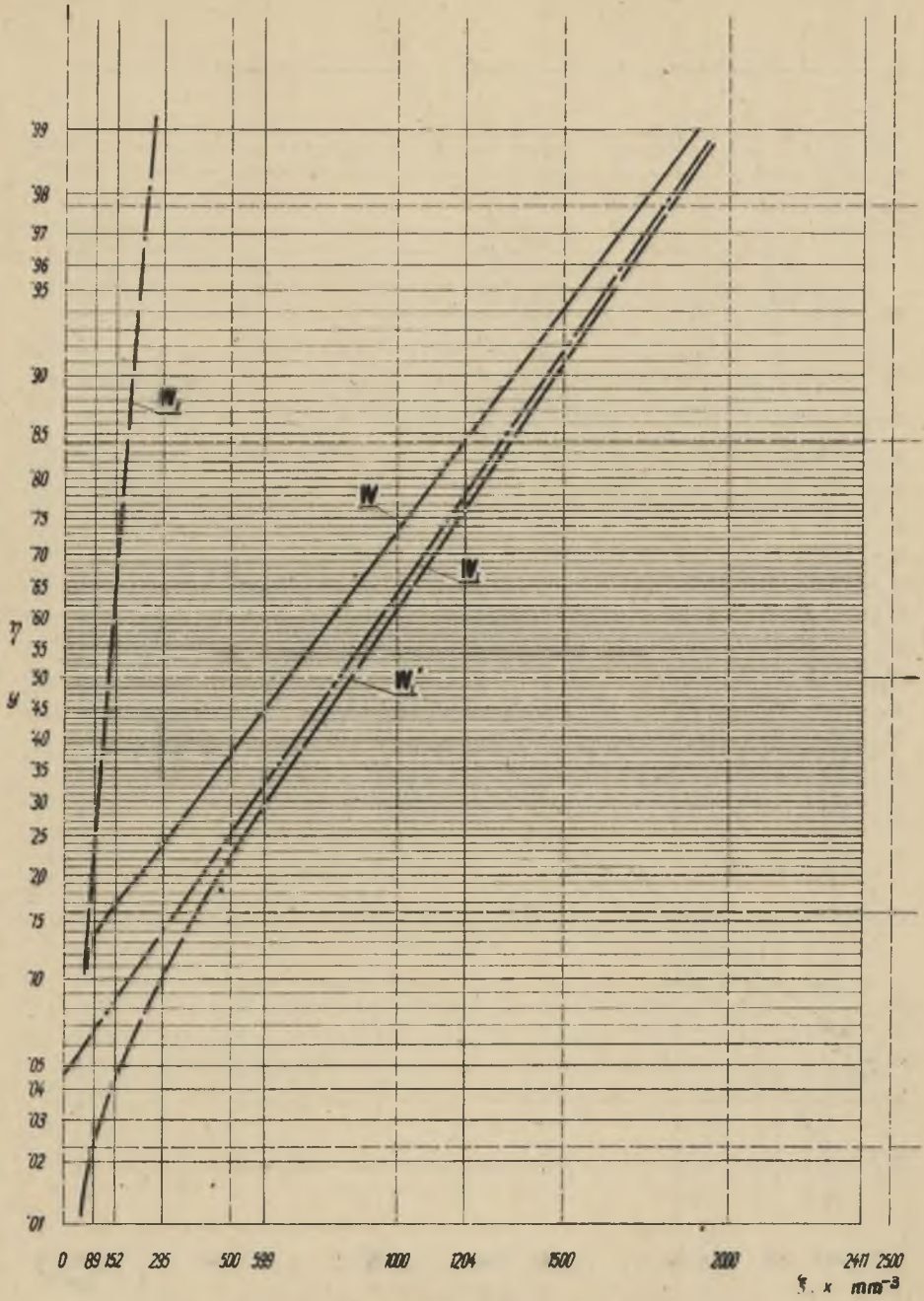
Przebieg dystrybuanty $W_{II}(x)$ odtworzony jest na papierach normalnych rys. 14,a,b,c,d.



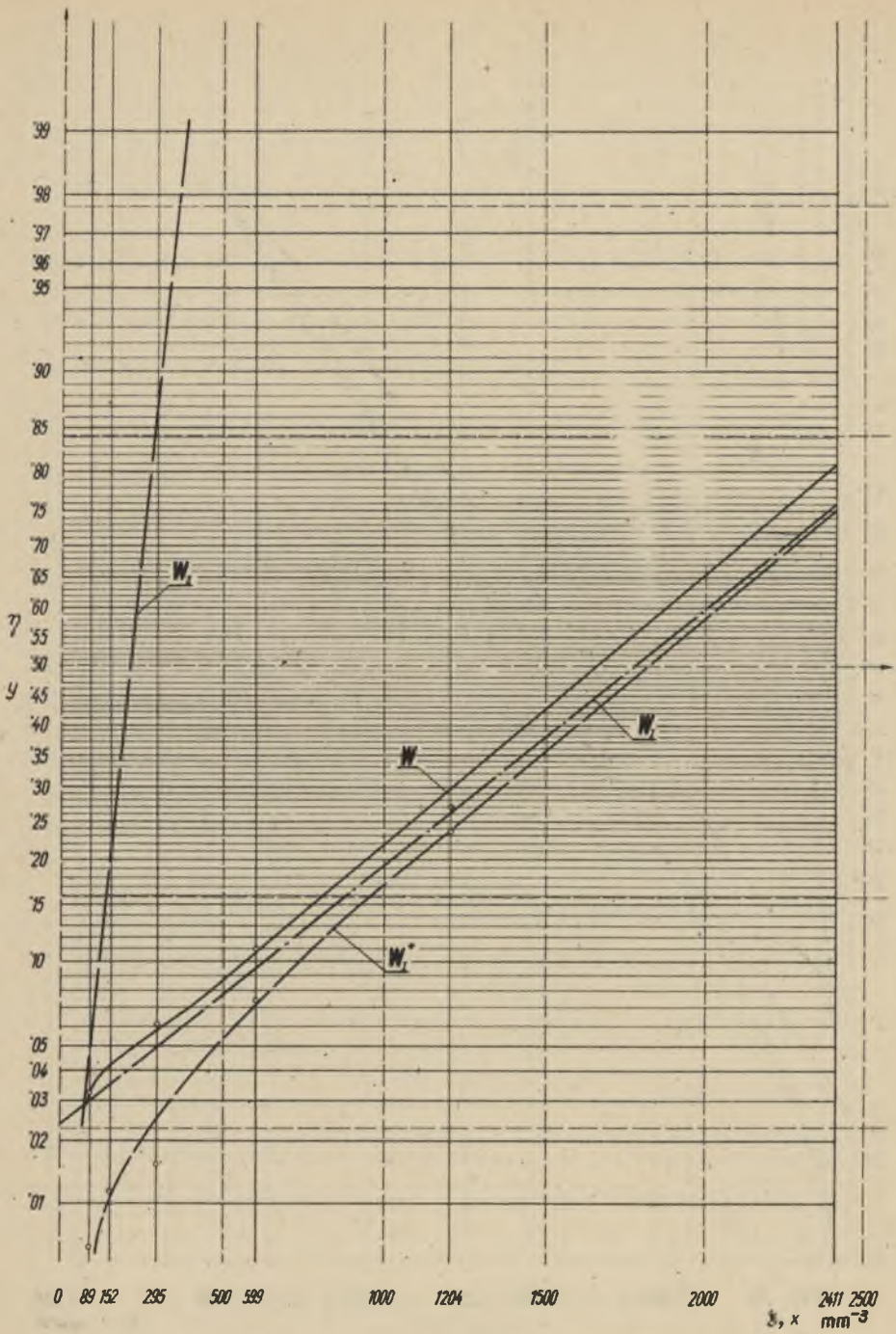
Arkusz papieru normalnego nr 14a
($k=0,19 \text{ mm}$)



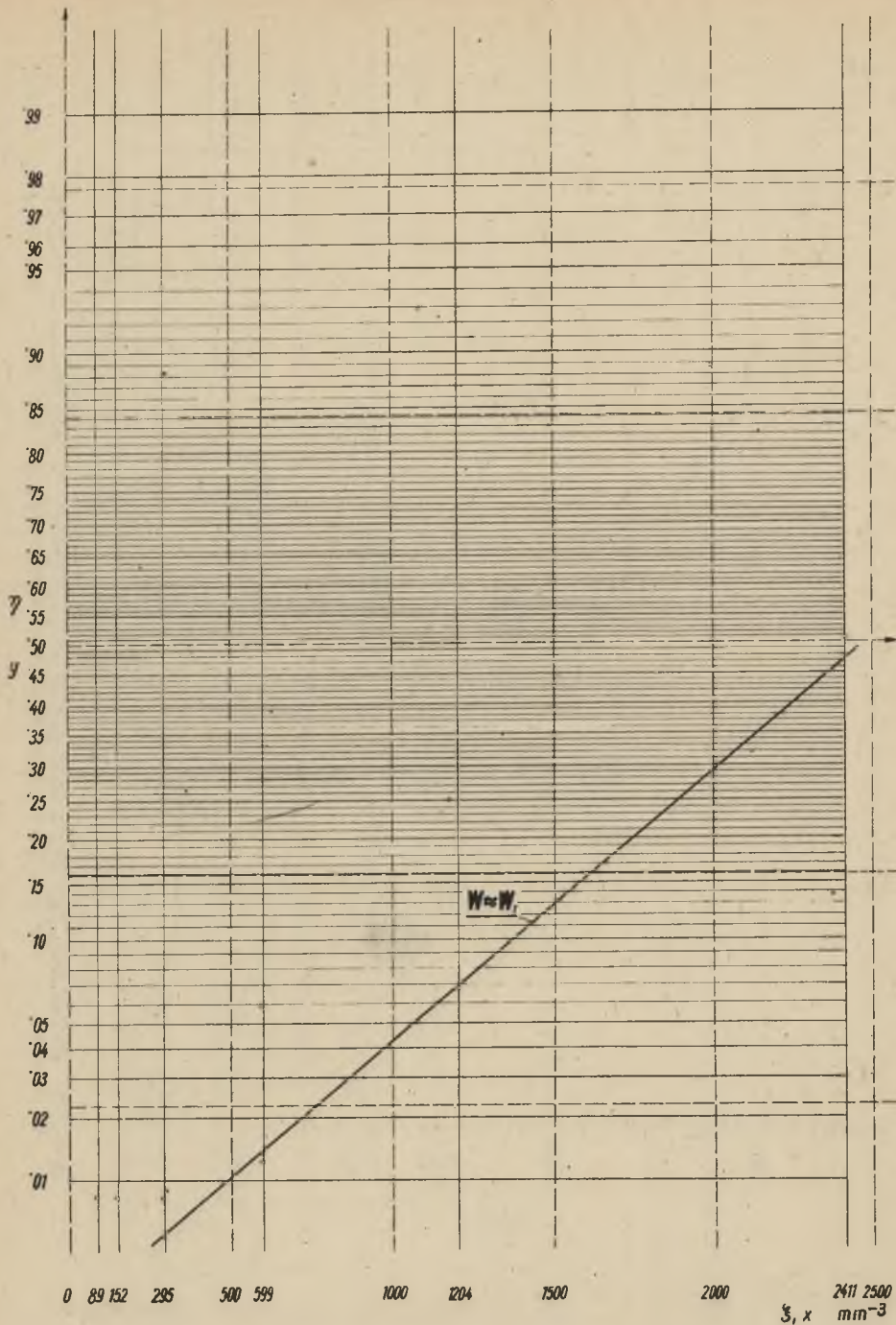
Arkusz papieru normalnego nr 14b
 ($k=0,38$ mm)



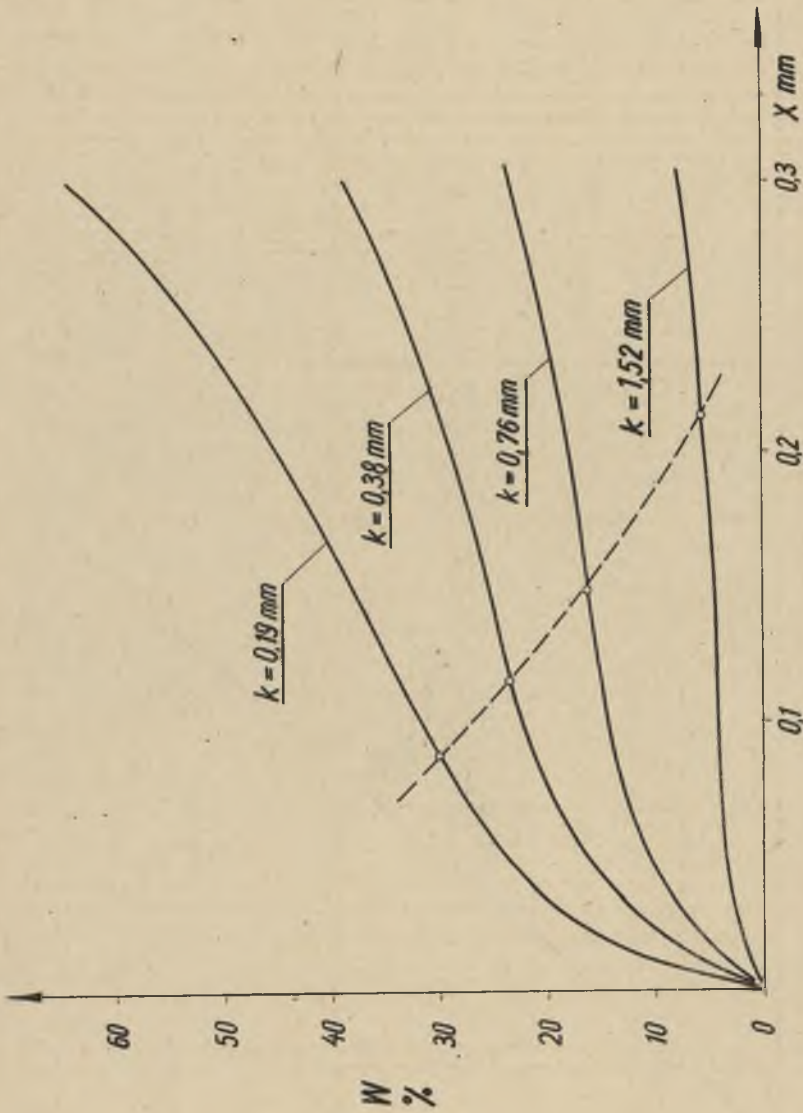
Arkusz papieru normalnego nr 14c
($k=0,76 \text{ mm}$)



Arkusz papieru normalnego nr 14d
(k=1,52 mm)



Arkusz papieru normalnego nr 14e
($k = 3,04$ mm)



Rys. 15. Przebieg dystrybuant pyłu wypadkowego w zakresie $0 < x < 300\mu$

Wartości stopnia ucięcia $W_I(o)$ %
 oraz parametrów a_I , σ_I rozkładu pierwotnego

Ip.	k mm μ mm ⁻¹	n mm μ mm ⁻¹	S % mm ⁻¹	SS [% mm ⁻¹] ²	y	$z \frac{\Sigma a_I}{\sigma_I}$ ($-\frac{a_I}{\sigma_I}$)	ξ	σ mm 10^{-3}	a_I mm 10^{-3}	$W_I(o)$ %
a	0,19	823	5431,5	46431,0	0,648	- 1,452	0,625	206	299	7,33
b	0,38	855	9910,0	150882,5	0,655	- 1,373	0,648	376	516	8,49
c	0,76	900,5	15893,5	352084,0	0,629	- 1,678	0,560	494	829	4,67
d	1,72	1036,5	38559,5	1744401,0	0,609	- 1,942	0,493	918	1782	2,61
e	3,04	-	-	-	-	-	-	835	2600	0,10

W tabeli X zestawione zostały wartości wszystkich 5 parametrów pyłu p , a_I , σ_I , a_{II} , σ_{II} w zależności od wartości k .

Tabela X

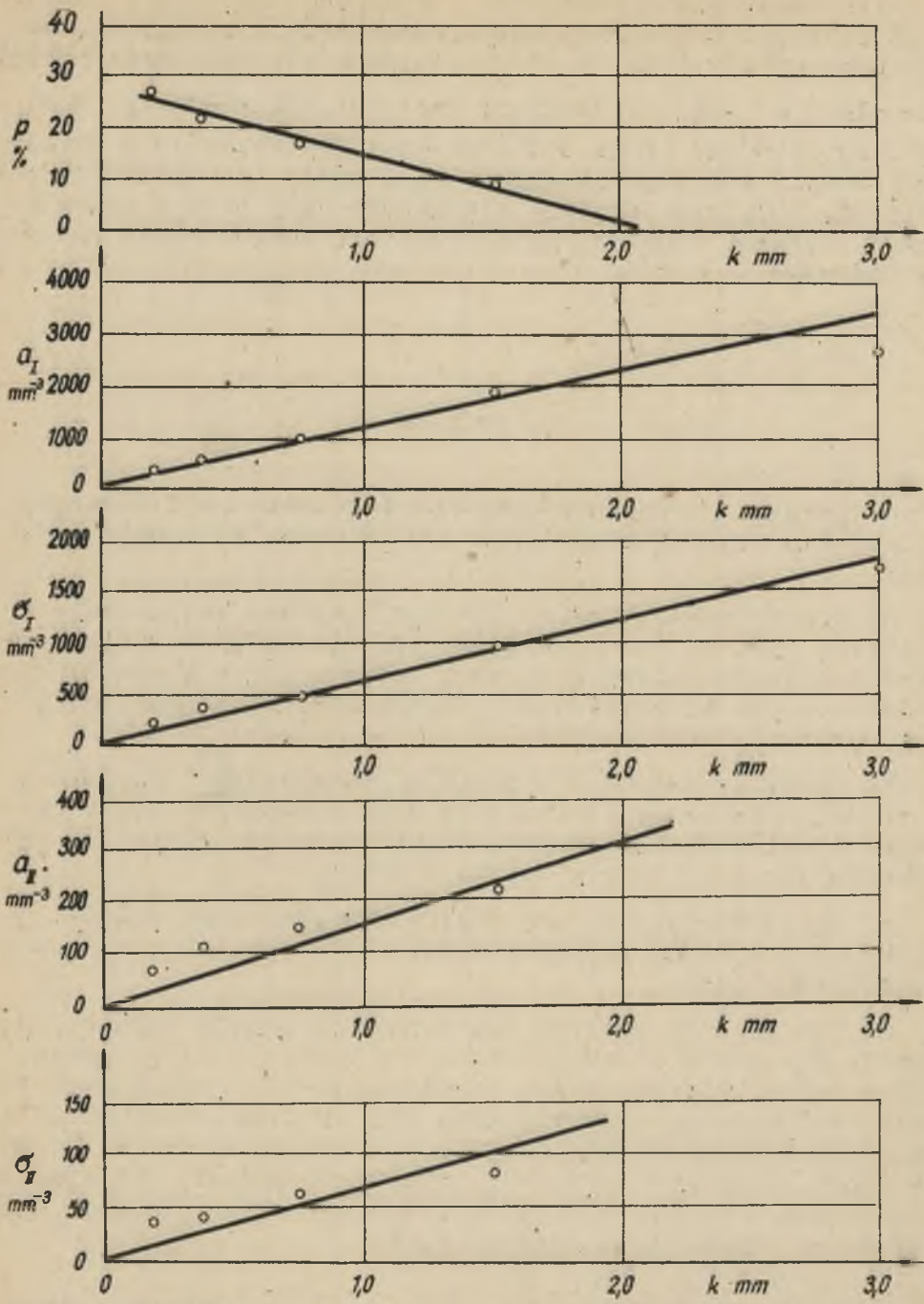
Zestawienie parametrów pyłu wypadkowego

nr		a	b	c	d	e
k	mm	0,19	0,38	0,76	1,52	3,04
p		0,27	0,21	0,175	0,065	0,0
a_I	mm 10^{-3}	299	516	829	1782	2600
σ_I	mm 10^{-3}	206	376	494	918	1690
$W_I(0)$	%	7,33	8,49	4,67	2,61	0,10
a_{II}	mm 10^{-3}	71,5	100,5	143	214	-
σ_{II}	mm 10^{-3}	39,2	45,0	64,2	75,2	-

Dane te posłużyły do sporządzenia wykresu (rys.16). W miarę zmniejszania się parametru k wzrasta udział pyłu wtórnego p . Maleje natomiast średnia wartość a_I oraz σ_I pyłu pierwotnego. Również rozkład wtórny charakteryzuje się zmniejszaniem parametrów a_{II} i σ_{II} w miarę postępu rozdrabniania.

Na podstawie danych tabeli VIII wpływ parametrów k na p , a_I , σ_I , a_{II} , σ_{II} można wyrazić w postaci następujących równań liniowych

$$\left. \begin{aligned} p_1 &\approx 29 - 12,8 \cdot k \\ a_I &\approx 1225 \cdot k \\ \sigma_I &\approx 615 \cdot k \\ a_{II} &\approx 200 \cdot k \\ \sigma_{II} &\approx 80 \cdot k \end{aligned} \right\} 0,19 \text{ mm} < k < 3,04 \text{ mm}$$



Rys.16. Wartości p_1 , a_I , σ_I , a_{II} , σ_{II} rozkładu wypadkowego an-1 hydrytu w zależności od parametru k

Przeprowadzono sprawdzenie dokładności uzyskanych rezultatów. Na podstawie znajomości parametrów: p , a_I , σ_I , a_{II} , σ_{II} oraz wzorów (11a) - (19) posługując się tabelami funkcji normalnej $\Phi(-\frac{a}{\sigma})$ wyznaczono wartości dystrybuanty $W(x)$ pyłu wypadkowego drogą analityczną i porównano je z założonymi danymi eksperymentalnymi. Porównanie to uwidacznia tabela XI. Daje się zauważyć stosunkowo duży błąd w zakresie małych cząstek spowodowany przybliżoną aproksymacją rozkładu wtórnego.

6. WNIOSKI

W oparciu o przeprowadzone doświadczenia oraz związane z nimi teoretyczne rozważania wysnuć można następujące wnioski:

a) Charakterystyka $R(x)$ lub $W(x)$ używana powszechnie w technice pyłowej dla określania stopnia rozdrabniania pyłu jest w ogólnym przypadku krzywą całkową (dystrybuantą) niejednego - jak to przyjmowano dotychczas, lecz conajmniej dwu rozkładów składowych.

b) Rozkłady składowe zmieniają swe udziały i parametry w trakcie procesu rozdrabniania przemieszczając się w kierunku cząstek drobniejszych. Zjawisko to dla przypadku pyłu dwuskładowego opisano w dziale 4 pracy.

c) Charakterystyka pyłu $R(x)$ wzgl. $W(x)$ jest zależna nie tylko od materiału rozdrabnianego, lecz również i od sposobu rozdrabniania.

d) Dla każdego procesu rozdrabniania należy wyróżnić parametr charakterystyczny kruszarki, będący funkcją czasu, przez zmianę którego można regulować stopień rozdrabniania pyłu. W przypadku rozpatrywanym jest nim szerokość szczeliny między walcami. Zakłada się, że parametrem tym może być np. prędkość przepływu powietrza przez młyn otwarty lub czas rozdrabniania w młynie zamkniętym względnie inna wielkość wpływająca na technologię rozdrabniania.

Porównanie wartości dystrybuantry $V(x)$ wyznaczonej eksperymentalnie
z danymi otrzymanymi analitycznie

Nr	k mm	x mm 10^{-3}	0	59	152	295	599	1204	2411
a	0,19	dośw.	-	31,3	38,5	66,0	96,8	99,8	100,0
		analit.	-	23,3	41,7	59,8	96,5	100,0	100,0
		błąd	-	-8,0	-3,2	-6,2	-0,3	0,0	0,0
b	0,38	dośw.	-	21,8	25,3	38,1	67,5	97,4	98,6
		analit.	-	12,2	25,5	37,8	64,5	97,4	100,0
		błąd	-	-8,6	+0,2	-0,3	-3,0	0,0	0,0
c	0,76	dośw.	-	14,0	16,7	23,0	41,4	85,6	100,0
		analit.	-	5,1	13,1	25,2	41,4	80,8	98,1
		błąd	-	-8,9	-3,6	+2,2	0,0	-4,2	-2,1
d	1,52	dośw.	-	3,62	4,98	6,24	11,1	27,72	86,6
		analit.	-	0,91	2,46	8,16	13,5	28,90	86,7
		błąd	-	-2,71	-2,82	+2,12	+2,4	+1,18	+0,1
e	3,14	dośw.	-	0,74	0,74	0,74	1,24	6,78	51,82
		analit.	-	0,30	0,44	0,80	1,25	6,70	48,00
		błąd	-	-0,44	-0,30	+0,06	0,00	0,00	-3,82

e) Chcąc określić aktualną charakterystykę pyłu należy ustalić zależność $R(x,k)$ lub $W(x,k)$ określającą przebieg dystrybuanty pyłu wypadkowego w zależności od parametru nastawienia kruszarki.

f) Sposób analitycznego przedstawienia zależności $R(x,k)$ lub $W(x,k)$ dla przypadku rozkładu dwuskładowego przedstawiony został w niniejszej pracy.

g) Rozkład dwuskładowy dzieli się na rozkład właściwy nazwany pyłem pierwotnym i stanowiący większą część pyłu wypadkowego oraz rozkład dodatkowy nazwany pyłem wtórnym. Stwierdzono, że pierwszy rozkład składowy najlepiej można aproksymować rozkładem normalnym uciętym lewostronnie. Natomiast drugi rozkład składowy aproksymuje rozkład normalny nieucięty.

h) Przypuszcza się, że niektóre materiały mogą tworzyć rozkłady wieloskładowe np. trójskładowe. Trzeci rozkład zaobserwowano przy różniczkowaniu dystrybuant anhydrytu. Ze względu na znikomą wielkość nie był brany pod uwagę. Uwzględnianie trzeciego rozkładu powoduje wzrost ilości parametrów określających rozkład wypadkowy z 5-ciu do 8-miu.

i) W doświadczeniach oparto się głównie na rozdrabnianiu anhydrytu i kępka bitumicznego. Materiały te wybrane przez prof. H. Heywooda wykazują wyraźną tendencję do tworzenia rozkładu wieloskładowego w trakcie ich rozdrabniania. Dodatkowo rozdrabniano żwir i szkło. Pierwszy materiał wykazuje znikomo mały rozkład dodatkowy tak, że można go traktować z wystarczającą dokładnością jako rozkład jednoskładowy. Natomiast szkło w trakcie rozdrabniania tworzy dwa wyraźne występujące rozkłady składowe.

j) W doświadczeniach nie był rozdrabniany węgiel kamienny. Opierając się na wynikach innych prac można stwierdzić, że funkcja $R(x)$ pyłu węglowego przedstawiona na papierze normalnym wykazuje w zakresie drobnych cząstek wyraźny wzrost pochyleńa prostej. Świadczy to o tym, że również i pył węglowy można traktować jako pył dwuskładowy.

k) Zaproponowany wzór (9) oraz metoda aproksymacji krzywych doświadczalnych mają charakter ogólny, gdyż w przypadku rozkładu jednoskładowego można go aproksymować rozkładem normalnym, który będzie rozkładem lewostronnie uciętym lub też nieuciętym w zależności od usytuowania go na osi x .

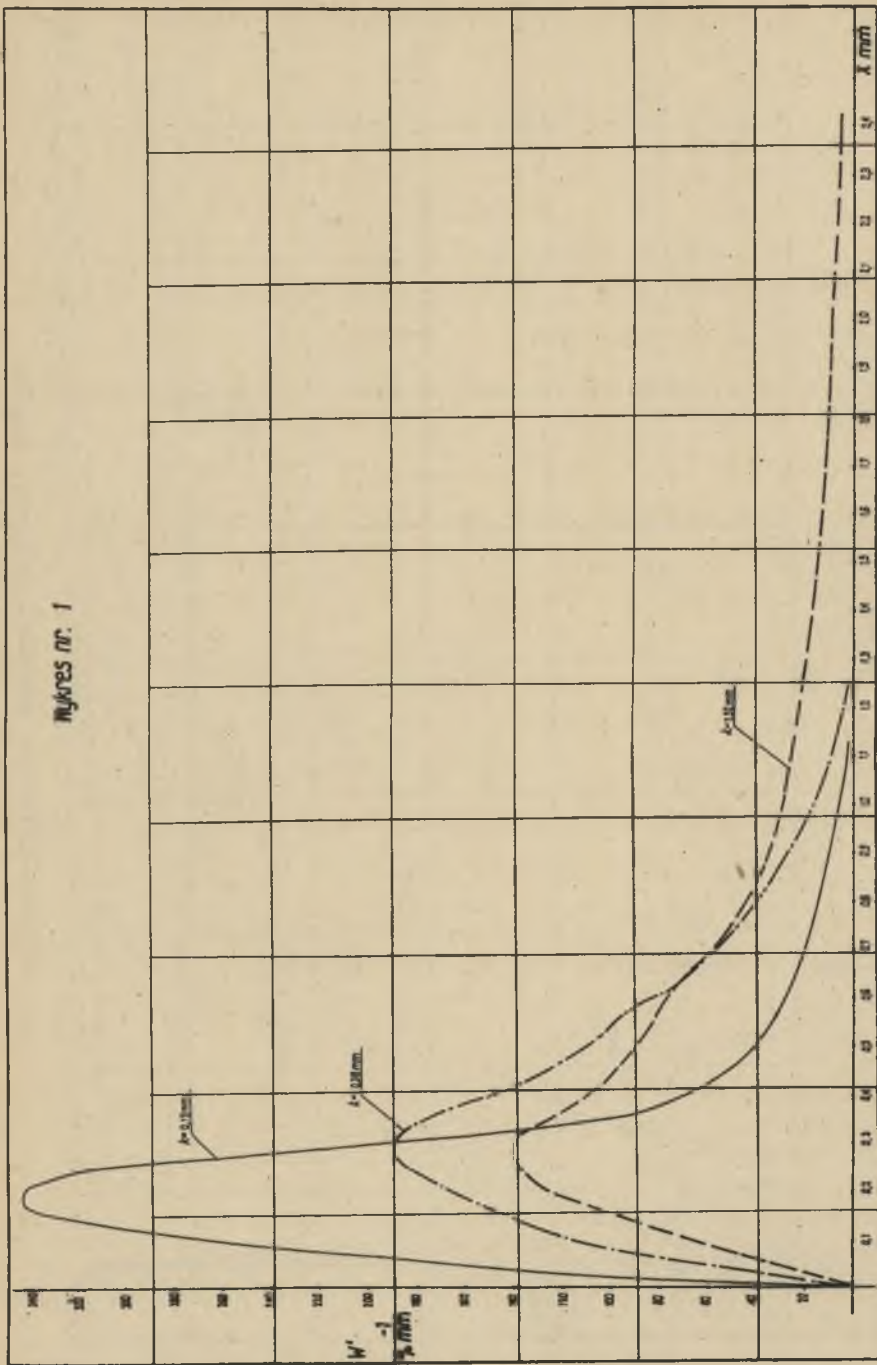
Rozkłady dodatkowe: drugi i ewentualnie trzeci należy uwzględnić wówczas, gdy ich udziały p_1 , p_2 są wystarczająco duże.

Bezpośrednia korzyść jaka wynika z przedstawionej pracy dla gospodarki materiałowej i energetycznej w których występują procesy rozdrabniania ciał stałych polega nie tylko na wyjaśnieniu kinetyki kształtowania się rozkładów cząstek pyłowych lecz również na dokładnej analizie tego zjawiska.

LITERATURA

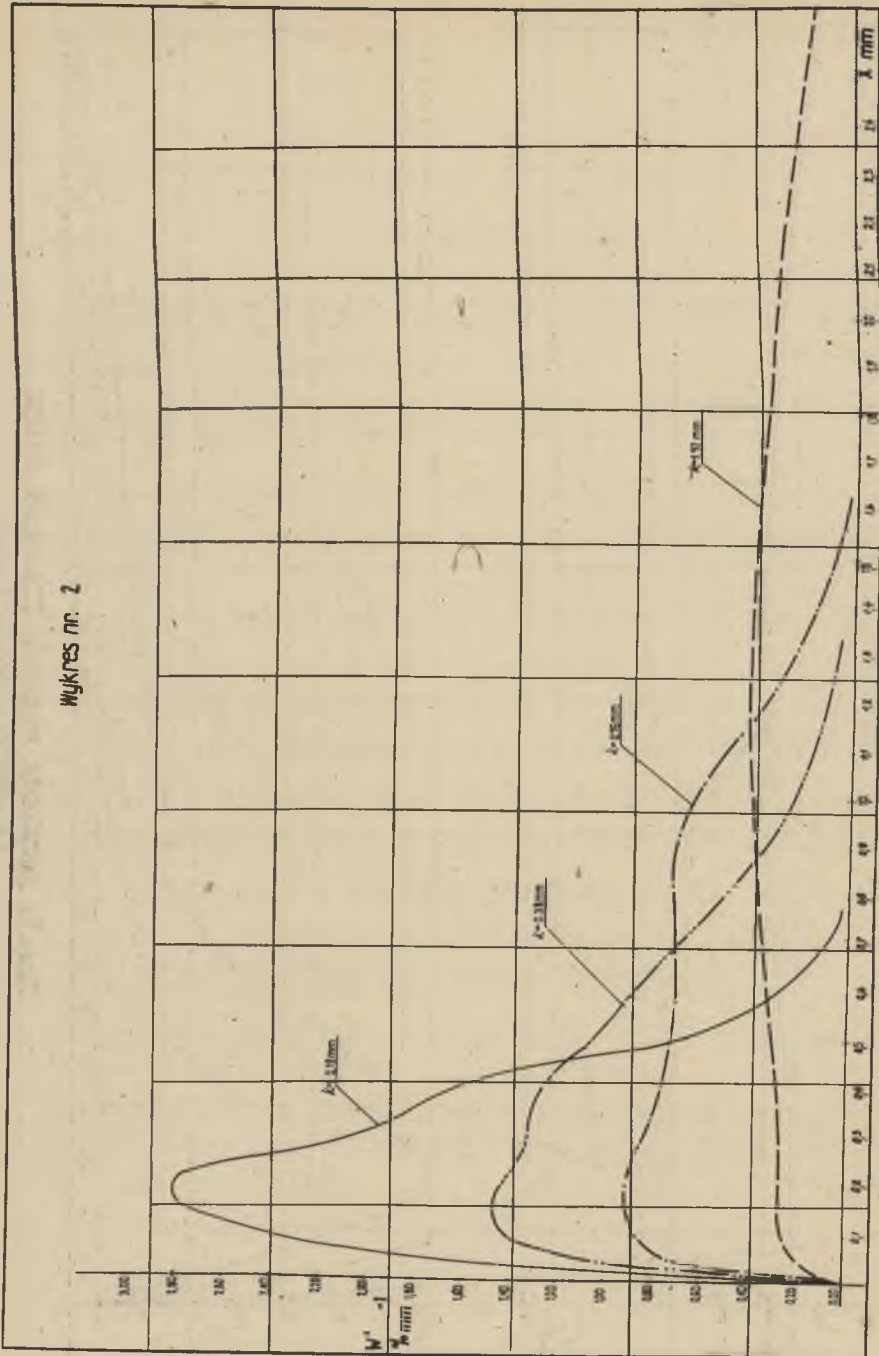
- [1] E.Rammler - Z.V.D.I. Verfahr. Technik S.161, (1937).
- [2] J.Bennet - I.Inst. Fuel 10 (1936).
- [3] W.Anselm - Zerkleinerungstechnik und Staub, DIV Düsseldorf (1949).
- [4] H.Heywood - Proc.Inst.Mechn.Eng., 125 (1933).
- [5] R.Schumann - Trans.Amer.Inst.Min.Eng.Tech.Pap. nr 1189 (1940).
- [6] H.Herdan - Small Particle Statistics Elsevier Pub. Comp. (1953).
- [7] D.J.Douglas - J.Sedim. Petrol 16 (1946).
- [8] A.Beckel - Z. Unters. Lebensmittel 66, 158 (1933).
- [9] W.Batel - Chemie Ing. Technik nr 12 (1956).
- [10] N.Rasumowski - Doklady Ak.Nauk ZSRR - 23 - 815 (1940).
- [11] A.N. Kolmogorow - Doklady Ak. Nauk ZSRR, 31, 2, (1941).
- [12] H.Gebelein - Chemie Ing. Technik nr 12 (1956).
- [13] K.Danø - Ingeniøren 53, E. 13-19 (1944).
- [14] A.Hald - Statistical Theory with Engineering Applications (1952).
- [15] R.A.Fisher - The Truncated Normal Distribution, British Association for the Advancement of Science, Mathematical Tables (1931).

rys. 1



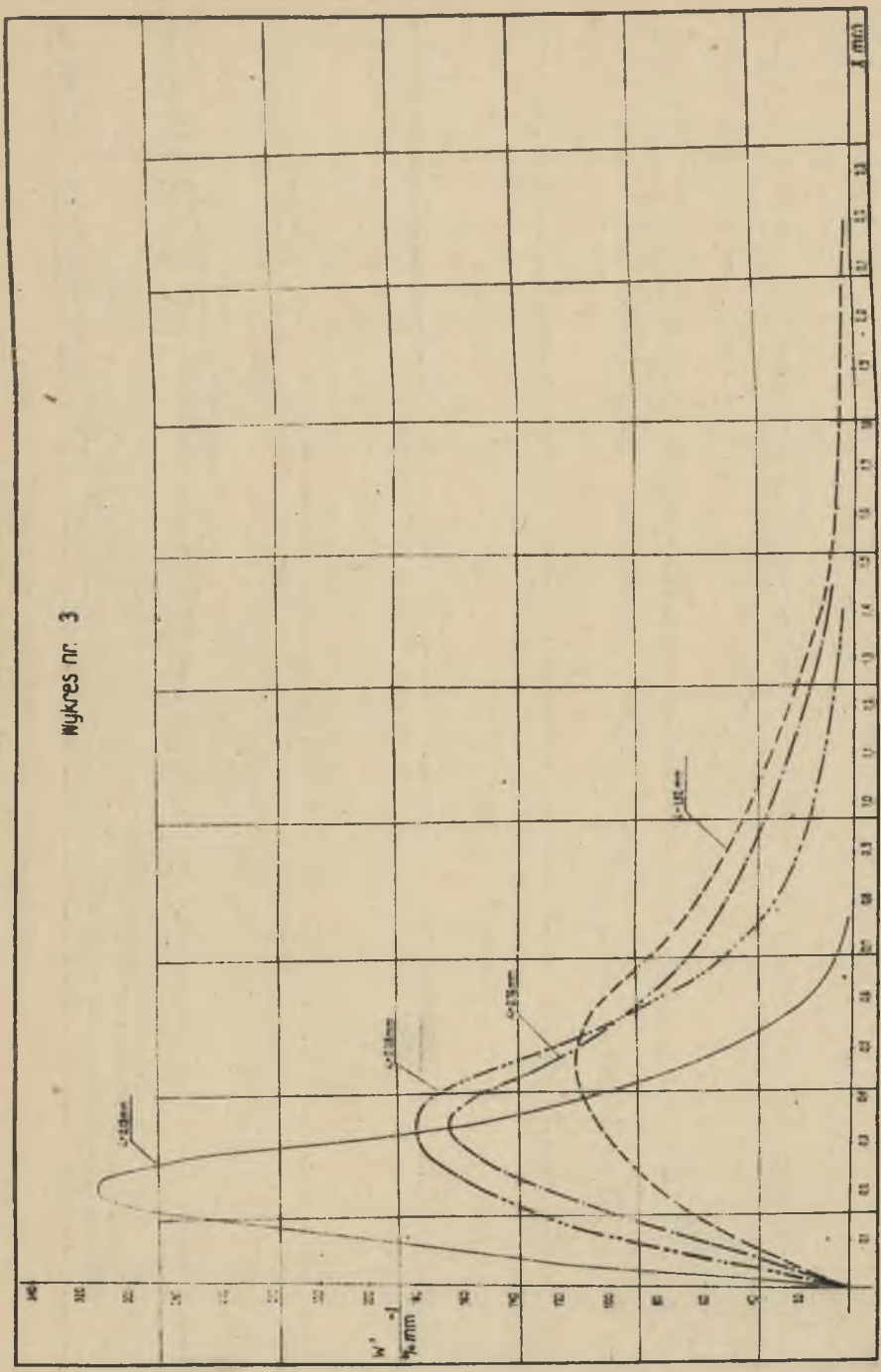
rys. 1. Rozkłady cząstek pyłowych żwiru
(I seria doświadczeń)

WYKRES nr. 2



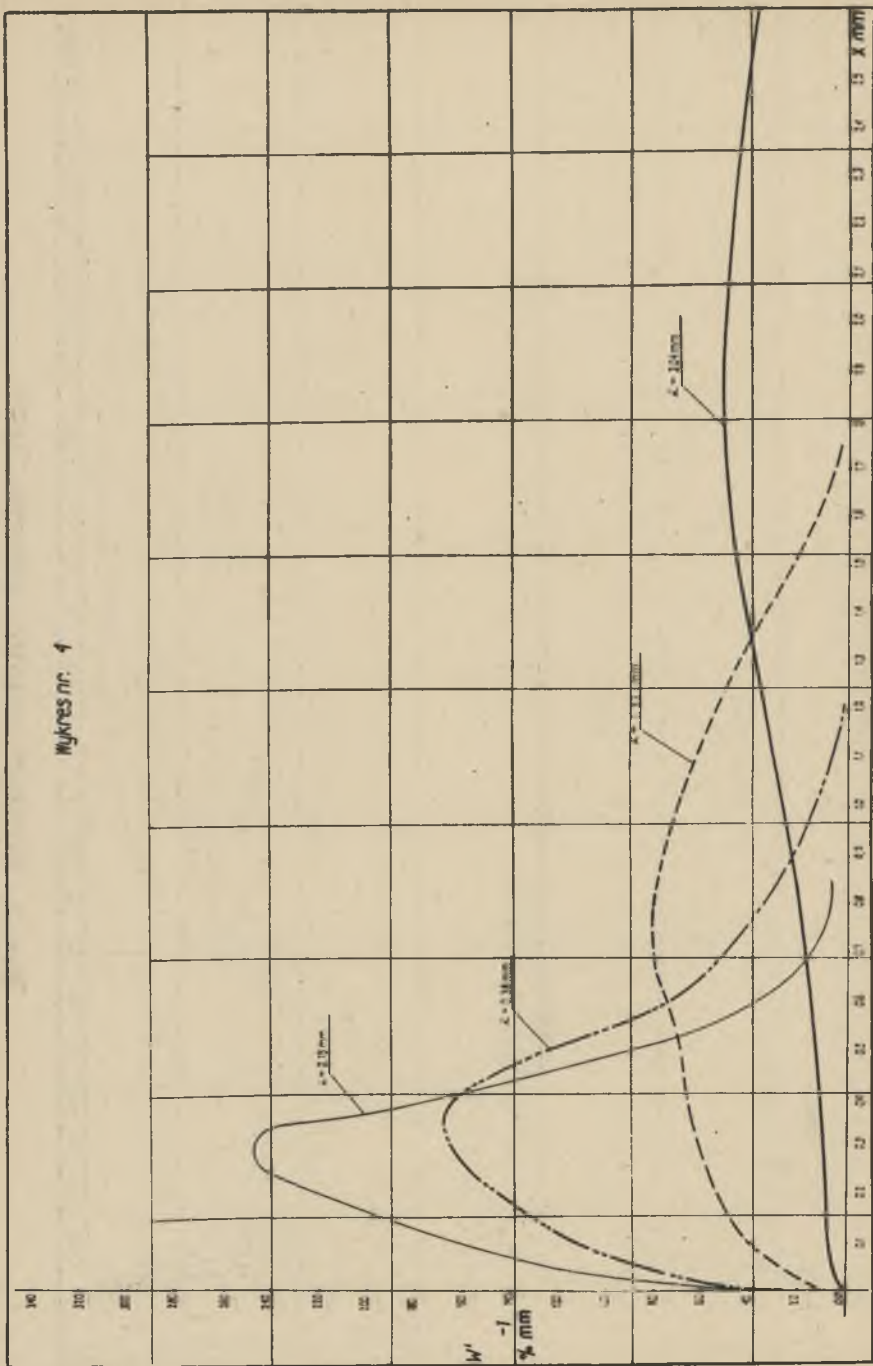
Rys. 2. Rozkłady cząstek pyłowych szkła
(1 seria doświadczeń)

Wykres nr. 3



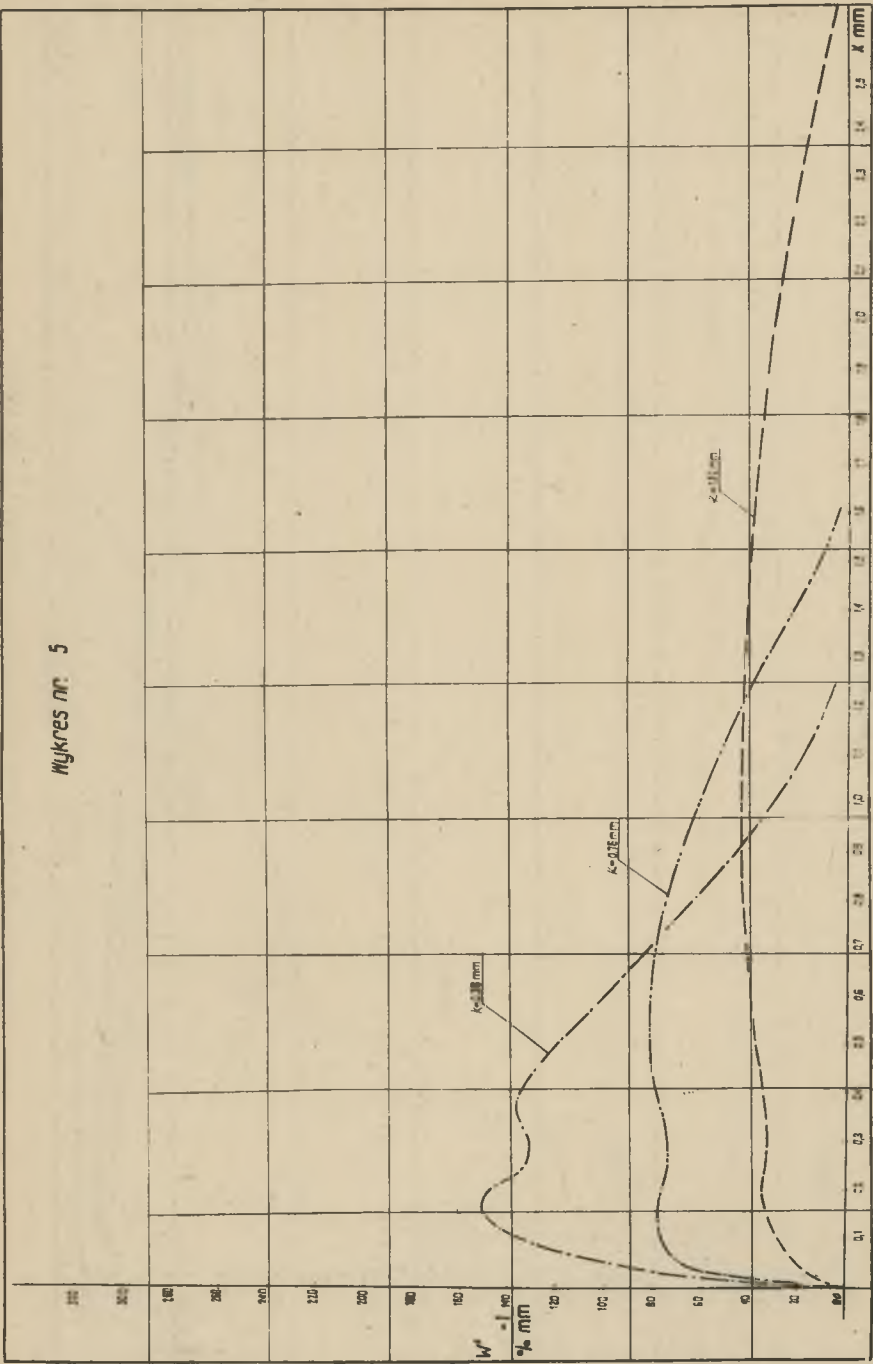
Rys. 3. Rozkłady cząstek pyłowych żwiru
(I seria doświadczeń)

Wykres nr. 4



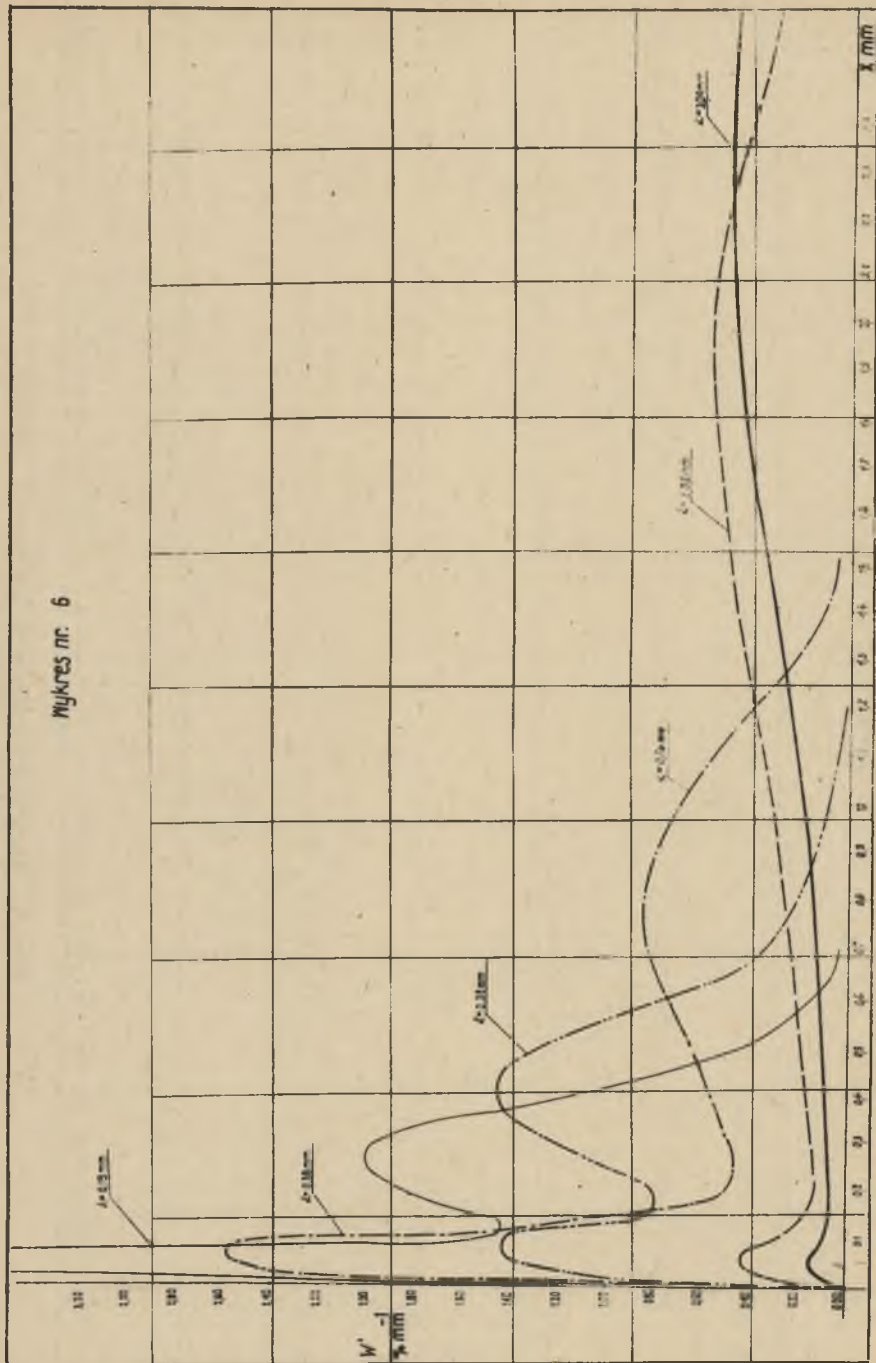
Rys. 4. Rozkłady cząstek pyłowych żwiru (II seria doświadczeń)

Wykres nr. 5



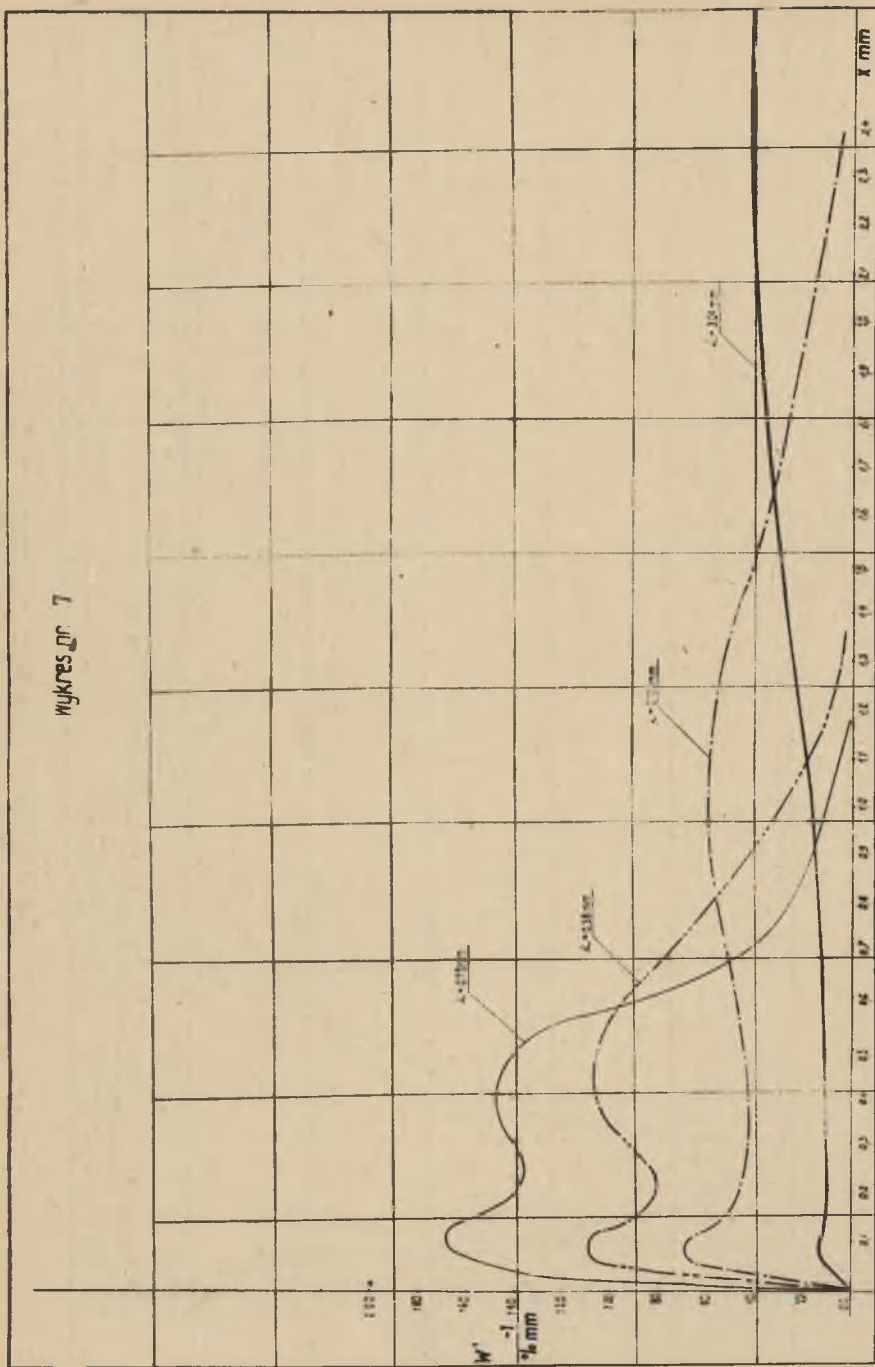
Rys. 5. Rozkłady cząstek pyłowych szkła
(II seria doświadczeń)

Mikeyes nr. 6



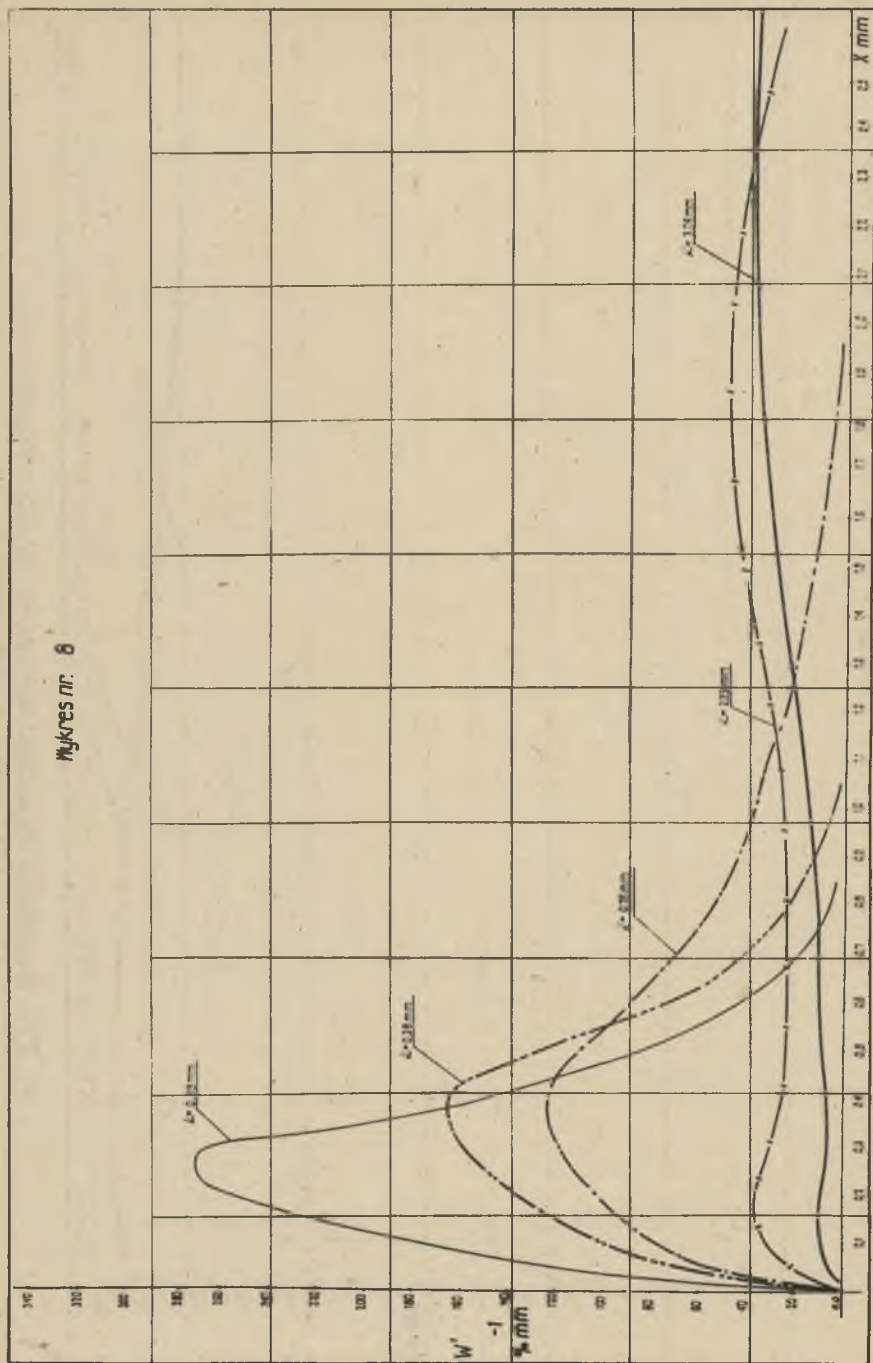
Rys. 6. Rozkłady cząstek pyłowych anhydrytu
(II seria doświadczeń)

Wykres nr. 7



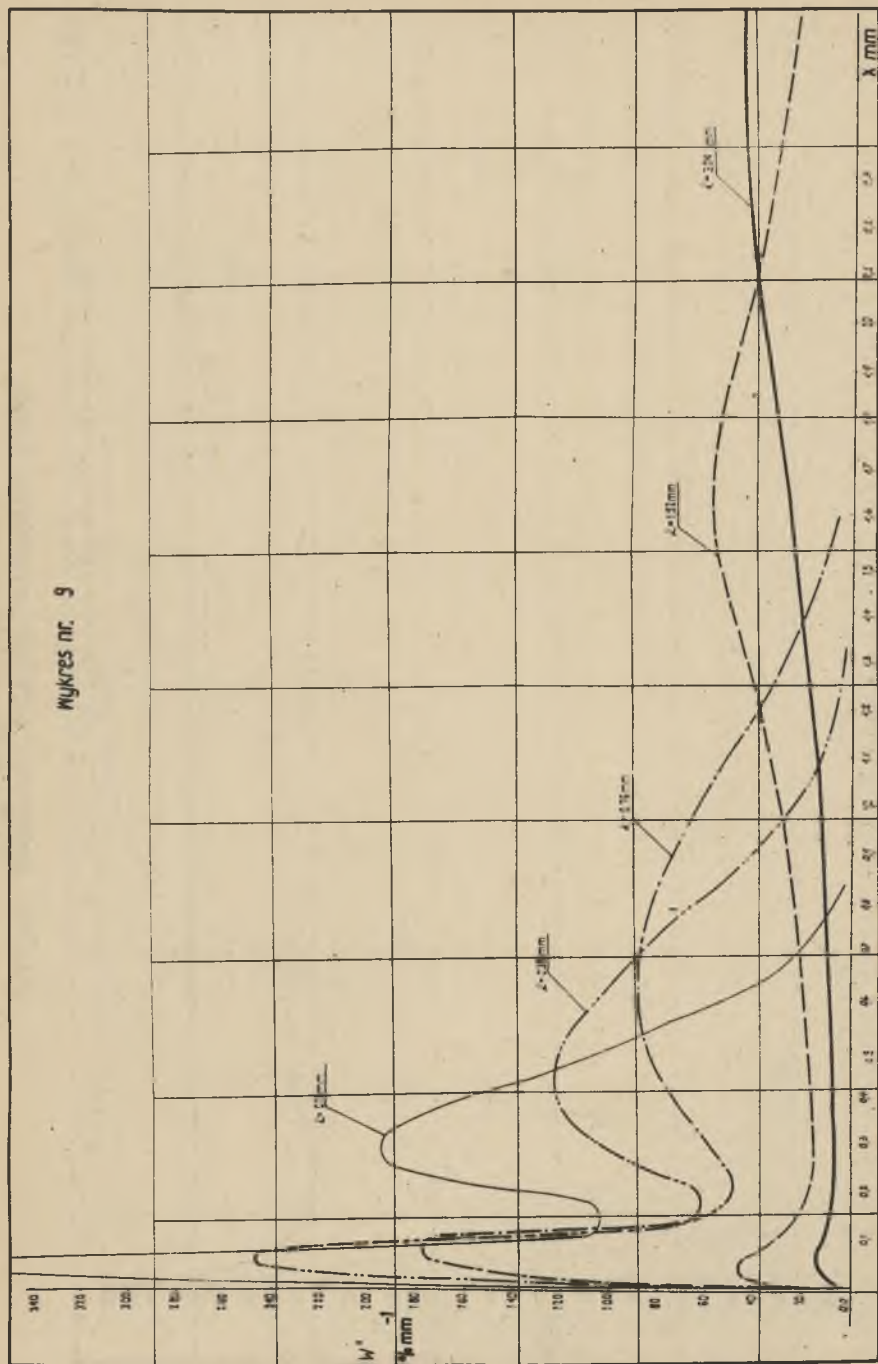
Rys. 7. Rozkłady cząstek pyłowych kruszywa bitumicznego (II seria doświadczeń.)

Wykres nr. 8



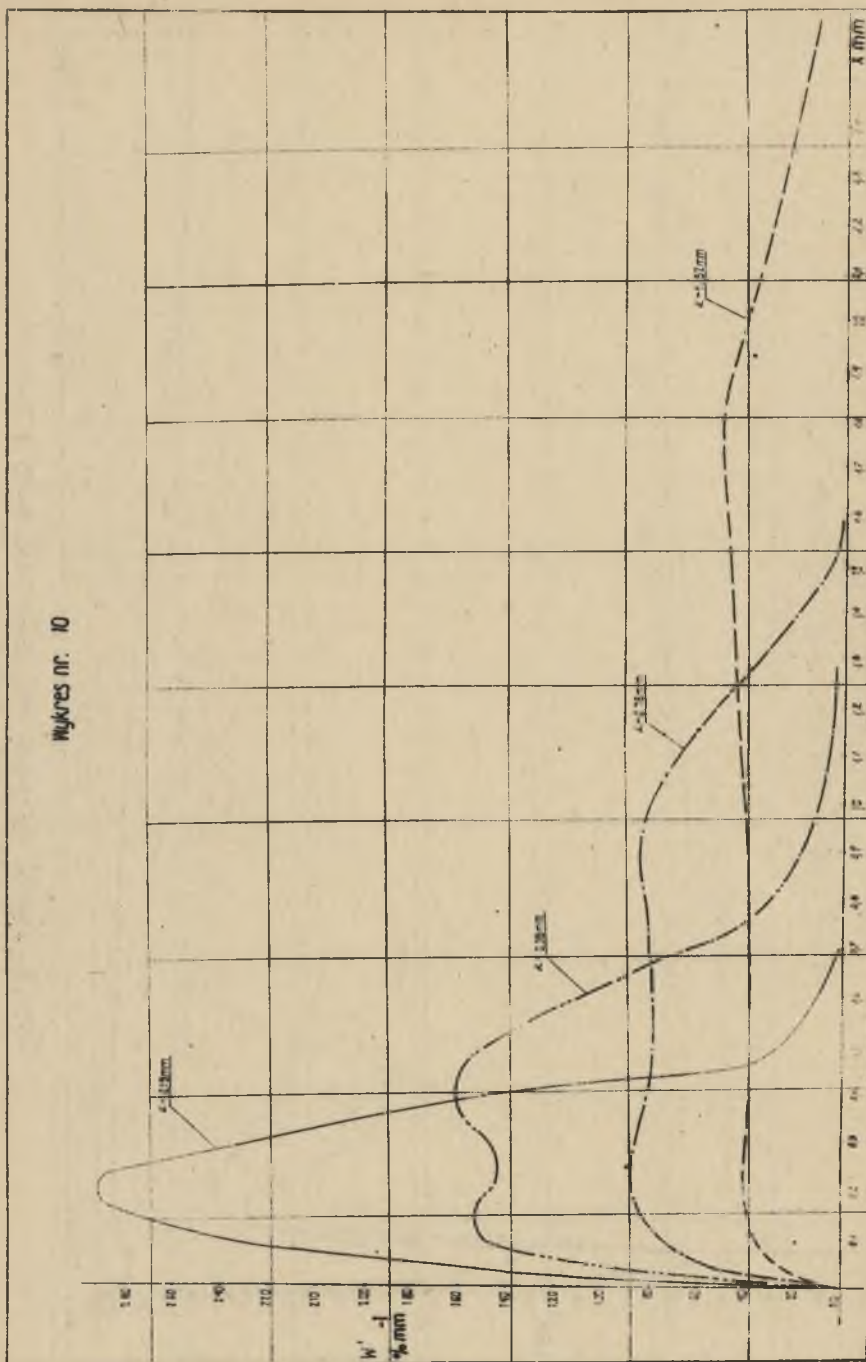
Rys. 8. Rozkłady cząstek pyłowych żwiru
(III seria doświadczeń)

WYKRES nr. 9



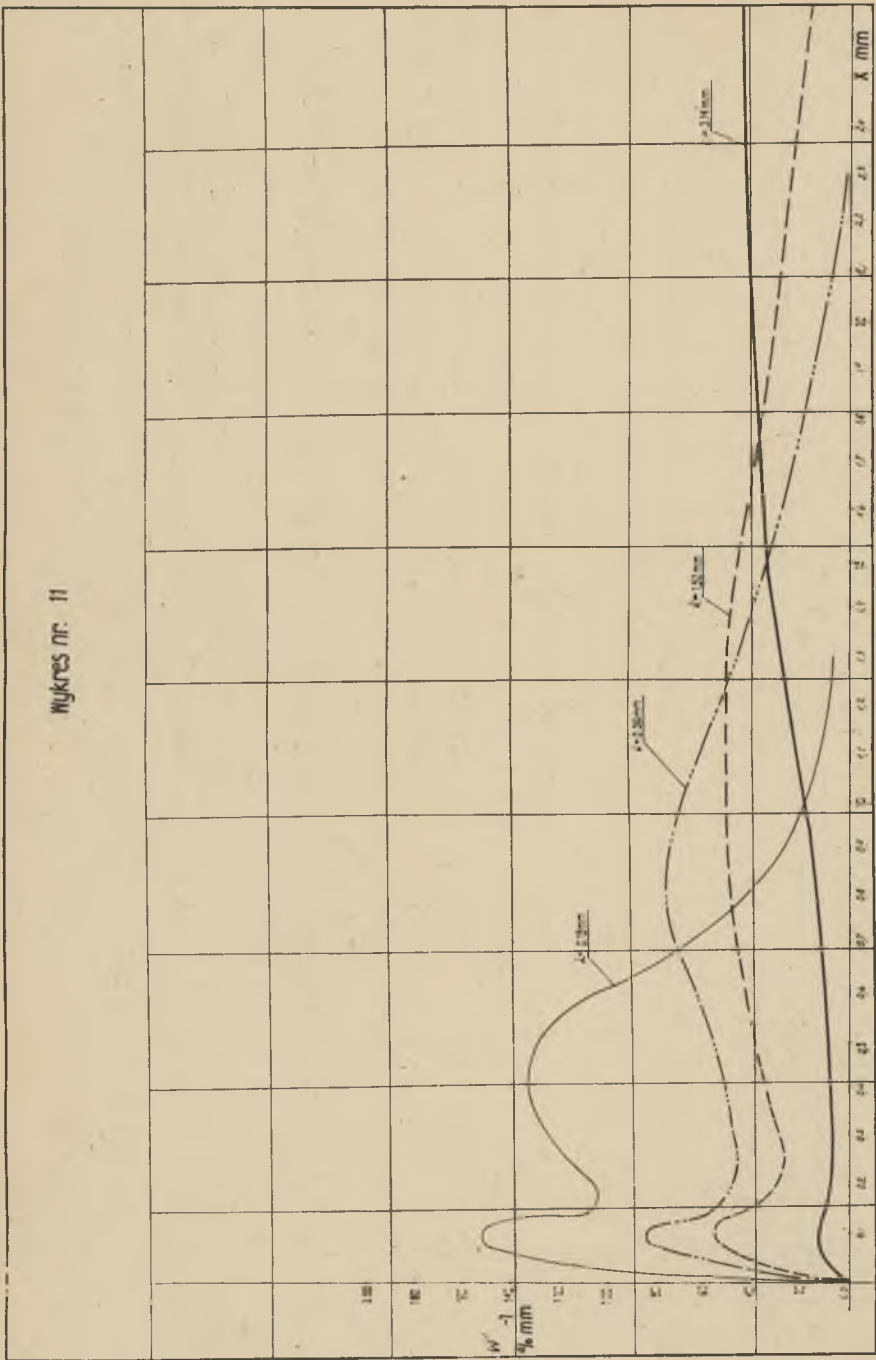
Rys. 9. Rozkłady cząstek pyłowych anhidrytu
(III seria doświadczeń)

Wykres nr. 10



Rys. 10. Rozkłady cząstek pyłowych szkła
(III seria doświadczeń.)

Wykres nr. 11



Rys. 11. Rozkłady cząstek pyłowych kupa bitumicznego (III seria doświadczeń.)