CHEMIA z. 31

P.3345/66

JERZY PIKOŃ

WYDZIELANIE AEROZOLU Z FAZY GAZOWEJ PRZEZ WTRYSK WODY DO GAZU

POLITECHNIKA ŚLĄSKA
ZESZYT NAUKOWY Nr 155 – GLIWICE 1966

SPIS TREŚCI

		Str.
1.	Wstęp	3
2.	Współczynnik szybkości odpylania	5
3.	Opis instalacji doświadczalnej	12
4.	Metodyka pomiarów	16
5.	Równanie kryterialne współczynnika szybkości odpylania	28
6.	Zależność między sprawnością odpylania i współczynnikiem szybkości odpylania	38
7.	Omówienie wyników badań	42
8.	Wnioski	48
9.	Literatura	49
10.	Tablice	51

POLITECHNIKA ŚLĄSKA

ZESZYTY NAUKOWE

Nr 155

POLITECHNIKA ŚLĄSKA BIBLIOTEKA GŁÓWNA Gliwice

P.3345/66

JERZY PIKOŃ

WYDZIELANIE AEROZOLU Z FAZY GAZOWEJ PRZEZ WTRYSK WODY DO GAZU

PRACA HABILITACYJNA Nr 51

Data otwarcia przewodu habilitacyjnego 27. I. 1965 r.

GLIWICE 1966

REDAKTOR NACZELNY ZESZYTÓW NAUKOWYCH
POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ

Fryderyk Staub

REDAKTOR DZIAŁU

Iwo Pollo

SEKRETARZ REDAKCJI

Tadeusz Matula

Dział Nauki — Sekcja Wydawnictw Naukowych — Politechniki Śląskiej
Gliwice, ul. Konarskiego 23

PJn 124/66

Nakł. 100+180 Ark. wyd. 3,45 Ark. druk. 4,6 Papier offsetowy kl. V, 70x100, 70 g
Oddano do druku 9. 2. 1966 Podpis. do druku 17. 3. 1966 Druk ukończ. w marcu 1966
Zam 400 12. 2. 1966 A-17 Cena zł 5,—

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

1. W s t ę p

Wydzielanie aerozolu z fazy gazowej przez wtrysk wody do gazu jest metodą stosowaną od wielu lat w technice odpylania gazów przemysłowych. Metoda ta aczkolwiek bardzo stara nie została do tej pory opracowana teoretycznie. Pewien postęp w opracowaniu teoretycznym metody daje się zaobserwować w publikacjach, dotyczących zwężki Venturi jako skrubera do odpylania gazów.

Procesy odpylania gazów w zwężkach Venturi opracował W. Barth [1, 2], wyprowadzając równanie na "współczynnik zdolności aglomeracji" i rozwiązując wyprowadzone równanie.

Dyskusje wyprowadzonego równania przeprowadzono na podstawie wykresów. Jednak wiele zjawisk zachodzących w zwężce Venturi nie można wytłumaczyć na podstawie równania Bartha. Z równania wynika np., że odpylanie jest skuteczne tam, gdzie osiąga się wysokie prędkości względne między kroplami wody i gazem.

Z tej właśnie przyczyny stosuje się duże prędkości gazu dochodzące w przewężeniu rury Venturi do 100-120 m/sec. Praktyka jednak wykazała, że przekroczenie tej wartości dostarcza wręcz odwrotnych efektów. Wynika stąd, że znajomość podstaw teoretycznych winna być wzbogacona wieloma doświadczeniami praktycznymi w szerszym zakresie niż to przeprowadził Barth.

Bez względu na duże praktyczne znaczenie osiadania cząstek aerozolu na kropelkach cieczy, na ten temat opublikowano bardzo mało prac doświadczalnych. Znacznie więcej dokonano teoretycznych obliczeń współczynnika osiadania cząstek na ciałach o prostym kształcie geometrycznym jak przy opływaniu przez zapylone gazy kuli, nieskończenie długiego walca i płaskiej taśmy. Wyników tych obliczeń nie można jednak stosować w praktyce gdyż dają b. duże błędy.

Zasadę wtrysku wody do gazu wykorzystuje się przy odpylaniu gazów w skruberach wodnych bez wypełnień.

Skrubery, w których gazy zapylone są zraszane w przeciwprądzie cieczą, pomimo swoich posiadanych wad, jak duże zużycie wody i niewysoka sprawność odpylania, są powszechnie stosowane w przemyśle chemicznym, gdyż w wielu wypadkach nie można ich zastąpić innymi urządzeniami odpylającymi.

Skrubery bez wypełnień są urządzeniami znajdującymi szerokie zastosowanie wszędzie tam, gdzie zachodzi konieczność odpylania gazów metodą mokrą, a cząstki pyłów posiadają własności zlepiające (np. odpylanie gazów z pieców karbidowych zawierających znaczne ilości CaO w obecności CO_2). Zastosowanie w tym wypadku jakiegokolwiek urządzenia odpylającego posiadają-

cego elementy wewnątrz jest niebezpieczne, gdyż może ono ulec szybkiemu zaklejeniu.

Podkreślić należy, że gazy z pieca karbidowego od momentu wyjścia z pieca są intensywnie przemywane już w rurociągach gazowych, celem zapobieżenia osiadania pyłów. Zastosowanie w takim wypadku urządzenia odpylającego, pracującego na sucho jest również niemożliwe, gdyż nawilżone gazy w krótkim czasie spowodują zaklejenie odpylacza mokrym pyłem.

Do głównych zalet skruberów bez wypełnień, zraszanych w przeciwprądzie rozpylaną cieczą zaliczyć należy dużą prostotę w budowie, mały opór przepływu (25-100 mm H_2O) i łatwą obsługę.

Wspomniane wyżej względy tłumaczą fakt szerokiego stosowania skruberów bez wypełnień w przemyśle do odpylania gazów przemysłowych. Brak opracowania teoretycznego tego zagadnienia jest przyczyną, że skrubery bez wypełnień stosowane są w przypadkach nie znajdujących uzasadnienia, a wymiary ich ustalane są często za pomocą metod bardzo orientacyjnych i wysoce niedokładnych. Niewłaściwie zaprojektowany skruber pracuje z dużo mniejszą sprawnością, posiada większe opory przepływu i zużywa znacznie większe ilości wody niż tego wymaga proces odpylania. Znaczne zużycie wody z kolei stwarza problem w jej oczyszczaniu i rzutuje na wskaźniki zużycia wody dla całego zakładu. Problem właściwego opracowania teoretycznego odpylania gazów w skruberach łączy się z czystością gazów i właściwym zużyciem wody do odpylania, która w związku z szybkim rozwojem przemysłu chemicznego staje się coraz bardziej deficytową.

Brak teoretycznego opracowania zagadnienia wydzielania aerozolu z fazy gazowej w skruberach, szczupłość materiału eksperymentalnego i waga tego problemu z punktu widzenia przemysłowego skłoniły autora do przeprowadzenia badań w tej dziedzinie.

Do badań zastosowano skruber bez wypełnień, zraszany wodą rozpylaną za pomocą specjalnego rozpylacza hydraulicznego. Przepływ zapylonych gazów w stosunku do kropel był przeciwprądowy. Badania zostały przeprowadzone na instalacji doświadczalnej, zainstalowanej w Katedrze Aparatury Chemicznej Politechniki Śląskiej.

Praca ta jest kolejnym etapem prac, które podjął autor dla opracowania przynajmniej empirycznych wzorów ujmujących zagadnienie wydzielania aerozolu z fazy gazowej metodami mokrymi, których konieczność stosowania dyktowana jest przez wiele procesów chemicznych.

W skruberach zraszanych rozpyloną wodą wydzielanie aerozolu czyli cząstek pyłu, które unoszą się w powietrzu, następuje przez zderzenie z rozpyloną wodą, następuje wtedy pogrążenie cząstki pyłu w kropelce wody czyli jej przejście z fazy gazowej do fazy ciekłej, zwane procesem zwilżania.

Zagadnienie zwilżania aerozolu przez krople cieczy rozpatrzyć można analizując proces osiadania cząstek pyłu na kropelce przeszkodzie, wymaga to jednak poczynienia całego szeregu założeń upraszczających, a otrzymane wyniki byłyby słuszne tylko przy założonych warunkach i odbiegałyby znacznie od rzeczywistości.

Metodą, która wymaga stosunkowo niedużej ilości założeń w rozpatrywaniu omawianego zagadnienia okazała się analiza wymiarowa i teoria podobieństwa.

Metodę tą zastosowano w niniejszej pracy. Celem pracy jest ustalenie wpływu poszczególnych parametrów odpylania na sprawność skrubera, określenie wpływu poszczególnych zmiennych na współczynnik szybkości odpylania "K", i znalezienie zależności między współczynnikiem szybkości odpylania "K" i sprawnością odpylania "η". Znajomość wpływu poszczególnych zmiennych na sprawność odpylania umożliwi projektantowi ustalenie wymiarów skrubera w sposób obliczeniowy najbardziej racjonalny, pozwoli na właściwy dobór kropel wody i umożliwi przeprowadzenie analizy czy w danych warunkach stosowanie skrubera jako urządzenia odpylającego jest uzasadnione.

Rozwiązanie tego zagadnienia dla skrubera zraszanego rozpylaną cieczą wyjaśni wiele zjawisk zachodzących w mokrych urządzeniach odpylających przy przechodzeniu aerozolu z fazy gazowej do fazy ciekłej.

2. Współczynnik szybkości odpylania

Wydzielanie aerozolu z gazu można traktować jako proces przechodzenia masy z fazy gazowej do fazy ciekłej. Podkreślić należy, że założenie to jest czystą analogią bez podstaw teoretycznych. Model podstawowego równania absorpcji gazów przy wydzielaniu aerozolu z gazów stosuje jednak Johnstone [9], [28] dla cząstek pyłów mniejszych od 5μ, zaś M.E. Pozin [36] dla cząstek większych od 5μ. Niniejsza praca między innymi może przyczynić się do uzasadnienia założenia modelu równania absorpcji gazów przy wydzielaniu aerozolu w zakresie prawa Stokesa w skruberach zraszanych.

Zakładamy, że ilość wydzielanego aerozolu ze strumienia gazu określa równanie o budowie zbliżonej do zasadniczego równania wymiany masy

$$G = K \cdot F_r \cdot \Delta C_m \cdot \tau \qquad (1)$$

Gdzie oznaczają:

G (kg)	- masa wydzielanego aerozolu z gazu,
$K(\frac{m}{h})$	- współczynnik szybkości odpylania,
$F_r(m^2)$	- powierzchnia rzutu prostopadłego kropel cieczy
$\Delta C_m(kg/m^3)$	- średnia różnica stężenia zapylania,
τ(h)	- czas.

Przekształcając równanie (1) otrzymujemy:

$$K = \frac{G}{F_r \cdot \Delta C_m \cdot \tau} \qquad (2)$$

Po podstawieniu wymiarów do równania (2) otrzymujemy wymiar współczynnika "K"

$$K = \frac{[kg]}{[m^2] \cdot [\frac{kg}{m^3}] \cdot [h]} = [\frac{m}{h}] \qquad (3)$$

Współczynnik "K" określa więc masę aerozolu jaka została wydzielona z gazu przy powierzchni rzutu kropel $F_r = 1\ m^2$, średniej różnicy stężeń zapylenia $\Delta C_m = 1\ \frac{kg}{m^3}$, w przeciągu czasu $\tau = 1$ h.
Jak wynika z równania (3) współczynnik "K" ma wymiar prędkości $[\frac{m}{h}]$ lub $[\frac{m}{sec}]$.

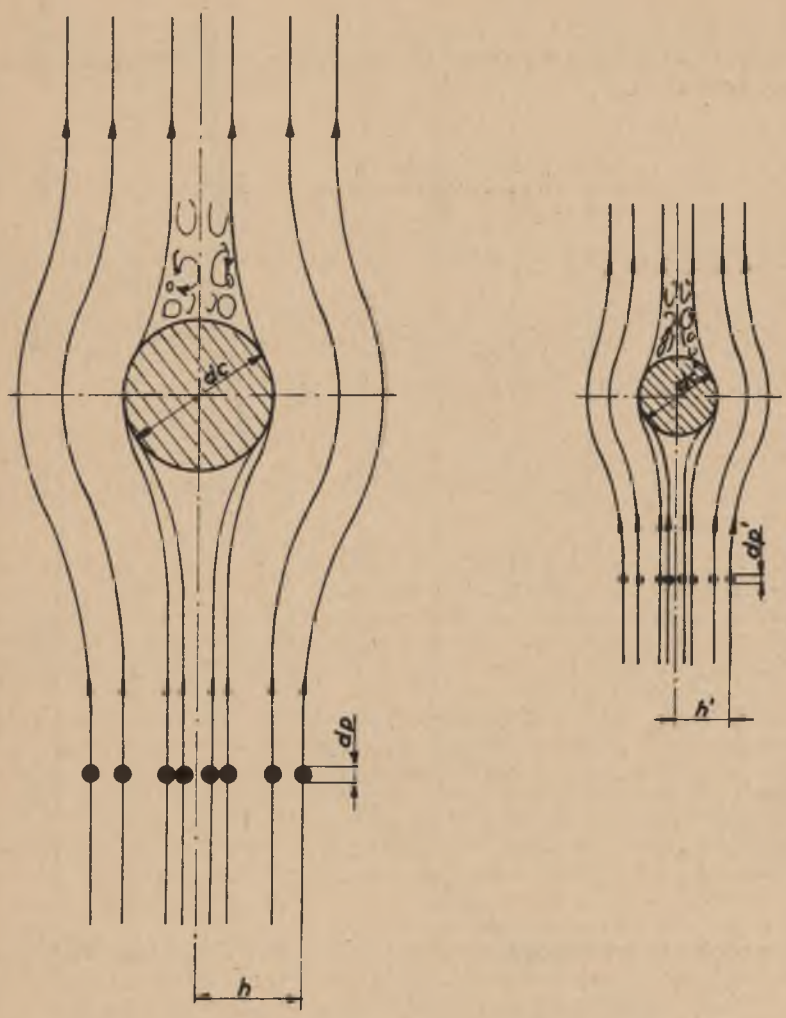
Wprowadzenie do rozważań w mokrych metodach odpylania gazów współczynnika szybkości odpylania jest bardzo pomocne, gdyż współczynnik ten w sposób jednoznaczny charakteryzuje intensywność pracy urządzenia odpylającego i umożliwia porównywanie pracy urządzeń odpylających przy różnych parametrach odpylania.

Uzyskuje się wzory matematyczne o budowie zbliżonej do wzorów stosowanych przy obliczeniach procesów wymiany masy. Przedstawiona próba ujęcia zagadnienia wydzielania aerozolu z gazów uwzględnia fakt, że ilość wydzielanego aerozolu w urządzeniu odpylającym zależy od średniego stężenia zapylenia (ilości i wielkości cząstek pyłów) i powierzchni rozwinięcia kropel.

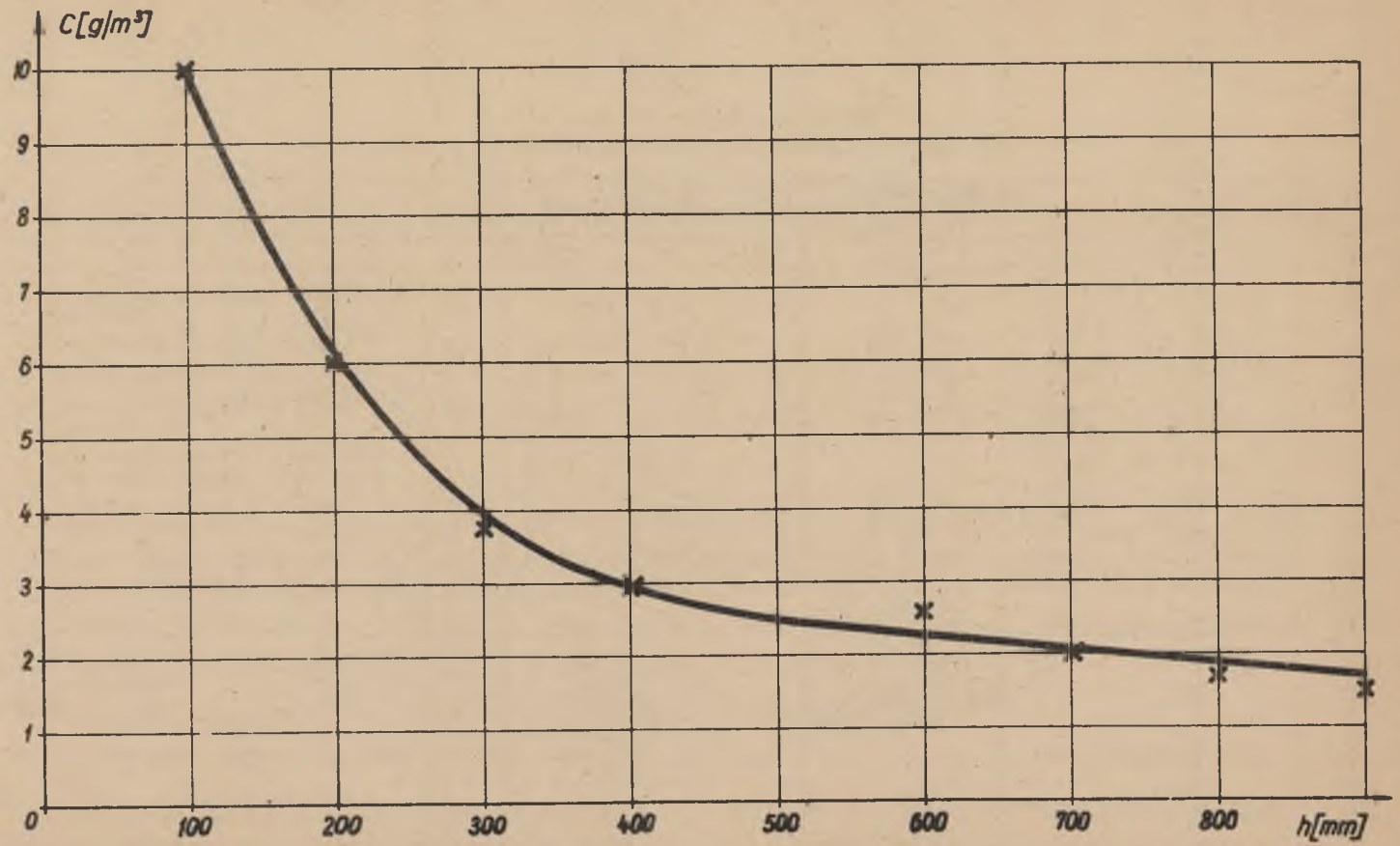
W równaniu (1) "F_r" stanowi powierzchnię sumy rzutów wszystkich kropel w kierunku prostopadłym do przepływu biorących udział w wytrącaniu aerozolu z gazu.

Dla procesu osadzania cząstek pyłu na kropelce wody istotna jest powierzchnia rzutu kropli a nie powierzchnia całej kropli, gdyż osiadanie aerozolu odbywa się nie na całej powierzchni kropli a tylko jej części (rys. 1). Sposób ustalenia powierzchni kontaktu faz zostanie podany w następnych rozdziałach pracy.

Średnią różnicę stężeń zapylenia traktując ją jako siłę napędową procesu przechodzenia aerozolu z fazy gazowej do fazy ciekłej możemy określić na podstawie następującego rozumowania.



Rys. 1. Podobieństwo przepływu aerozoli



Rys. 1a. Stężenie zapylenia na różnych wysokościach skrubera

Masę pyłów wydzielonych w skruberze określa równanie

$$G = V_g(C_k - C_p) \tag{4}$$

Stężenie zapylenia zmienne jest na całej wysokości skrubera (rys. 1a) możemy więc napisać równanie różniczkowe.

$$dG = V_g \cdot dC \tag{5}$$

Masę pyłów wydzielonych na elemencie powierzchni możemy określić z równania

$$dG = K \cdot d F_r \cdot \Delta C \tag{6}$$

Całkowitą masę pyłów wydzieloną w skruberze określa równanie

$$G = K \; F_r \cdot \; \Delta C_m \tag{1}$$

z równania (6) wynika

$$dF_r = \frac{dG}{K \cdot \Delta C} \tag{7}$$

Kojarząc równanie (7) z równaniem (5) i całkując otrzymujemy:

$$F_r = V_g \cdot \int_{C_p}^{C_k} \frac{dC}{K \, \Delta C} \tag{8}$$

Równanie (8) wprowadzamy do równania (1)

$$G = K \cdot \Delta C_m \cdot V_g \cdot \int_{C_p}^{C_k} \frac{d\,C}{K \cdot \Delta C} \tag{9}$$

Po podstawieniu równania (4) do równania (9) otrzymujemy:

$$K \cdot \Delta C_m = \frac{C_k - C_p}{\int_{C_p}^{C_k} \frac{dC}{K \cdot \Delta C}} \tag{10}$$

Z rozważań ogólnych i obserwacji zjawiska wydzielania aerozolu z gazów w skruberach zraszanych rozpylona cieczą wynika, że współczynnik szybkości odpylania jest funkcją.

$$K = f(d_c, d_p, \gamma_p, w, \eta_g) \tag{11}$$

Średnica kropel "d_c", gęstość pyłów "γ_p",szybkość względna "w", lepkość gazu" η_g", średnica pyłów "d_p" nie zmieniają się z wysokością skrubera.

Możemy więc przyjąć, że K ≅ const na całej wysokości skrubera, równanie (10) przyjmie wtedy postać

$$\Delta C_m = \frac{C_k - C_p}{\int_{C_p}^{C_k} \frac{dC}{\Delta C}} \tag{12}$$

Stężenie pyłów na zwierciadle cieczy można przyjąć stałe na całej wysokości skrubera i równe zeru.

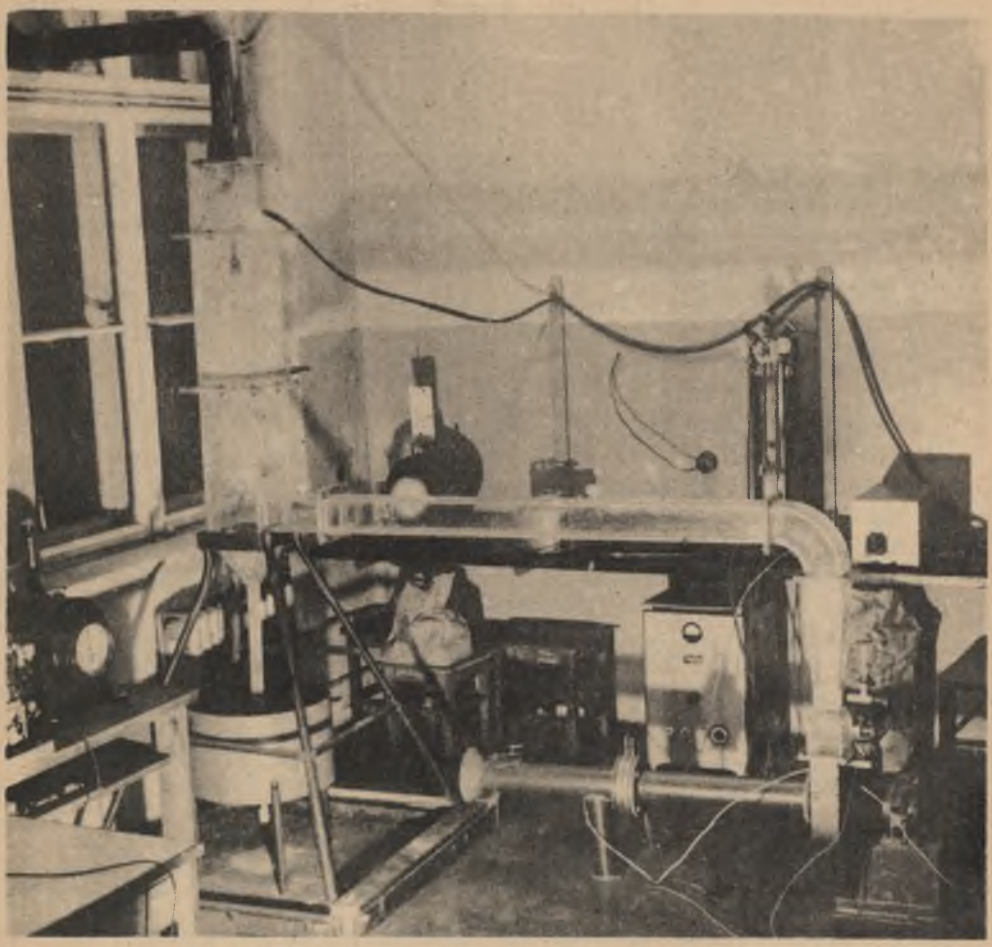
$$C_z = C_{z_p} = C_{z_k} = 0 \tag{13}$$

Stężenie pyłów w gazie będzie więc równe różnicy stężeń na całej wysokości skrubera

$$C = \Delta C \tag{14}$$

Wprowadzając równanie (14) do równania (12) mamy

$$\Delta C_m = \frac{C_k - C_p}{\int_{C_p}^{C_k} \frac{dC}{C}} \tag{15}$$



Zdjęcie stanowiska badawczego

POLITECHNIKA ŚLĄSKA BIBLIOTEKA GŁÓWNA

Po rozwiązaniu całki równania (15) otrzymujemy

$$\Delta C_m = \frac{C_p - C_k}{\ln \frac{C_p}{C_k}} \qquad (16)$$

Średnia różnica stężeń jest więc średnią logarytmiczną początkowego "C_p" i końcowego "C_k" stężenia zapylenia. Na rysunku 1a pokazano zmianę stężenia zapylenia z wysokością skrubera.

Współczynnik szybkości odpylania określono w niniejszej pracy za pomocą równania kryterialnego podanego w następnych rozdziałach.

Współczynnik ten jest funkcją parametrów podanych równaniem (11). Z przeprowadzonych rozważań i eksperymentów można wyciągnąć pewne wnioski ogólne dotyczące współczynnika szybkości odpylania "K":

- współczynnik szybkości odpylania określa intensywność pracy danego urządzenia odpylającego,
- pozwala na porównywanie pracy dwóch urządzeń odpylających danego typu przy określonych parametrach,
- umożliwia jednoznaczne określenie sprawności odpylania z uwzględnieniem wszystkich istotnych parametrów, od których zależy sprawność odpylania,
- pozwala na wyprowadzenie wzorów o budowie zbliżonej jak przy wymianie masy i tym samym określa pewne analogie między wymianą masy a wydzielaniem aerozolu.

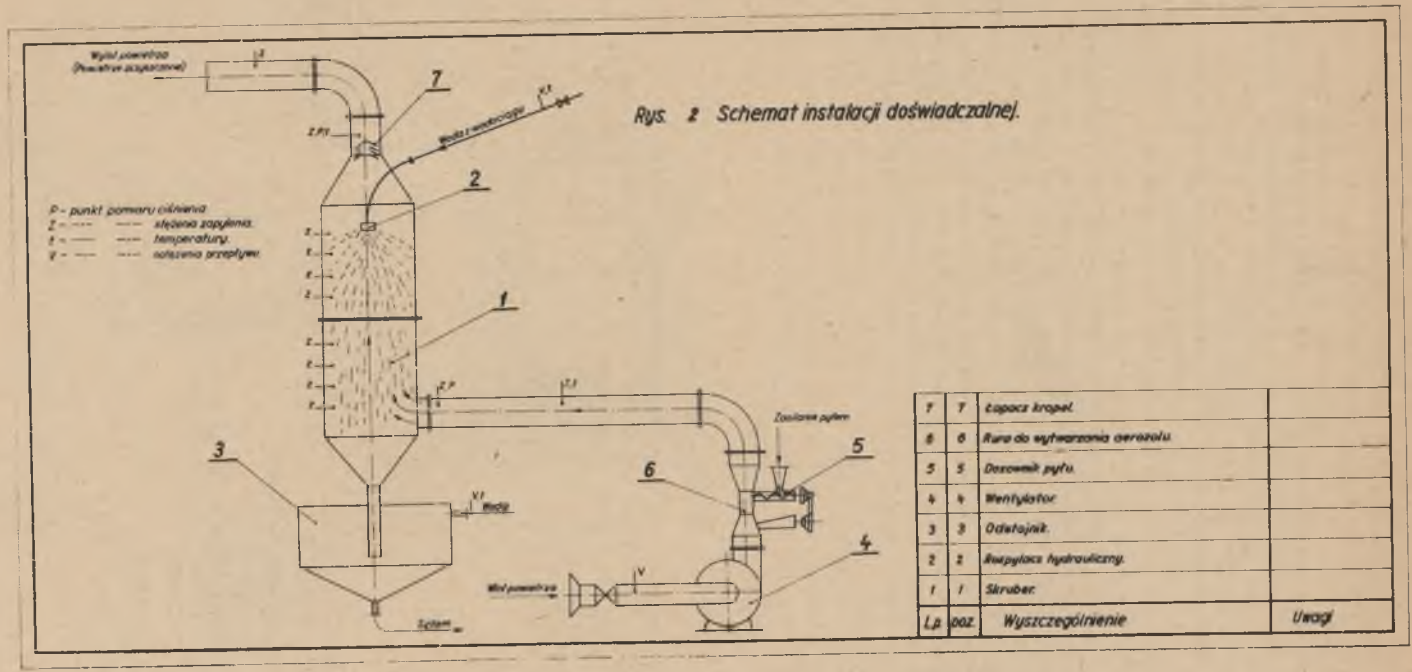
W niniejszej pracy znaleziono kształt funkcji współczynnika szybkośći odpylania dla przypadku wydzielania aerozolu przez wtrysk wody do gazu.

3. Opis instalacji doświadczalnej

Eksperymenty przeprowadzono na instalacji ćwierćtechnicznej o maksymalnym natężeniu przepływu około 600 m^3/h przedstawionej na schemacie rys. 2.

Doświadczalna instalacja składa się z następujących urządzeń:

1) skrubera zraszanego,
2) rozpylacza hydraulicznego,
3) odstojnika,
4) wentylatora,
5) dozownika pyłów,



Rys. 2. Schemat instalacji doświadczalnej

6) rury do wytwarzania aerozolu,

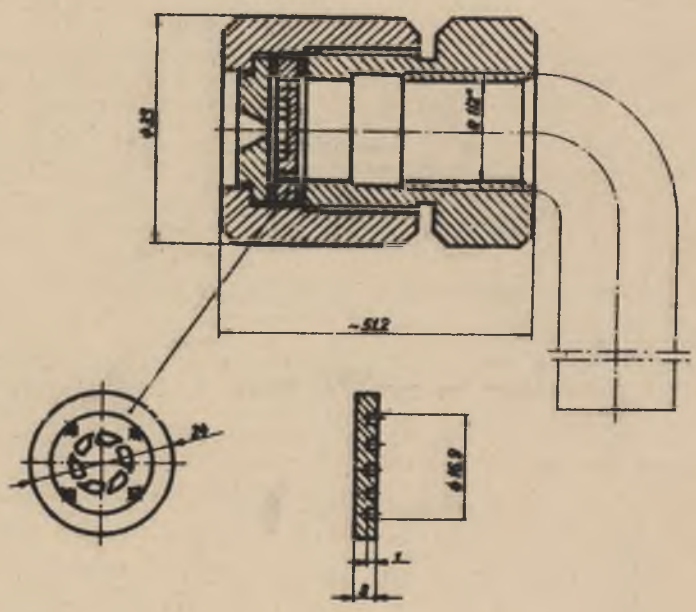
7) orurowania i łapacza kropel.

Powietrze zasysane przez wentylator (poz. 4) bezpośrednio z atmosfery przechodzi przez rurę służącą do wytwarzania aerozolu (poz. 6), do której doprowadza się pył przy pomocy dozownika ślimakowego pyłów (poz. 5).

Zapylone powietrze tłoczone jest do skrubera zraszanego wodą (poz. 1), gdzie ulega oczyszczeniu.
Oczyszczone powietrze wychodzi do atmosfery, górnym króćcem wylotowym.

Woda do skrubera doprowadzana jest z instalacji wodociągowej poprzez rozpylacz hydrauliczny (poz. 2), gdzie ulega rozpyleniu na drobne kropelki tworząc układ dyspersyjny.

Kierunek przepływu powietrza w stosunku do przepływających kropel wody jest przeciwprądowy. Wydzielone w skruberze cząstki ciała stałego wraz z wodą odprowadzane są ze skrubera dolnym króćcem szlamu do odstojnika (poz. 3). W odstojniku cząstki ciała stałego opadają na dno, skąd periodycznie są usuwane, zaś czysta woda odprowadzana jest do kanału górnym króćcem.



Rys. 3. Rozpylacz hydrauliczny

Schemat instalacji doświadczalnej z naniesionymi punktami pomiarowymi przedstawiono na rys. 2.

Zasadniczym elementem instalacji jest skruber zraszany rozpyloną wodą. Skruber zraszany stanowi zbiornik o przekroju kwadratowym 200 x 200 mm i wysokości H = 1000 mm, zakończony od dołu i od góry ostrosłupem ściętym.

Wewnątrz skrubera znajduje się rozpylacz hydrauliczny rys.3 służący do rozpylania doprowadzonej wody na drobne krople,które opadając wypełniają przestrzeń skrubera mgłą rozpylonej cieczy.

Od dołu skrubera doprowadzane jest powietrze zapylone, które płynąc do góry napotyka na opadające krople wody. Zawieszone w gazie cząstki ciała stałego napotykają na swej drodze kropelki przeszkody i uderzają w nie. Zatopione w kroplach cząstki ciała stałego opadają na dno skrubera, skąd wraz z wodą odprowadzane są do odstojnika, a oczyszczone powietrze wychodzi do atmosfery górnym króćcem wylotowym.

Aerozol o różnych stężeniach wytworzono w rurze (poz. 6) stanowiącej zwężkę Venturi z przytwierdzonym do niej dozownikiem ślimakowym (poz. 5).

Pył, po uprzednim zważeniu; dozowano do zbiornika dozownika ślimakowego, skąd za pomocą ślimaka o średnicy Ø = 10 mm i skoku s = 10 mm był dozowany do zwężki Venturi, przez którą przepływało powietrze z dużą prędkością, powietrze to porywało cząstki ciała stałego, unosząc je do skrubera zraszanego cieczą.

Ilość dozowanego pyłu regulowano przez zmianę ilości obrotów ślimaka.

Liczbę obrotów ślimaka zmieniono za pomocą przekładni między ślimakiem a silnikiem lub przez zmianę napięcia prądu elektrycznego. Regulacja napięcia prądu elektrycznego odbywała się za pomocą autotransformatora zasilanego z sieci prądu zmiennego. Istniała więc możliwość zmiany ilości obrotów ślimaka w sposób ciągły, a tym samym można było dozować pył do rury Venturi w dowolnej ilości, wytwarzając aerozol o żądanym stężeniu. Rurę do wytwarzania aerozolu ustawiono za wentylatorem celem zapobieżenia osiadaniu pyłów na łopatkach wirnika wentylatora. Całość instalacji łącznie z rurociągami wykonano z metaplexu, dla umożliwienia obserwacji przepływu mieszanki pyło-powietrznej.

Do rozpylania wody zastosowano rozpylacz hydrauliczny z zawirowaniem przedstawiony na rys. 3. Woda do rozpylacza doprowadzana była z sieci wodociągowej.

Ilość wody i ciśnienie regulowano przy pomocy zaworu dławiącego, umieszczonego na rurociągu wody.

Natężenie przepływu powietrza przepływającego przez skruber regulowano za pomocą przepustnicy, umieszczonej na rurociągu przed wentylatorem.

Prędkość przepływu powietrza przez skruber wynosiła 0,5 - 3,9 m/sec. Natężenie przepływu powietrza 72 - 560 m^3/h. Zużycie wody na proces odpylania wynosiło 0,01 m^3/h przy początkowym stężeniu zapylenia wynoszącym 5 g/m^3.

Na skruberze i na rurociągach w miejscach oznaczonych literami "P, Z, t", umieszczono króćce pomiarowe umożliwiające przeprowadzanie pomiaru ciśnienia, stężenia zapylania i temperatury. W miejscach oznaczonych literą "V" przeprowadzono pomiar natężenia przepływu powietrza lub wody. Na rurociągu od prowadzającym oczyszczone powietrze ze skrubera umieszczono żaluzjowy łapacz kropel (poz. 7), celem zapobieżenia porywaniu kropel do rurociągu odprowadzającego oczyszczone powietrze.

Odstojnik o wymiarach Ø 500 mm i h = 500 mm był opróżniany ze szlamu periodycznie w miarę nagromadzenia się szlamu. Woda czysta z odstojnika była odprowadzana z górnej części odstojnika do kanału.

4. Metodyka pomiarów

Przeprowadzone pomiary miały na celu ustalenie zmiennych równania kryterialnego współczynnika szybkości odpylania "K" (równanie 35).

Rozmieszczenie punktów pomiarowych ilustruje schemat instalacji doświadczalnej rys. 2.

Przeprowadzono pomiary następujących zmiennych:

a) pomiary natężenia przepływu powietrza i wody,

b) pomiary temperatury powietrza i wody,

c) pomiary stężenia zapylenia powietrza,

d) pomiary gęstości aerozolu,

e) pomiary średniej średnicy aerozolu (analiza frakcyjna),

f) pomiary średniej średnicy kropel wody.

Wartość zmiennych gęstości wody γ_c, powietrza γ_g i lepkości powietrza " η " odczytano z tablic podręczników inżynierii chemicznej [35].

Pomiar natężenia przepływu powietrza

Natężenie przepływu powietrza mierzono przy pomocy kryzy pomiarowej. Ze względów lokalizacyjnych kryzę pomiarową o stopniu rozwarcia m = 0,1 umieszczono na rurociągu ssącym, doprowadzającym powietrze do wentylatora w odległości około 5 średnic rurociągu od miejsca zaburzeń przepływu. Powstały z tego powodu błąd przy pomiarze szybkości powietrza nie przekraczał 0,2%. Pomiar natężenia przepływu powietrza odbywał się przed zmieszaniem pyłu z powietrzem. Spadek ciśnienia na kryzie mierzony był za pomocą U-rurki wypełnionej wodą.

Pomiar natężenia przepływu wody

Pomiar natężenia przepływu wody wykonywano przy pomocy licznika wody lub metodą objętościową, mierząc objętość wypływającej wody i czas jej wypływu.

Pomiar temperatury powietrza i wody

Pomiary temperatury powietrza i wody wykonano przy pomocy termometrów rtęciowych wbudowanych w rurociągi w miejscach pokazanych na rys. 2.

Pomiar stężenia zapylenia

Pomiary stężenia zapylenia na wlocie i wylocie ze skrubera wykonano w miejscach pokazanych na schemacie rys. 2.

Do pomiarów zastosowano sondę pyłową z wkładką filtracyjną z waty szklanej. Zapylone powietrze zasysano poprzez sondę z wkładką filtracyjną za pomocą pompy próżniowej.

Objętość zasysanego powietrza była mierzona licznikiem gazowym. Ilość zasysanego powietrza do sondy regulowano zaworem umieszczonym za pompą próżniową. Prędkość zasysania powietrza do sondy wynosiła około 1-1,5 prędkości przepływu powietrza przez rurę. Odległość punktu pomiaru stężenia zapylenia od najbliższej przeszkody powodującej zaburzenie wynosiła około 5-krotnej średnicy rurociągu. Przyrost wagi wkładki filtracyjnej określono przez zważenie wkładki przed pomiarem i po pomiarze.

Przed każdorazowym pomiarem i po pomiarze wkładki filtracyjne były suszone w temperaturze 105°C przez trzy godziny. Stężenie zapylenia obliczono ze wzoru:

$$C = \frac{\Delta g}{V''} \qquad (17)$$

$C(g/m^3)$ - stężenie zapylenia,

$\Delta g(g)$ - przyrost ciężaru wkładki filtracyjnej.

$V''(m^3)$- objętość gazu przepływającego przez licznik gazu.

Pomiary stężenia zapylenia na różnych wysokościach wykonano w sposób analogiczny jak pomiary na wlocie i wylocie ze skrubera.

Pomiary gęstości pyłów (ciężaru właściwego)

Ciężar właściwy pyłów mierzono piknometrem typu Erdmenger-Mann. Do uprzednio zważonego naczyńka o pojemności 50 cm^3 wsypano próbkę pyłu. Do miernicy przyrządu zassano 20 cm^3 cieczy i wlano ją do naczyńka. Po wymieszaniu cieczy z pyłem dopełniono naczyńko do 50 cm^3, odczytując ilość zużytej cieczy.

Ciężar właściwy pyłu obliczono ze wzoru:

$$\gamma_p = \frac{G_1 - G_2 - V_n \cdot \gamma}{50 - V_n} \qquad (18)$$

$\gamma_p (G/cm^3)$ - ciężar właściwy pyłu,
$G_1 (G)$ - ciężar naczyńka z zawartością,
$G_2 (G)$ - ciężar pustego naczyńka,
$V_n (cm^3)$ - objętość cieczy,
$\gamma (G/cm^3)$ - ciężar właściwy cieczy.

Pomiary średniej średnicy aerozolu

Do badań użyto pyłów z pieca karbidowego, pyłów kredy cementowego, węgla kamiennego, krzemianowego.
Większość eksperymentów wykonano przy użyciu pyłów z pieca karbidowego o składzie chemicznym podanym w tlenkach:

CaO - 49,14%
CO_2 - 8,8%
K_2O - 6,99%
MgO - 4,95%
SiO_2 - 3,29%
Al_2O_3 5,14%
Na_2O - 3,27%
SO_3 - 1,23%
Reszta Fe_2O_3 + inne

Pyły do badań były przesiewane na sitach DJN 50-100. Pozostałości na sitach poddawano następnie badaniu na mikroskopach o powiększeniu 100÷1000 razy. Badania mikroskopowe pozwoliły na określenie wymiarów cząstek pozostałości na danym sicie. Pozostałość na sicie stanowiła pył, którym zasilano instalację badawczą.

Przesiewając uprzednio wyuszone pyły przez sito o różnych wymiarach oczek sita uzyskiwano nadawę do instalacji ba-

dawczej o różnych średnich średnicach, z których następnie wytwarzano mieszankę pyło-powietrzną.
Analizy frakcyjne pozostałości na sitach wykonane na mikroskopie zamieszczono w załączonych tablicach 12-16.

Dla otrzymania bardziej drobnych pyłów, których nie można było otrzymać drogą przesiewania przez znormalizowane sita, zastosowano instalację pomocniczą, składającą się z dwóch filtrów workowych połączonych szeregowo, wentylatora powietrza i dozownika pyłów. Pobrane pyły z pieca karbidowego dozowane do rury, przez którą przepływało powietrze tłoczone przez wentylator, pyły te następnie wytrącano ze strumienia gazów przy pomocy dwóch filtrów workowych ustawionych szeregowo i posiadających różne obciążenia.

Do badań używano pyłów, które przechodziły przez filtr pierwszy - filtr o dużym obciążeniu, a zostały zatrzymane przez drugi filtr o obciążeniu małym. Zmieniając obciążenie drugiego filtra otrzymywano pyły o różnych średnich średnicach (tablice 18-21).

Średnią średnicę aerozolu po przesianiu przez sito obliczono jako średnią arytmetyczną ze wzoru:

$$d_p = \frac{\sum n_i \cdot d_{p_i}}{\sum n_i} \qquad (19)$$

d_p (mm) - średnia średnica cząstek,

n_i - ilość badanych cząstek,

d_{p_i} (mm) - przeciętna średnica frakcji.

Założenie średniej średnicy aerozolu jako średniej arytmetycznej było koniecznością, gdyż przed przystąpieniem do pomiarów nie znano zależności między współczynnikiem "K" a średnią średnicą aerozolu "d_p". Po wyznaczeniu drogą eksperymentu zależności między współczynnikiem "K" i średnicą "d_p" określono błąd powstały w wyniku założenia średniej średnicy pyłu jako średniej arytmetycznej zamiast średniej średnicy pyłu, którą nazwano średnią średnicą pyłu poprawioną.

Średnią średnicę pyłu poprawioną wyznaczono na podstawie następującego rozumowania. Masę pyłów przechodzących z fazy do fazy określa równanie:

$$G = K \cdot F_r \cdot \Delta C_m \qquad (1)$$

Całkowita masa pyłów wydzielonych w skruberze stanowi sumę mas poszczególnych frakcji

$$G = \Delta C_m \sum_1^n K_i \cdot F_{r_i} \qquad (20)$$

Porównując równanie (1) i (20) po uproszczeniu otrzymujemy

$$K = \frac{\sum_{1}^{n} K_i \cdot F_{r_i}}{F_r} \qquad (21)$$

Powierzchnia kontaktu faz jest proporcjonalna do ilości cząstek pyłu

$$F_r = \delta n \qquad (22)$$

$$F_{r_i} = \delta n_i \qquad (23)$$

Z równania 67 wynika, że

$$K_i = \beta . d_{p_i}^{0,3} \qquad (24)$$

$$K = \beta . d_p^{0,3} \qquad (25)$$

Po wprowadzeniu równań (22-25) do równania (21) i przekształceniach otrzymujemy

$$d_p = \left[\frac{\sum_{1}^{n} n_i . d_{p_i}^{0,3}}{n} \right]^{3,33} \qquad (26)$$

Średnicę pyłów określoną równaniem (26) nazwano średnią średnicą pyłów poprawioną. W tablicy 1 zamieszczono wartości średnicy pyłu obliczonej jako średnia arytmetyczna (wzór 19), i średnia poprawiona (wzór 26), oraz wielkość błędu powstałego przy obliczaniu "K" w wyniku założenia średniej arytmetycznej.

Pomiary średniej średnicy kropel wody

Dla wyzhaczenia powierzchni rzutu kropel F_r konieczna jest znajomość średnicy kropel rozpylonej wody. Średnice kropli "d_{c_i}" określano pod mikroskopem z wielkości śladu jaki dawała kropla po uderzeniu w płytkę szklaną pokrytą cienką warstwą sadzy.

Tablica 1

Porównanie wartości średniej średnicy aerozolu obliczonych jako średnia arytmetyczna i średnia poprawiona

Średnia arytmetyczna [m]	$0,253 10^{-3}$	$0,221 10^{-3}$	$0,173 10^{-3}$	$0,123 10^{-3}$	$94,0 10^{-3}$	$42,2 10^{-6}$	$29,4 10^{-6}$	$19,16 10^{-6}$	$14,12 10^{-6}$	$5,6 10^{-6}$	Uwagi
Średnia poprawiona [m]	$0,229 10^{-3}$	$0,1862 10^{-3}$	$0,1585 10^{-3}$	$0,101 0^{-3}$	$81,0 10^{-6}$	$40,2 10^{-6}$	$26,8 10^{-6}$	$16,22 10^{-6}$	$11,4 10^{-6}$	$4,03 10^{-6}$	Średni błąd popełniony
Stosunek średniej arytmetycznej do średniej poprawionej	1,104	1,186	1,091	1,23	1,048	1,05	1,098	1,18	1,24	1,39	przy obliczeniu "K" wynosi + 4,7%
Wielkość błędu "K" %	3,1	5,2	2,5	6,5	4,8	1,5	2,6	2,8	7,2	11,0	

Zdjęcie śladów kropel

Jeżeli kropla cieczy uderza o płaską powierzchnię pokrytą cienką warstwą sadzy; to na powierzchni płytki powstaje ślad. Aby zapobiec dalszemu rozlewaniu się kropel, płytkę szklaną pokrywa się cienką warstwą sadzy.

Jako pokrycie płytki szklanej można użyć innych substancji, jednak najlepiej do tych celów nadaje się sadza, gdyż cząsteczki sadzy są bardzo małe i niezwilżalne, co zapobiega rozlewaniu się kropel. Wielkość śladu kropli określa się pod mikroskopem lub na podstawie wykonanych zdjęć. Podkreślić jednak należy, że wielkość śladu kropli nie będzie równa rzeczywistej średnicy kropli, gdyż przy uderzeniu o płytkę kropla ulega deformacji.

Wielkość deformacji kropli zależna jest od szybkości uderzenia i fizycznych własności kropli.

Znając jednak zależność między wielkością śladu kropli od szybkości uderzenia i fizycznych własności kropli można określić rzeczywisty wymiar kropel.

Stopień deformacji kropli w czasie uderzenia o płytkę szklaną zależy od sił inercji i napięcia powierzchniowego kropli.

Jeśli siły lepkości i ciążenia mają mały wpływ na deformację kropli, to kryterium określającym zależność wielkości śladu kropli od jej pierwotnej wielkości średnicy jest stosunek sił inercji do sił napięcia powierzchniowego. Metodą eksperymentalną Stoker [25] [26] otrzymał zależność między rzeczywistą średnicą kropli a jej śladem powstającym w czasie uderzenia o twardą przeszkodę.

$$d_i = 1{,}25 \frac{d_i'}{\left[\frac{\gamma_c \cdot d_i' \cdot w_u}{\sigma}\right]^{\frac{1}{6}}} \qquad (27)$$

gdzie oznaczają

d_i (m) rzeczywista średnica kropli,

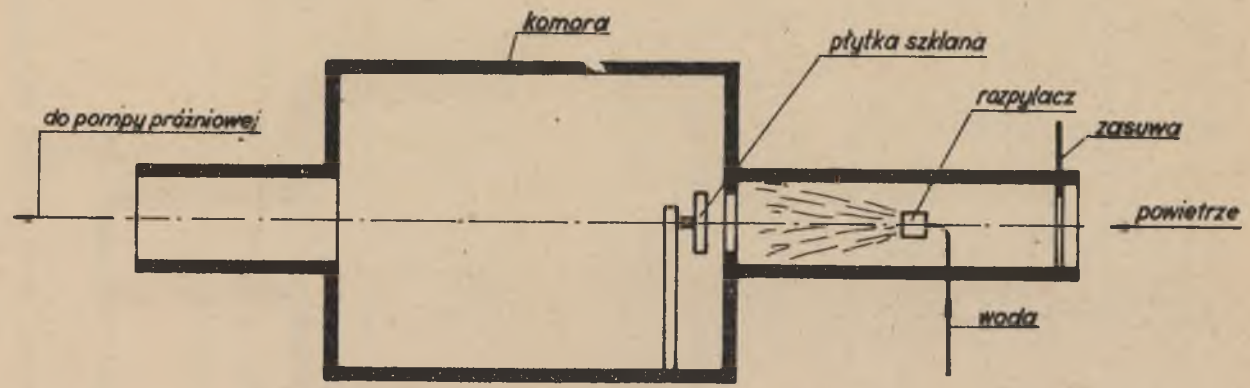
d_i' (m) - średnica śladu kropli,

γ_c ($\frac{kG}{m^3}$) - ciężar właściwy wody,

σ ($\frac{kG}{m}$) - napięcie powierzchniowe wody,

w_u ($\frac{m}{sec}$) - szybkość kropel, przy której następuje uderzenie.

W czasie pomiarów wielkości γ_c, σ, w_u, są zazwyczaj stałe i można je wprowadzić do współczynnika równania (27) co znacznie ułatwia obliczenie rzeczywistej wielkości kropel powstających w czasie rozpylania cieczy.



Rys. 4. Schemat przyrządu do mierzenia średnicy kropel

Na rys. 4 przedstawiono schemat przyrządu, na którym oznaczano wielkość kropel wody.
Zasadniczym elementem przyrządu jest komora, w której ustawiona jest prostopadle do przepływu płytka szklana, pokryta cienką warstwą sadzy. Przez komorę przeciąga się powietrze za pomocą pompy próżniowej. Ilość powietrza reguluje się przy pomocy zasuwy umieszczonej na wlocie do komory.

Do strumienia powietrza wprowadza się krople z rozpylacza, umieszczonego w rurociągu doprowadzającym powietrze do komory. Powietrze porywa krople wody i uderzając o prostopadłą powierzchnię szkła pozostawia ślady kropel. Prędkość przepływu powietrza jest duża (około 5-10 m/sec) tak, że prędkość kropli można przyjmować równą prędkości przepływu powietrza. Otrzymane ślady kropli na szkle poddaje się następnie badaniom mikroskopowym lub wykonuje się zdjęcia, na podstawie których ustala się średnicę śladów kropel. Znając średnice śladów kropel, średnicę rzeczywistą oblicza się ze wzoru (27). Aby uniknąć większych błędów przy określaniu średnicy kropel należy zbadać około 400-700 kropel.

Przedstawiona metoda pomiaru średnicy kropel jest bardzo żmudna i korzystanie z niej w obliczeniach praktycznych byłoby uciążliwe.

Autor niniejszego opracowania był zmuszony korzystać z wyżej opisanej metody ze względu na brak innych przyrządów pomiarowych.

Należy zwrócić jednak uwagę, że istnieją bardziej proste metody pomiaru średniej średnicy kropel.
Najlepszą metodą pomiaru średniej wielkości kropli wody wydaje się metoda optyczna.

Metoda optyczna polega na tym, że przy przejściu światła przez pęczek rozpylonej wody część światła zostaje zaabsorbowaną. Pomiar ilości zaabsorbowanego światła przeprowadza się przy pomocy spektrofotometru.

Tablica 2 podaje charakterystykę rozpylacza używanego w czasie eksperymentów (rys. 3), która została opracowana metodą podaną przez Stokera [25 26].

W obliczeniach początkowo zakładano, że średnia wielkość kropli jest średnią arytmetyczną i obliczano ją ze wzoru

$$d_c = \frac{\sum_1^n n_i \cdot d_i}{n} \qquad (28)$$

Po podstawieniu do wzoru (28) wartości z tablicy 2 otrzymujemy

$$d_c = \frac{203010}{494} = 411\mu = 411 \cdot 10^{-6}\ m$$

Tablica 2

Charakterystyka kropel wody wytwarzanych przez rozpylacz hydrauliczny (ø 1,5 mm, p = 2 atn)

Lp.	Nomin. średnica kropel d_i (μ)	Ilość kropel n_i	$n_i\ d_i$ (μ)	Powierzchnia rzutu kropel F_{ri} (μ^2)	$n_i\ F_{ri}$ (μ^2)	Objętość kropel $V_i\ n_i$ (μ^3)
1	10	-	-	-	-	-
2	20	-	-	-	-	-
3	30	2	60,0	706,86	1413,72	28274,3
4	40	5	200,0	1256,64	6283,20	107551,6
5	50	8	400,0	1963,50	15708,00	523598 ,8
6	100	29	2900,0	7853,98	227765,42	15184365,2
7	150	41	6150,0	17671,50	724531,50	72452986,0
8	200	48	9600,0	31415,90	1507963,20	201061920,0
9	300	53	15900,0	70685,80	3746347,40	749270010,0
10	400	66	26400,0	125663,60	8293797,60	2211681120,0
11	500	98	49000,0	196349,40	19242241,20	6414085300,0
12	600	84	50400,0	282743,00	23750412,00	9500173200,0
13	700	60	42000,0	384845,00	23090700,00	10775664000,0
	R a z e m	494	203010,0	-	80607163,24	29940292325,9

Jednostkową powierzchnię rzutu prostokątnego kropel obliczono ze wzoru

$$a = \frac{\sum_{1}^{n} n_i \cdot F_{r_i}}{\sum_{1}^{n} V_i} \qquad (29)$$

Podstawiając wartości z tablicy 2 otrzymujemy

$$a = \frac{80607163,2410^{-12}}{29940292325,910^{-18}} = 2700 \ m^2/m^3$$

W toku doświadczeń średnia średnica kropel nie ulegała zmianie (d_c - const) gdyż stosowano ten sam rozpylacz rys. 3 pracujący przy stałym ciśnieniu p = 2 atn.

Pewne zastrzeżenie może budzić przyjęcie średniej średnicy kropel jako średniej arytmetycznej dlatego po wyznaczeniu zależności między współczynnikiem "K" i średnią średnicę kropel (równanie 67)

$$K = \alpha' \cdot d_c^{0,5} \qquad (30)$$

drogą podobnego rozumowania jak przy wyprowadzeniu średniej średnicy poprawionej dla aerozolu, obliczono średnią średnicę kropel poprawioną

$$d_c = \left[\frac{\sum_{1}^{n} n_i \cdot d_{c_i}^{0,5}}{n} \right]^2 \qquad (31)$$

Obliczona średnia średnica kropel poprawiona na podstawie wzoru (31) z danych zawartych w tablicy 2, daje wartość d_c = = 380 μ.

Powstały błąd przy obliczeniu "K" ze względu na założenie średniej średnicy kropel jako średniej arytmetycznej wynosi + 5,6%.

Średnia prędkość kropel

Początkowo zakładano, że średnia prędkość kropel jest prędkością opadania średniej kropli w powietrzu. Założenie to budzi

wątpliwości, dlatego po znalezieniu zależności między prędkością względną "w" i współczynnikiem "K" wyprowadzono wzór na średnią prędkość "w" poprawioną.

Rozumując podobnie jak przy wyprowadzeniu wzoru na średnią średnicę pyłu poprawioną otrzymujemy równanie

$$w = \left[\frac{\sum_{1}^{n} n_i \cdot w_i^{1,8}}{n} \right]^{0,556} \tag{32}$$

Średnia prędkość kropel jest różnicą między prędkością względną i prędkością aerozolu (gazu)

$$w_k = w - w_g \tag{33}$$

Po wprowadzeniu równania (32) do równania (33) mamy

$$w_k = \left[\frac{\sum_{1}^{n} n_i \cdot w_i^{1,8}}{n} \right]^{0,556} - w_g \tag{34}$$

Z równania (34) można obliczyć średnią prędkość kropel.

W tablicy 3 zestawiono wartość prędkości względnej obliczonej dla średniej kropli i wartości średniej prędkości "w" poprawionej obliczonej na podstawie równania (32) oraz podano wielkość przeciętnego błędu przy obliczaniu "K", jeżeli zamiast średniej prędkości "w" poprawionej stosuje się prędkość "w" obliczoną jak dla średniej kropli.

5. Równanie kryterialne współczynnika szybkości odpylania

Z rozważań ogólnych i przeprowadzonych eksperymentów wynika, że współczynnik szybkości odpylania "K" jest funkcją parametrów ujętych równaniem (11).

$$K = f(d_c, d_p, \gamma_p, w, \eta_g) \tag{11}$$

gdzie oznaczają:

d_c (m) - średnia średnica kropel wody,

d_p (m) - średnia średnica cząstek aerozolu,

$\gamma_p \left(\frac{kg}{m^3}\right)$ - gęstość aerozolu,

$w\left(\frac{m}{h}\right)$ - prędkość względna aerozolu względem kropel,

$\eta_g \left(\frac{kg}{mh}\right)$ - lepkość gazu.

Drogą analizy wymiarowej znajdujemy kształt ogólnej funkcji podanej równaniem (11)

$$\frac{K}{w} = C \left| \frac{d_c \cdot w \cdot \gamma_p}{\eta_g} \right|^a \cdot \left| \frac{d_p \cdot w \cdot \gamma_p}{\eta_g} \right|^b \qquad (35)$$

Mnożąc równanie (35) przez stosunek gęstości pyłu do gęstości gazu $\left(\frac{\gamma_p}{\gamma_g}\right)^{a+b}$ i przekształcając otrzymujemy zasadnicze równanie kryterialne współczynnika szybkości odpylania

$$\frac{K}{w} = C \left| \frac{d_c \cdot w \cdot \gamma_g}{\eta_g} \right|^a \cdot \left| \frac{d_p \cdot w \cdot \gamma_g}{\eta_g} \right|^b \cdot \left| \frac{\gamma_p}{\gamma_g} \right|^{a+b} \qquad (36)$$

Równanie (36) możemy napisać w skróconej formie

$$M = C \cdot Re_c^a \cdot Re_p^b \cdot T_1^{\,a+b} \qquad (37)$$

gdzie oznaczają

M - bezwymiarową liczba Margulisa,

Re_c - bezwymiarowa liczba Reynoldsa dla kropel wody,

Re_p - bezwymiarowa liczba Reynoldsa dla pyłu,

T_1 - bezwymiarowy simpleks gęstości.

W dwóch urządzeniach odpylających geometrycznie podobnych, zjawiska wydzielania aerozolu będą przebiegały w sposób podob-

Tablica 3

Porównanie wartości prędkości względnej "w" obliczonej dla średniej arytmetycznej średnicy kropel i przy pomocy wzoru na średnią prędkość względną poprawioną

Średnia prędkość "w" obliczona dla średniej kropli	3,5	3,8	4,3	4,7	5,1	3,5	4,5	4,1	5,7	5,8	U w a g i
Średnia prędkość "w" obliczona jako średnia poprawiona	3,707	4,007	4,507	4,907	5,307	3,707	4,707	4,307	5,907	6,0	W obliczeniach przyjęto prędkość aerozolu równą prędkości gazu
Stosunek średniej prędkości "w" poprawionej do obliczonej dla średniej średnicy kropel	1,06	1,052	1,048	1,043	1,039	1,058	1,045	1,05	1,035	1,033	
Średnia prędkość "w" obliczona dla średniej kropli	2,743	2,4	2,46	2,5	2,54	2,6	2,72	2,84	3,10	5,5	U w a g i
Średnia prędkość "w" obliczona jako średnia poprawiona	2,94	2,607	2,667	2,707	2,747	2,807	2,927	3,047	3,307	5,707	Średni błąd przy obliczeniu "K" wynosi - 11,1%
Stosunek średniej prędkości "w" poprawione do obl. dla śred.arytmet. średnicy kropli	1,07	1,086	1,085	1,082	1,08	1,08	1,077	1,072	1,068	1,037	

ny, jeżeli w obu wypadkach zachodzi równość następujących liczb podobieństwa:

$$M = M' \tag{38}$$

$$Re_c = Re'_c \tag{39}$$

$$Re_p = Re'_p \tag{40}$$

$$T_1 = T'_1 \tag{41}$$

W praktyce równość taka zachodzi bardzo rzadko, wystarczy jednak aby zachodziła równość modułów odgrywających zasadniczą rolę w procesie, żeby zjawiska wydzielania aerozolu w dwóch urządzeniach przebiegały w sposób podobny.

Równaniu (36) można nadać formę roboczą po wyznaczeniu wykładników potęgowych a, b i stałej "C".

Wyznaczenie wykładników potęgowych i stałej jest możliwe tylko na podstawie szeregu eksperymentów, których wyniki ujęto w załączonych tablicach 4-12.

Wielkość wykładników potęgowych a, b wyznaczamy drogą eksperymentu na doświadczalnej instalacji półtechnicznej przez kolejną zmianę jednej zmiennej w poszczególnych liczbach bezwymiarowych równania (35). Przeprowadzmy eksperyment przy określonych parametrach oznaczonych indeksem 1, a więc d_{p_1}, d_{c_1}, γ_{p_1}, w_1, η_{g_1}, dla parametrów tych zmierzono współczynnik szybkości odpylania K_1, dla tych parametrów musi być spełnione równanie (35).

$$\frac{K_1}{w_1} = C \left| \frac{d_{c_1} \cdot w_1 \cdot \gamma_{p_1}}{\eta_{g_1}} \right|^a \cdot \left| \frac{d_{p_1} \cdot w_1 \cdot \gamma_{p_1}}{\eta_{g_1}} \right|^b \tag{42}$$

Jeżeli przeprowadzimy na tej samej instalacji drugi eksperyment z zachowaniem wszystkich parametrów takich samych jak w eksperymencie pierwszym, a jedynie zmienimy średnią średnicę aerozolu, z d_{p_1} na d_{p_2}, to współczynnik "K" będzie miał wartość K_2.

Dla parametrów drugiego eksperymentu równanie (35) również musi być spełnione.

$$\frac{K_2}{w_1} = C \left| \frac{d_{c_1} \cdot w_1 \cdot \gamma_{p_1}}{\eta_{g_1}} \right|^a \cdot \left| \frac{d_{p_2} \cdot w_1 \cdot \gamma_{p_1}}{\eta_{g_1}} \right|^b \tag{43}$$

Dzieląc równanie (42) przez równanie (43) otrzymujemy

$$\frac{K_1}{K_2} = \left| \frac{d_{p_1}}{d_{p_2}} \right|^b \tag{44}$$

Logarytmując równanie (44) mamy

$$\log \left(\frac{K_1}{K_2}\right) = b \log \left(\frac{d_{p_1}}{d_{p_2}}\right) \tag{45}$$

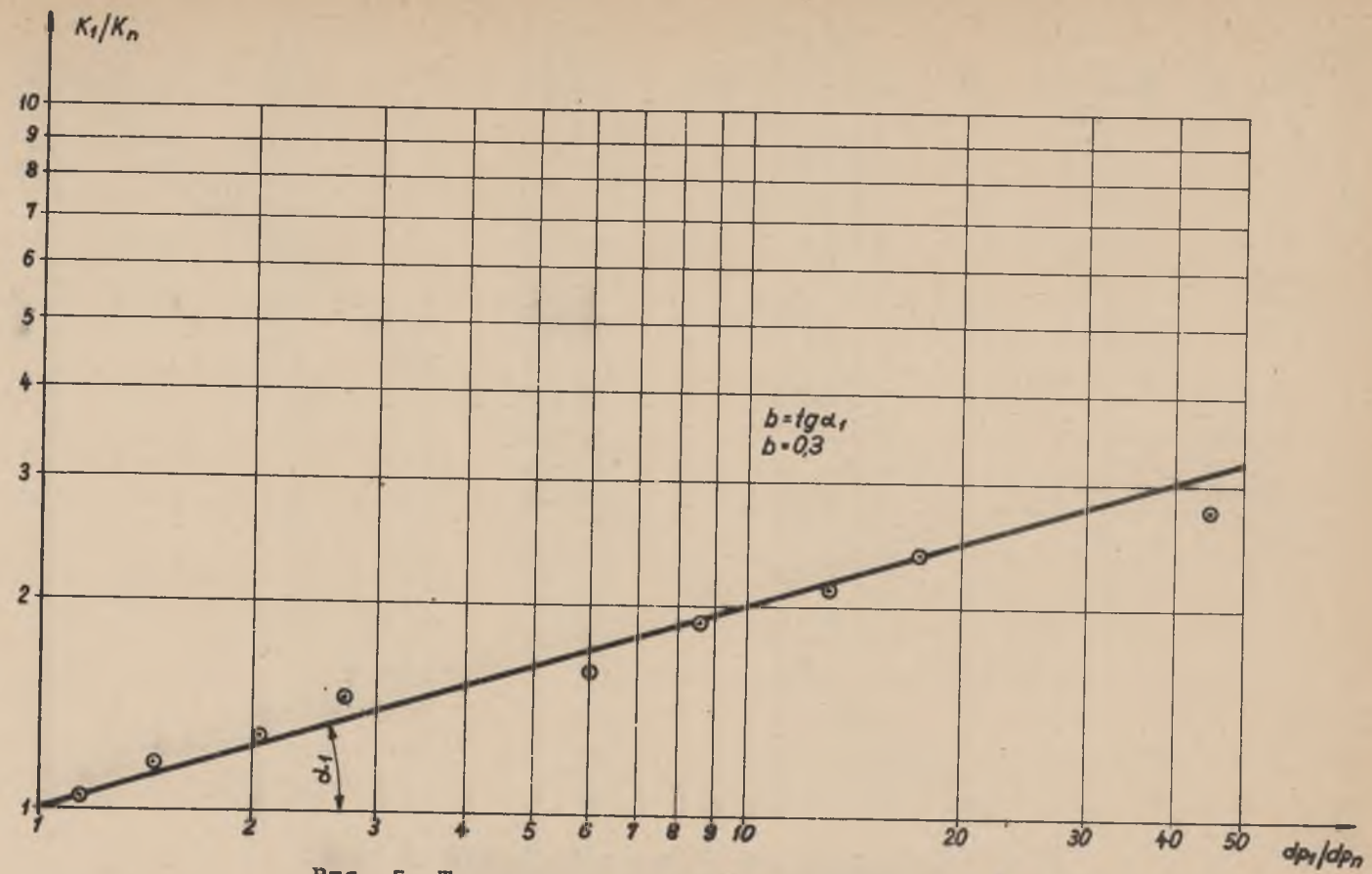
Z równania (45) można obliczyć wykładnik potęgowy "b"

$$b = \frac{\log \frac{K_1}{K_2}}{\log \frac{d_{p_1}}{d_{p_2}}} \tag{46}$$

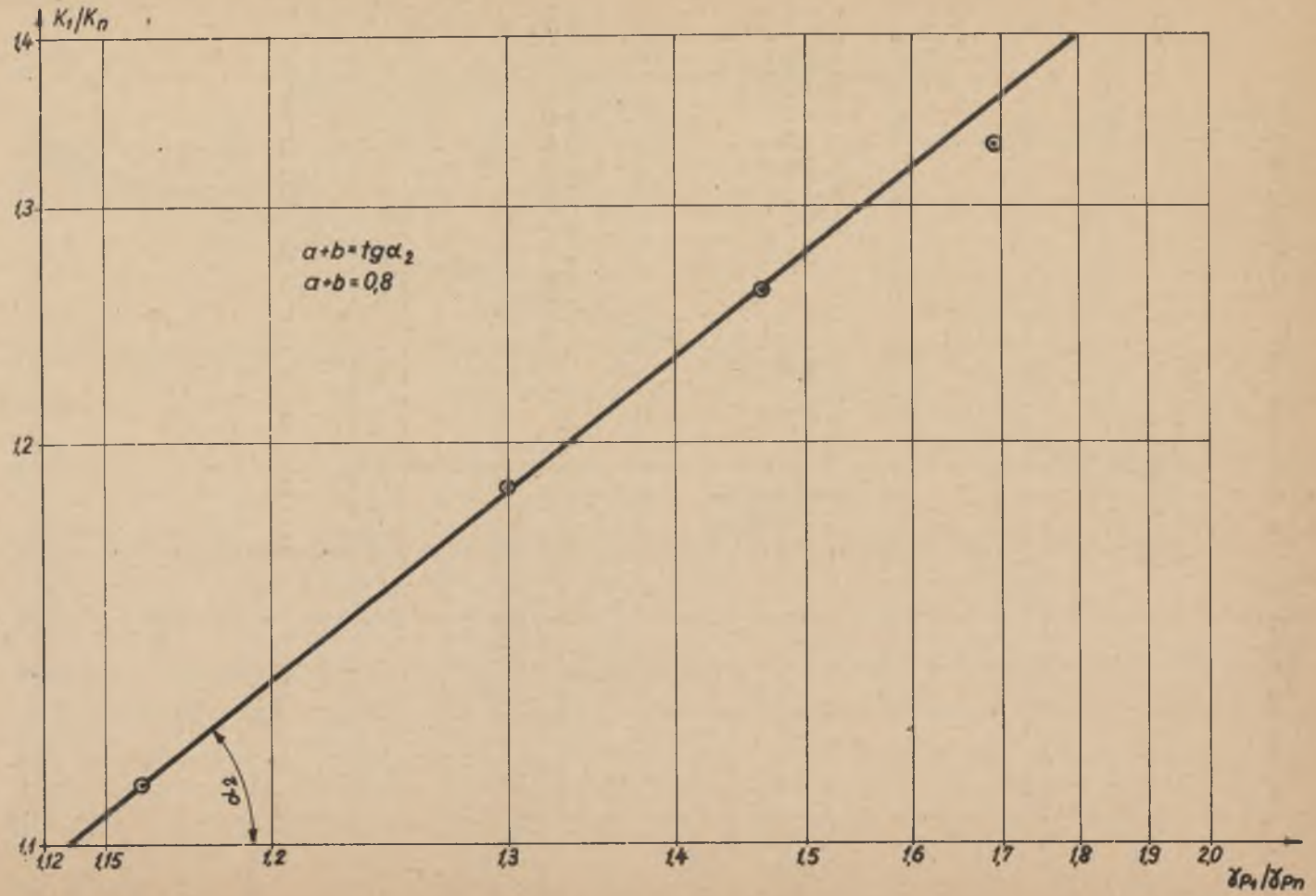
Wygodniej jednak jest znaleźć wartość wykładnika "b" z wykresu (rys. 5). Jeżeli przeprowadzimy całą serię doświadczeń zachowując wszystkie parametry takie same a jedynie zmieniając średnią średnicę aerozolu to dla odpowiednich średnic aerozolu otrzymamy szereg wartości "K" (tablice 5-6). Z równania (45) wynika, że jeżeli sporządzimy wykres zależności logarytmów stosunków średnic i współczynników szybkości odpylania to wykres ten w układzie logarytmicznym będzie linią prostą, a tangens pochylenia tej prostej będzie właśnie szukanym wykładnikiem potęgowym b = 0,3 (rys. 5).

Prowadząc inną serię doświadczeń z różnymi aerozolami o różnym ciężarze właściwym i tej samej granulacji oraz zachowując wszystkie parametry takie same jak w pierwszym doświadczeniu, to po podstawieniu do równania (35) odpowiednich parametrów otrzymamy:

$$\frac{K_3}{w_1} = C \left| \frac{d_{c_1} \cdot w_1 \cdot \gamma_{p_3}}{\eta_{g_1}} \right|^a \cdot \left| \frac{d_{p_1} \cdot w_1 \cdot \gamma_{p_3}}{\eta_{g_1}} \right|^b \tag{47}$$



Rys. 5. Wyznaczenie wykładnika potęgowego "b"



Rys. 6. Wyznaczenie wykładników potęgowych a+b

Dzieląc równanie (42) przez równanie (47) otrzymujemy:

$$\frac{K_1}{K_3} = \left| \frac{\gamma_{p_1}}{\gamma_{p_3}} \right|^{a+b} \tag{48}$$

Logarytmując równanie (48) otrzymamy

$$\log \frac{K_1}{K_3} = (a + b) \log \frac{\gamma_{p_1}}{\gamma_{p_3}} \tag{49}$$

Dla całej serii doświadczeń (tablica 11) możemy otrzymać szereg wartości "K" i sporządzić wykres w układzie logarytmicznym zależności stosunków współczynnika "K" od stosunków gęstości aerozolu, który będzie linią prostą (rys. 6). Tangens pochylenia tej prostej jest szukaną sumą wykładników potęgowych

$$a + b = 0,8 \tag{50}$$

Ponieważ z wykresu rys. 5 wyznaczono wartość wykładnika potęgowego b = 0,3, to podstawiając tą wartość do równania (50) otrzymujemy wykładnik potęgowy a = 0,5.
Stałą "C" możemy obliczyć z równania (35).

$$C = \frac{\frac{K}{w}}{\left| \frac{d_c \cdot w \cdot \gamma_p}{\eta_g} \right|^{a} \left| \frac{d_p \cdot w \cdot \gamma_p}{\eta_g} \right|^{b}} \tag{51}$$

Stałą wyznaczamy dla następujących wartości obliczonych i zmierzonych parametrów

$K = 5,30 \ \frac{m}{h}$

$w = 9,45 \cdot 10^3 \ \frac{m}{h}$

$d_p = 42,2 \cdot 10^{-6} \ m$

$\gamma_p = 2,2 \cdot 10^3 \ \frac{kg}{m^3}$

$\eta_g = 6{,}56.10^{-2}\ \frac{kg}{m.h}$

$d_c = 4{,}11.10^{-4}$ m

a = 0,5

b = 0,3

Po podstawieniu powyższych wartości do równania (51) otrzymujemy

$$C = 9{,}0.10^{-8}$$

Po wyznaczeniu stałej i wykładników potęgowych równanie współczynnika szybkości odpylania będzie miało postać:

$$\frac{K}{w} = 9{,}0.10^{-8} \cdot \left| \frac{d_c \cdot w \cdot \gamma_g}{\eta_g} \right|^{0,5} \cdot \left| \frac{d_c \cdot w \cdot \gamma_g}{\eta_g} \right|^{0,3} \left| \frac{\gamma_p}{\gamma_g} \right|^{0,8} \qquad (52)$$

lub w formie skróconej

$$M = 9{,}0.10^{-8} \cdot Re_c^{0,5} \cdot Re_p^{0,3} \cdot T_1^{0,8} \qquad (53)$$

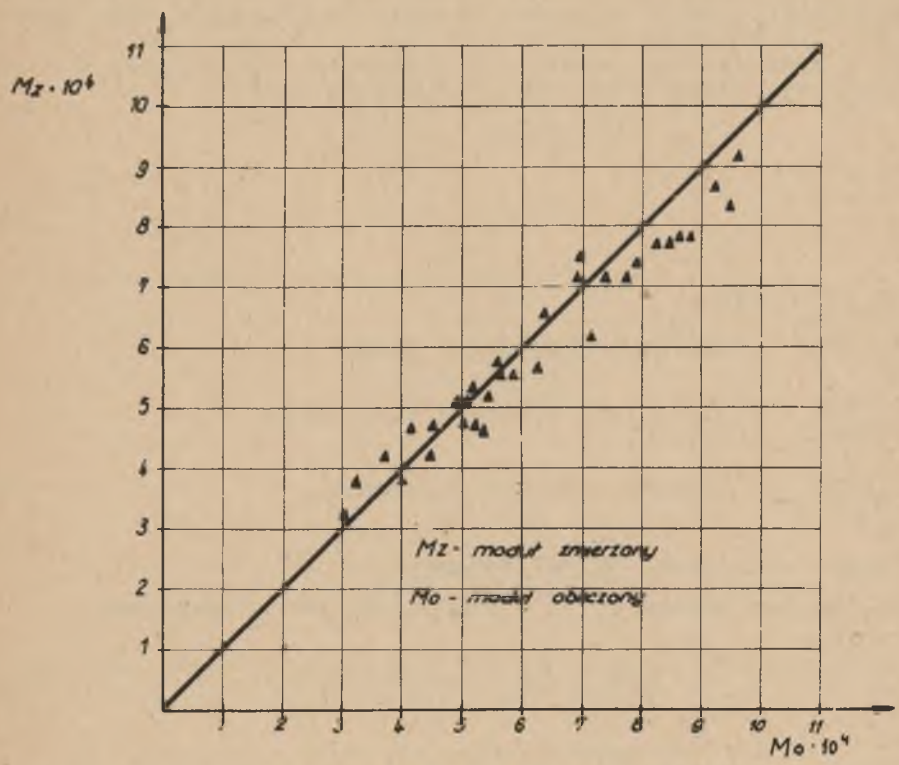
Równanie (52) stanowi roboczą formę równania kryterialnego współczynnika szybkości odpylania "K".

W dotychczasowych doświadczeniach zachowywano stałe zraszanie skrubera d_c = const. F_r = const. i stała prędkość względna "w". Prędkość względna "w" ma jednak decydujący wpływ na współczynnik "K" dlatego przeprowadzono całą serię doświadczeń przy zmiennej prędkości "w" zachowując również stałe zraszanie skrubera, a zmieniając prędkość przepływu zapylonego gazu przez skruber. Wyniki tych doświadczeń (tablice 7-9) potwierdziły prawdziwość wyprowadzonego równania (52).

Ogólnie dla opracowania równania (52) przeprowadzono 51 pomiarów co może nie jest liczbą dużą, należy wziąć jednak pod uwagę, że tego typu pomiary są bardzo żmudne, kosztowne i wymagają przeprowadzenia całego szeregu pomiarów zerowych dla właściwego ustawienia instalacji badawczej.

Wyprowadzone równanie kryterialne (52) jest słuszne dla powietrza $\gamma_g \cong 1{,}2$ kg/m^3, cząstek pyłów d_p = 5-200 μ, prędkości przepływu gazów przez skruber wg $\leq$ 5 m/sec. początkowego stężenia zapylenia C_o = 5 g/cm^3, charakterystyki rozpylacza podanej w

tabeli 2.Rozpylacz zraszał powierzchnię przekroju skrubera wynoszącą 4 dcm^2, ponieważ około 34% wody ściekało po ściankach skrubera, można przypuszczać, że używany rozpylacz jest w stanie zraszać powierzchnię ok.5,4 dcm^2 z tym samym efektem. Wartość błędu względnego równania (52) nie przekracza + 17%.



Rys. 8. Wykres Modułu "M"

Na rys. 8 przedstawiono wykres zależności modułu "M" obliczonego od zmierzonego.

6. Zależność między sprawnością odpylania i współczynnikiem szybkości odpylania

Powszechnie stosowanym w technice odpylania parametrem, charakteryzującym urządzenie odpylające jest sprawność odpylania.

Bardzo ważnym elementem dla projektanta urządzenia odpylającego jest znajomość wpływu parametrów odpylania na sprawność odpylania. Ponieważ znaleziono wpływ parametrów odpylania na współczynnik szybkości odpylania, wystarczy znaleźć zależność między współczynnikiem szybkości odpylania a sprawnością odpylania dla danego typu urządzenia odpylającego, aby otrzymać pełną charakterystykę urządzenia.

Masę wydzielanego aerozolu w urządzeniu odpylającym w ciągu jednostki czasu można określić równaniami:

$$G = K \cdot F_r \cdot \Delta C_m \tag{1}$$

$$G = V_g \cdot (C_p - C_k) \tag{54}$$

gdzie oznaczają:

V_g $(\frac{m^3}{h})$ - natężenie przepływu gazu,

C_p $(\frac{kg}{m^3})$ - początkowe stężenie zapylenia,

C_k $(\frac{kg}{m^3})$ - końcowe stężenie zapylenia.

Pozostałe oznaczenia jak w równaniu (1)

Porównując równanie (1) z równaniem (54) otrzymujemy:

$$K.F_r \cdot \Delta C_m = V_g(C_p - C_k) \tag{55}$$

Sprawność odpylania "η" definiuje się jako stosunek różnicy stężeń początkowego i końcowego do stężenia początkowego.

$$\eta = \frac{C_p - C_k}{C_p} \tag{56}$$

Średnią różnicę stężenia zapylenia można traktować jako średnią logarytmiczną stężenia początkowego i końcowego

$$\Delta C_m = \frac{C_p - C_k}{\ln \frac{C_p}{C_k}} \tag{16}$$

Wprowadzając równanie (16) do równania (55) otrzymujemy:

$$K\, F_r \cdot \frac{C_p - C_k}{\frac{C_p}{C_k}} = V_g (C_p - C_k) \tag{57}$$

Po uproszczeniu i przekształceniach mamy:

$$\ln \frac{C_p}{C_k} = \frac{K \cdot F_r}{V_g} \tag{58}$$

lub

$$\frac{C_p}{C_k} = \exp \left| \frac{K \cdot F_r}{V_g} \right| \tag{59}$$

Końcowe stężenie zapylenia możemy obliczyć ze wzoru:

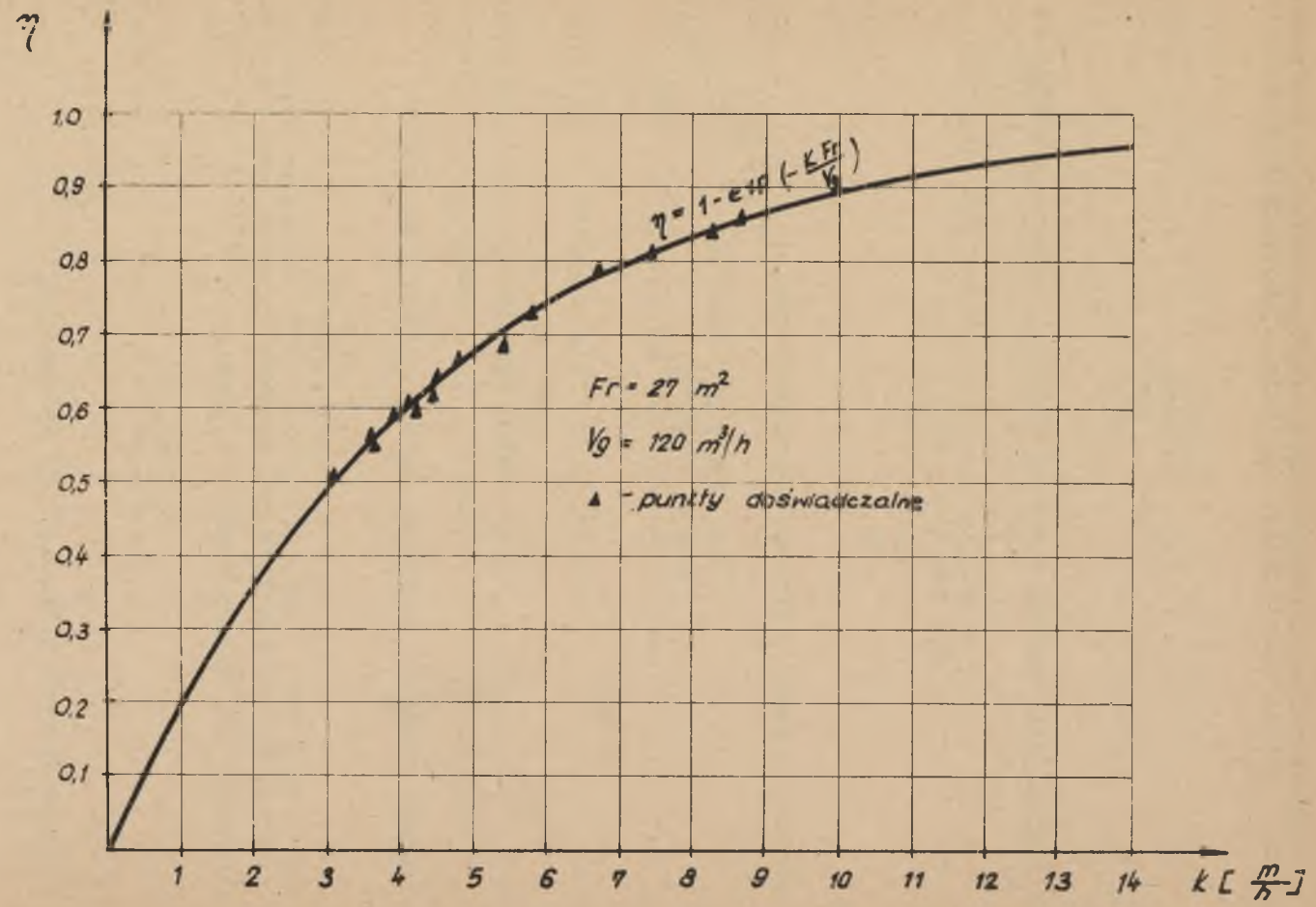
$$C_k = C_p \cdot \exp \left| - \frac{K\, F_r}{V_g} \right| \tag{60}$$

Równanie (56) możemy napisać w formie

$$\eta = 1 - \frac{C_k}{C_p} \tag{61}$$

Przekształcając równanie (59) otrzymujemy:

$$\frac{C_k}{C_p} = \exp \left| - \frac{K\, F_r}{V_g} \right| \tag{62}$$


η
1,0
0,9
0,8
0,7
0,6
0,5
0,4
0,3
0,2
0,1
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
k [m/h]
η = 1 - exp (- k Fr / Vg)
Fr = 27 m²
Vg = 120 m³/h
▲ - punkty doświadczalne

Rys. 7. $\eta = f(k)$

Po wprowadzeniu równania (62) do równania (61) otrzymamy zależność między sprawnością odpylania i współczynnikiem szybkości odpylania.

$$\eta = 1 - \exp\left| - \frac{K\,F_r}{V_g} \right| \qquad (63)$$

Wykres równania (63) z naniesionymi punktami doświadczalnymi przedstawiono na rys. 7.

Współczynnik szybkości odpylania dla przeprowadzonych eksperymentów na doświadczalnej instalacji półtechnicznej wyznaczano z równania (58):

$$K = \frac{V_g}{F_r} \cdot \ln \frac{C_p}{C_k} \qquad (64)$$

Mierząc każdorazowo wielkości stężeń początkowego i końcowego przy określonych parametrach "V_g" i "F_r" z równania (64) można wyliczyć współczynnik szybkości odpylania "K". Wyniki pomiarów zamieszczono w tablicach 4-12.

Ilość wydzielonego aerozolu w skruberze można określić równaniem:

$$G = F_A \cdot w_g \cdot C_p \cdot \eta \qquad (65)$$

F_A [m^2]- powierzchnia przekroju skrubera.

Wprowadzając do równania (65) równanie (63) otrzymamy:

$$G = F_A \cdot w_g \cdot C_p \cdot \left[1 - \exp\left| - \frac{K.F_r}{V_g} \right| \right] \qquad (66)$$

Równanie (66) stanowiące cel naszych rozważań jest rozwiniętą formą równania (1) i ujmuje wpływ wszystkich zasadniczych parametrów na ilość wydzielonego aerozolu w skruberze zraszanym rozpyloną wodą.

Z równania (66) wynika, że ilość wydzielonego aerozolu w skruberze zależy od początkowego stężenia zapylenia gazów na wlocie do skrubera: im stężenie początkowe jest większe, tym większą masę aerozolu można wytrącić ze strumienia gazów w urządzeniu odpylającym.

Równanie (66) jest bardzo pomocne przy projektowaniu skruberów do odpylania gazów, gdyż pozwala przewidzieć w sposób

teoretyczny ilość wydzielonego aerozolu dla określonych wymiarów skrubera i parametrów odpylania.

7. Omówienie wyników badań

Równanie kryterialne na współczynnik szybkości odpylania "K" (52) zostało wyprowadzone przy początkowych założeniach, że średnie średnice aerozolu i kropel rozpylonej cieczy są średnimi arytmetycznymi oraz, że średnia prędkość kropel jest prędkością opadania średniej kropli.

Po znalezieniu zależności między parametrami odpylania a współczynnikiem "K" wyznaczono następnie średnie średnice kropel i pyłów jako średnie poprawione (wzór 26, 31) oraz średnią prędkość względną poprawioną (wzór 32).

Średni błąd popełniony przy obliczaniu "K" wskutek przyjęcia średniej średnicy aerozolu jako średniej arytmetycznej wynosi + 4,7% (tabela 1).

Obliczony błąd na skutek przyjęcia średniej średnicy kropel jako średniej arytmetycznej wynosi +5,6%.

Całkowity dodatni błąd wynosi 4,7 + 5,6 = + 10,3%

Błąd powstały przy obliczaniu "K" na skutek przyjęcia średniej prędkości opadania kropel jak dla średniej średnicy kropel jest błędem ujemnym i wynosi - 11,1%.

Widzimy więc, że błędy te prawie się znoszą i nie zachodzi konieczność wprowadzenia do równania (52) dodatkowych poprawek.

Wyprowadzone równanie kryterialne na współczynnik szybkości odpylania "K" (52) możemy przedstawić jako jednomian iloczynu potęg parametrów wchodzących w skład tego równania

$$K = 9{,}0 \cdot 10^{-8} \cdot w^{1{,}8} \cdot d_c^{0{,}5} \cdot \gamma_p^{0{,}8} \cdot \eta_g^{-0{,}8} \cdot d_p^{0{,}3} \qquad (67)$$

Z równania (67) wynika, że prędkość względna "w" aerozolu względem kropel wody wpływa w decydującym stopniu na współczynnik szybkości odpylania "K", gdyż wykładnik potęgowy występujący przy tym parametrze jest największy i wynosi 1,8.

Aby proces wydzielania aerozolu przy pomocy rozpylonej wody był wydajny, należy stosować duże prędkości względne.

W skruberach przeciwprądowych prędkość względną aerozolu względem kropel wody oblicza się jako sumę prędkości opadania kropel "w_k" i prędkości gazu "w_g".

$$w = w_k + w_g \qquad (33)$$

Prędkość gazu w skruberze nie może być dowolnie zwiększana, gdyż przy prędkościach gazu większych od prędkości opadania, następuje porywanie kropel cieczy, a prędkość względna maleje.

Jednym ze sposobów pozwalającym na zwiększenie prędkości względnej "w" jest zwiększenie prędkości kropel "w_k", jednak nie zawsze da się to przeprowadzić.

Jeżeli skruber nie posiada rozpylaczy cieczy mechanicznych lub pneumatycznych, a rozpylanie cieczy odbywa się przy pomocy sitek, to raczej nie posiadamy możliwości wydatnego zwiększenia prędkości kropel cieczy. Prędkość cieczy jest wtedy średnią prędkością opadania kropel cieczy. Wydatne zwiększenie prędkości kropel cieczy w skruberze osiągnąć można jedynie przez zastosowanie rozpylaczy mechanicznych lub pneumatycznych o dużej prędkości wypływu. Wpływ prędkości względnej na współczynnik "K" przedstawiono graficznie na rys. 9.

Drugim parametrem odgrywającym dużą rolę w procesach wydzielania aerozolu jest gęstość aerozolu "γ_p".
Wykładnik występujący przy tym parametrze wynosi 0,8. Wydzielanie cząstek aerozolu zachodzi tym intensywniej im gęstość aerozolu jest większa. Pyły o gęstości dużej odpylają się lepiej niż pyły o gęstości małej (rys. 10).

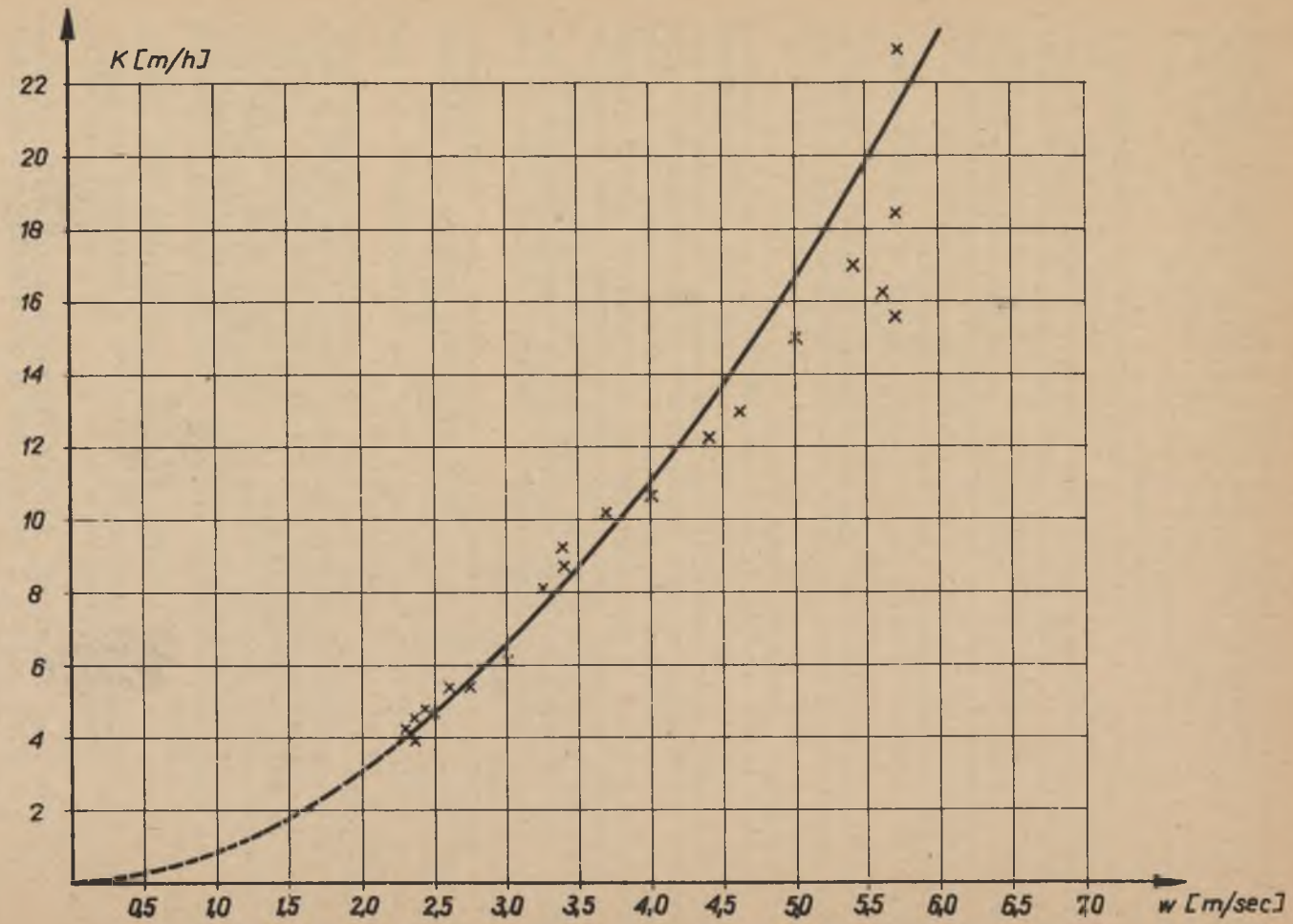
Lepkość gazów występuje w równaniu (67) w potędze -0.8 co wskazuje, że im lepkość gazów jest mniejsza tym współczynnik szybkości odpylania jest większy. W procesach wydzielania aerozolu z gazów mamy na ogół do czynienia z gazami, których skład chemiczny jest zbliżony do powietrza, zbliżone są do powietrza paramtery lepkości i gęstości gazów. Dla różnych gazów odpylanych parametr lepkości gazów nie odbiega od wartości parametru lepkości dla powietrza w danej temperaturze. Lepkość gazów w temperaturach wysokich jest większa niż w temperaturach niskich, dlatego gazy o temperaturze wysokiej trudniej jest odpylić niż gazy o temp. niskiej.

Parametrem posiadającym najmniejszy wpływ na współczynnik "K" jest średnica pyłu "d_p", gdyż wykładnik potęgowy, występujący przy tym parametrze wynosi 0,3 (rys. 11).

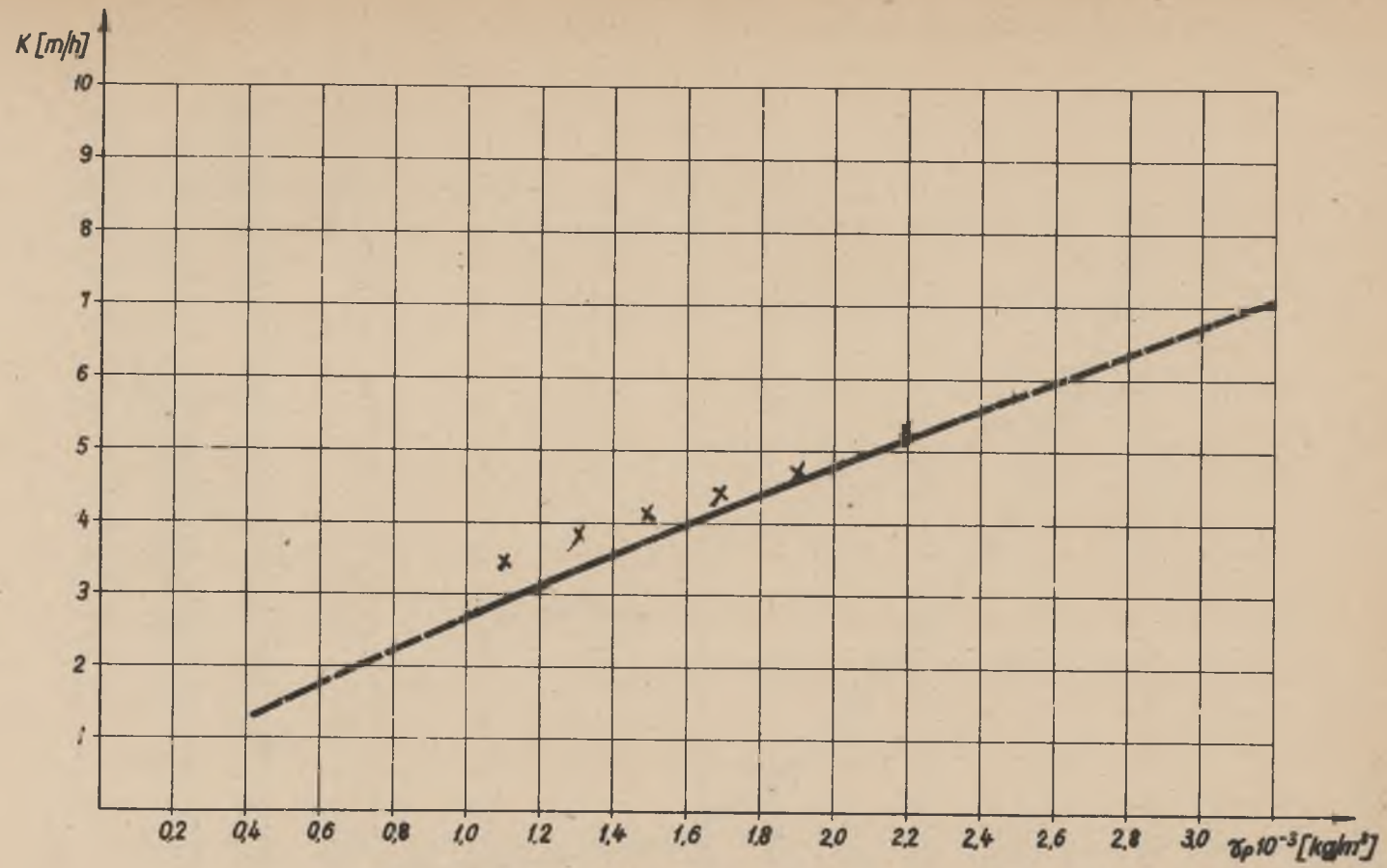
Wpływ średniej średnicy kropli "d_c" na współczynnik "K" nie jest duży i wyraża się wykładnikiem 0,5.

Jak wynika z wzoru (35) nie jest bez znaczenia dla procesów wydzielania aerozolu z gazów wielkość kropel wody "d_c". W miarę wzrostu średniej średnicy kropel wzrasta współczynnik szybkości odpylania, wydawałoby się, że istnieje prosty sposób zwiększania współczynnika szybkości odpylania przez zwiększenie średniej średnicy kropel, której wielkość możemy regulować w pewnych granicach stosując różnego typu rozpylacze o różnych parametrach pracy.
Badając wpływ stosunku średnic $\frac{d_c}{d_p}$ na współczynnik "K" dochodzi się do wniosku, że wpływa on w sposób zasadniczy na współczynniki "K" (badania przeprowadzono przy dc = const, zmieniając jedynie "dp").

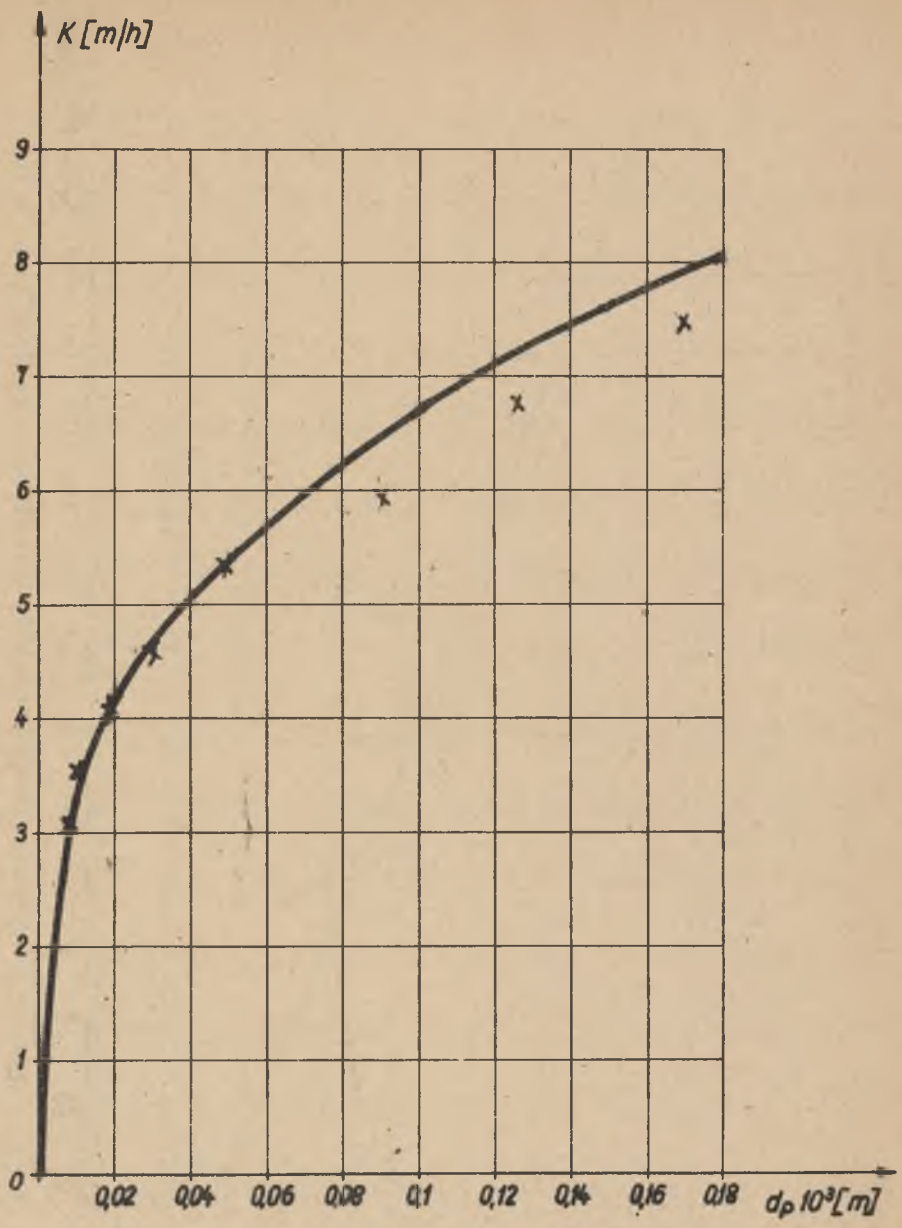
Z wykresu rys. 12 widać, że współczynnik szybkości odpylania bardzo szybko rośnie i osiąga swoje maksimum, gdy stosunek średnic d_c/d_p przyjmuje wartość 1.



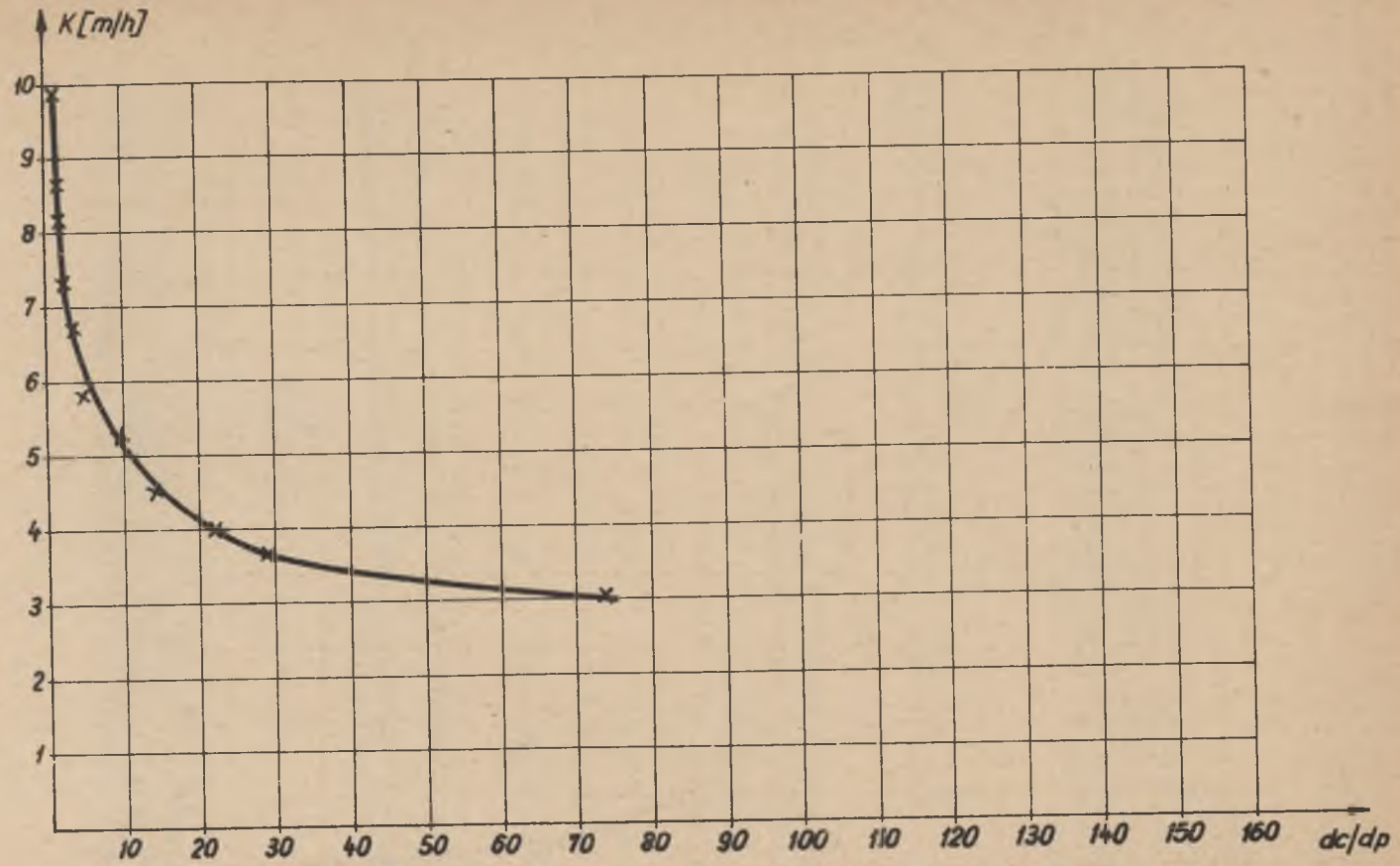
Rys. 9. Wpływ prędkości względnej na współczynnik "K"



Rys. 10. Wpływ gęstości pyłów na współczynnik "K"



Rys. 11. Wpływ średniej średnicy cząstek pyłów na współczynnik "K"



Rys. 12. Wpływ stosunku średnic do/dp na współczynnik "K"

Najlepsze wyniki osiąga się przy wydzielaniu aerozolu za pomocą rozpylonej cieczy, jeżeli wymiary średniej średnicy aerozolu "dp" są zbliżone do wymiarów średniej średnicy rozpylonej cieczy "dc".

8. Wnioski

Efekt wydzielania aerozolu z fazy gazowej przez wtrysk wody do gazu określa współczynnik szybkości odpylania. W przypadku skrubera zraszanego rozpyloną wodą, współczynnik szybkości odpylania daje się przedstawić równaniem kryterialnym ujmującym wpływ wszystkich istotnych zmiennych dla procesu wydzielania aerozolu.

$$\frac{K}{w} = 9{,}0 \cdot 10^{-8} \cdot \left| \frac{d_c \cdot w \cdot \gamma_g}{\eta_g} \right|^{0,5} \cdot \left| \frac{d_p \cdot w \cdot \gamma_g}{\eta_g} \right|^{0,3} \left| \frac{\gamma_p}{\gamma_g} \right|^{0,8} \tag{52}$$

Równanie (52) jest słuszne przy odpylaniu powietrza w skruberze zraszanym rozpyloną wodą przy

$d_p = 5 : 200\mu$

$d_c = 380\mu$

$w_g \leq 3$ m/sec

$C_p = 5$ g/cm^3

$\gamma_g \cong 1{,}2 \frac{kg}{m^3}$

Dokładność równania (52) dla 32 punktów doświadczalnych wynosi ok. ± 17%.

Sprawność odpylania skrubera zraszanego rozpyloną wodą określa wyprowadzony wzór

$$\eta = 1 - \exp \left| - \frac{K \cdot F_r}{V_g} \right| \tag{63}$$

Przeprowadzone badania potwierdziły, że w zakresie wyżej wyszczególnionych zmiennych, zastosowanie analogii do wymiany masy daje wyniki dobrze odpowiadające rzeczywistości.

9. LITERATURA

[1] Barth W.: Erzmetal 8, 101 (1955).

[2] Barth W.: Staub 19, 175 (1958).

[3] Fuks N.A.: Mechanika Aerozolei, Izdatelstwo Akademi Nauk ZSRR Moskwa (1955).

[4] Gütherboth H.: Staub 21, 430 (1961).

[5] Müller L.: Freiberger Forschungshefte 23, 158 (1957).

[6] Eichfelder K.:Erzmetal 8, 111 (1955).

[7] Udrycki A.: Hutnik 12, 448 (1955).

[8] Brun E., Caron R., Vasseur M.: Group. Rechershes Aeronaut Rap.techn. Nr 15 (1945).

[9] Johnstone R.F., Roberst M.H.: Ind. Eng. Chem. 41, 2417 (1949).

[10] Boucher R.M.G.: L'Ind. Chimique 5, 71 (1952).

[11] Krakowski J., Pikoń J.: Przemysł Chemiczny 39, 345 (1960).

[12] Barth W.: Staub 21, 382 (1961).

[13] Barth W.: Erzbergbau Metallhüttenwes 8, 101 (1955).

[14] Albrecht F.: Physikalische Zeitschrift 32, 48 (1931).

[15] Sell W.: VDI Forschungsheft Nr 347 (1931).

[16] Hausberg G.: Staub 21, 418 (1961).

[17] Meldau R.: Handbuch der Staubtechnik Bd 1 u 2 VDI Verlag Düsseldorf (1952).

[18] Żurakowski S.: Aparatura Przemysłu Chemicznego, PWT W-wa (skrypt) (1954).

[19] Hobler T.: Dyfuzyjny Ruch Masy i Absorbery, WNT W-wa (1962).

[20] Juda J.: Badanie Pyłów i Urządzeń Odpylających, PWT W-wa (1959).

[21] Juda J.: Zwalczanie Zapylenia, WZ W-wa (1962).

[22] Kasatkin A.G.: Podstawowe Procesy i Aparaty w Technologii Chemicznej (tłum. z ros.), PWT W-wa s. 114 (1954).

[23] Praca zbiorowa.: Odpylanie w Przemyśle Metali nieżelaz - nych Wydawnictwo Zjednoczenia Górniczo-Hutniczego Metali Nieżelaznych (skrypt) Katowice s. 297 (1960).

[24] Rosner W.: Zwalczanie Zadymienia, PWT W-wa (1955).

[25] Łykow M.W.: Suszka Raspyleniem, Piszepromiżdat Moskwa s.34 (1955).

[26] Stoker R.L.: J. Aplied Phisicks Nr 4 (1946).

[27] Blinow W.N.:O Dispersinosti Mechaniczeski Raspylennoi Wody, WTN Moskwa (1931).

[28] Perry J.H.: Chem. Eng. Handbook, New York s. 1022 (1950).

[29] Sherwood T.K., Pigford R.L.: Absorption and Extraction New York (1952).

[30] Nykiama T., Tanasava wg Lewis H.: Ind. Eng. Chem. 40, 67 (1948).

[31] Barth W.: Stahl u. Eisen 55, 1129 (1935).

[32] Chudjakow G.N.: K Woprosu o Dwiżenii Twierdych Czastic w Gazowom Potoke, Dokłady A.N. ZSRR 78 Nr 4 (1951).

[33] Barth R., Barth W.: Rauch u. Staub 22, 93 (1932).

[34] Romaszow G.: Osnownye Principy i Metody Opredelenja Dispersnogo Sostawa Promyszlennych Pyłoi, ŁJOT Moskwa (1939).

[35] Hobler T.: Ruch Ciepła i Wymienniki, PWT W-wa s.712 (1959).

[36] Pozin M.E., Muchlenow J.P., Tarat E.J.: Pianowe Oczyszczalniki Gazu, Wymienniki Ciepła i Absorbery (tłum.z ros.) WNT W-wa s. 30 (1962).

[37] Edas D.K.: Thesis in chemical engineering University of Illinois (1947).

Tablica 4

Wyniki pomiarów parametrów odpylania

Lp.	Wyszczególnienie		Wymiar	Wartość	U w a g i
1	2		3	4	5
1	Natężenie przepływu powietrza przez skruber	V_g	m^3/h	120	Przekrój skrubera ϕ = 200 x 200 mm Wysokość skrubera H ≅ 1000 mm
2	Natężenie przepływu wody	V_s	m^3/h	0,01	Zużycie wody z uwzględnieniem wody spływającej po ściankach skrubera wynosiło V_s = 0,015 m^3/h
3	Początkowe stężenie zapylenia (przed skruberem)	C_p	g/m^3	5,0	
4	Średnia średnica pyłów	d_p	m	$42,2.10^{-6}$	
5	Średnia średnica kropel wody	d_c	m	411.10^{-6}	
6	Gęstość pyłu	γ_p	kg/m^3	2200	
7	Względna prędkość pyłu względem kropel	w	m/h	9450	
8	Lepkość powietrza	η_g	kg/m.h	$6,56.10^{-2}$	
9	Średnia powierzchnia rzutu kropel	Fr	m^2	27,0	Fr = V_s.a. = 0,01.2700 = 27,0 m^2 a = 2700 m^2/m^3, τ = 1h, V_s = 0,1 m^3/h
10	Gęstość wody	γ_c	kg/m^3	999	
11	Temp.powietrza na wlocie do skrubera	t_{g1}	°C	20	
12	Temp. wody na wlocie do skrubera	t_{w1}	°C	15	
13	Spadek ciśnienia na skruberze	Δp	mm H_2O	25	

Tablica 5

Wyniki pomiarów stężeń zapylenia dla różnych granulacji pyłów

Lp.	Wyszczególnienie		Wymiar	Numer pomiaru					Uwagi
				1	2	3	4	5	
1	2		3	4	5	6	7	8	
1	Średnia średnica pyłów	d_p	m	$0{,}253 \cdot 10^{-3}$	$0{,}221 \cdot 10^{-3}$	$0{,}173 \cdot 10^{-3}$	$0{,}123 \cdot 10^{-3}$	$0{,}094 \cdot 10^{-3}$	
2	Początkowe stęż. zapylenia	C_p	g/m^3	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	
3	Objętość powietrza przepływającego przez licznik	V"	l	741	1085	562	963	331	
4	Ciężar filtru po pomiarze	g_2	mg	7421,2	6980,8	7231,3	7620,4	6906,4	
5	Ciężar filtru przed pomiarem	g_1	mg	6891,2	6123,2	6697,4	6561,1	6462,2	
6	Przyrost ciężaru filtru	Δg	mg	530,0	857,6	533,9	1059,3	444,2	
7	Czas przepływu powietrza przez licznik	t_{prz}	min.	20	30	18	25	10	
8	Stężenie zapylenia za skruberem	C_k	g/m^3	0,715	0,790	0,950	1,100	1,340	
9	Sprawność odpylania	η	%	85,7	84,2	81,0	78,0	73,2	$\eta = \frac{C_p - C_k}{C_p}$
10	Współczynnik szybkości odpylania	k	m/h	8,63	8,2	7,37	6,72	5,84	Współczynnik "K" obliczono ze wzoru $K = \frac{\gamma_g}{Fr} \cdot \ln \frac{C_p}{C_k}$

Tablica 6

Wyniki pomiarów stężeń zapylenia
dla różnych granulacji pyłów

Lp.	Wyszczególnienie		Wymiar	Numer pomiaru					Uwagi
				1	2	3	4	5	
1	2		3	4	5	6	7	8	9
1	Średnia średnica pyłów	d_p	m	$42,2.10^{-6}$	$29,4.10^{-6}$	$19,16.10^{-6}$	$14,12.10^{-6}$	$5,6.10^{-6}$	
2	Początkowe stężenie zapyl.	C_p	g/m^3	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	
3	Objętość powietrza przepływającego przez licznik	V"	l	419	404	303,8	231	193,5	
4	Ciężar filtru po pomiarze	g_2	mg	7563,7	6678,0	6866,6	7536,5	7325,3	
5	Ciężar filtru przed pomiarem	g_1	mg	6931,3	5949,7	6261,3	7028,2	6844,3	
6	Przyrost ciężaru filtru	Δg	mg	632,4	728,3	605,3	508,3	481,0	
7	Czas przepływu powietrza przez licznik	t_{pn}	min.	20	20	20	20	20	
8	Stężenie zapylenia za skruberem	C_k	g/m^3	1,515	1,605	1,995	2,200	2,485	
9	Sprawność odpylania	η	%	69,7	63,9	60,1	56,0	50,3	
10	Współczynnik szybkości odpylania	K	m/h	5,30	4,52	4,07	3,64	3,10	

Tablica 7

Wyniki pomiarów stężeń zapylania dla różnych prędkości przepływu powietrza przez skruber

Lp.	Wyszczególnienie		Wymiar	Numer pomiaru							Uwagi
				1	2	3	4	5	6	7	
1	2		3	4	5	6	7	8	9	10	
1	Prędkość przepływu powietrza skruber	w_g	m/sec	0,5	0,56	0,60	0,64	0,70	0,82	0,94	
2	Prędkość średniej kropli	w_k	m/sec	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	
3	Prędkość względna	w	m/sec.	2,3	2,36	2,4	2,44	2,50	2,62	2,74	
4	Stężenie zapylenia przed skruberem	C_p	g/m^3	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	
5	Objętość powietrza przepływającego przez licznik gazu	V"	l	1043	760	1061	787	696	716	629	
6	Czas przepływu powietrza przez licznik	t_{prz}	min.	20	20	20	15	15	15	15	
7	Ciężar filtru po pomiarze	g_2	mg	7468,2	69483	7696,4	6988,3	6999,4	7431,6	7147,1	
8	Ciężar filtru przed pomiarem	g_1	mg	6392,1	5946,6	6432,1	6020,0	6010,1	6392,4	6122,1	
9	Przyrost ciężaru filtru	Δg	mg	1076,1	1001,7	1264,3	968,3	989,3	1039,2	1025,0	
10	Stężenie zapylenia za skruberem	C_k	g/m^3	1,03	1,31	1,19	1,23	1,42	1,45	1,63	
11	Sprawność odpylania	η	%	79,4	73,8	76,2	75,4	71,6	71,0	67,4	
12	Współczynnik szybk. odpylan.	K	m/h	4,2	4,0	4,6	4,8	4,7	5,4	5,6	
13	Natężenie przepływu powietrza przez skruber	V_g	m^3/h	72	80,7	86,5	92,2	101,0	118	135,2	

Tablica 8

Wyniki pomiarów stężeń zapylenia
dla różnych prędkości przepływu powietrza przez skruber

Lp.	Wyszczególnienie		Wymiar	Numer pomiaru							Uwagi
				1	2	3	4	5	6	7	
1	2		3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	Prędkość przepływu powietrza przez skruber	w_g	m/sec.	1,2	1,6	1,9	2,4	2,8	3,2	1,6	
2	Prędkość średniej kropli	w_k	m/sec.	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	
3	Prędkość względna	w	m/sec.	3,0	3,4	3,7	4,2	4,6	5,0	3,4	
4	Stężenie zapylenia przed skruberem	C_p	g/m^3	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	
5	Objętość powietrza przepływającego przez licznik gazu	V"	l	682	537	631	504	463	527	574	
6	Czas przepływu powietrza przez licznik	t_{prz}	min.	15	15	15	15	15	15	15	
7	Ciężar filtru po pomiarze	g_2	mg	7431,1	6976,0	7391,2	7041,1	7389,6	7912,2	7391,7	
8	Ciężar filtru przed pom.	g_1	mg	6121,1	6010,0	6242,2	6021,8	6421,2	6821,2	6421,2	
9	Przyrost ciężaru filtru	Δg	mg	1310,0	966,0	1149,0	1019,3	968,4	1091,0	970,5	
10	Stężenie zapylenia za skruberem	C_k	g/m^3	1,92	1,8	1,82	2,02	2,09	2,07	1,69	
11	Sprawność odpylania	η	%	61,6	64,0	63,6	59,6	58,2	58,6	66,2	
12	Współczynnik szybk.odpyl.	K	m/h	6,1	8,7	10,2	11,6	13,0	15,0	9,2	
13	Natężenie przepływu powietrza przez skruber	V_g	m^3/h	172,8	230	273	345	403	461	230	

Tablica 9

Wyniki pomiarów stężeń zapylenia
dla różnych prędkości przepływu powietrza przez skruber

Lp.	Wyszczególnienie		Wymiar	Numer pomiaru							Uwagi
				1	2	3	4	5	6	7	
1	2		3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	Prędkość przepływu powietrza przez skruber	w_g	m/sec	3,6	3,8	3,9	3,9	3,9	2,6	2,2	
2	Prędkość średniej kropli	w_k	m/sec	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	
3	Prędkość względna	w	m/sec	5,4	5,6	5,7	5,7	5,7	4,4	4,0	
4	Stężenie zapylenia przed skruberem	C_p	g/m^3	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	
5	Objętość powietrza przepływającego przez licznik	V"	l	436	508	786	357	426	458	538	
6	Czas przepływu powietrza przez licznik	t_{prz}	min.	15	15	15	15	15	15	15	
7	Ciężar filtru po pomiarze	g_2	mg	6882,7	7271,7	7427,7	7131,1	7131,1	7378,8	7423,4	
8	Ciężar filtru przed pomiarem	g_1	mg	5983,1	6132,2	6131,1	6391,6	6125,1	6425,6	6342,1	
9	Przyrost ciężaru filtru	Δg	mg	899,6	1139,5	1296,6	739,5	1006,3	953,2	1081,3	
10	Stężenie zapylenia za skruberem	c_k	g/m^3	2,06	2,24	1,65	2,07	2,36	2,08	2,01	
11	Sprawność odpylania	η	%	58,8	55,2	67,0	58,6	52,8	58,4	59,8	
12	Współczynnik szybk. odpyl.	K	m/h	17,0	16,2	23,0	18,4	15,6	12,2	10,7	
13	Natężenie przepływu powietrza przez skruber	V_g	m^3/h	518	547	561	561	561	374	317	

Tablica 10

Wyniki pomiarów stężeń zapylenia na różnych wysokościach skrubera

Lp.	Wyszczególnienie		Wymiar	Numer pomiaru								Uwagi
				1	2	3	4	5	6	7	8	
1	2		3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	Stężenie zapylenia przed skruberem	c_p	g/m^3	10,2	10,2	10,2	10,2	10,2	10,2	10,2	10,2	
2	Wys. skrubera na której mierzono stężenie zapylenia (mierzona od dołu skrubera)	h	mm	100	200	300	400	600	700	800	900	
3	Obj. powietrza przepływającego przez licznik	V"	l	51,1	130,5	132	236	201	306	301	470	
4	Czas przepływu powietrza przez licznik	t_{prz}	min	3	7	10	15	15	20	20	20	
5	Ciężar filtru po pomiarze	g_2	mg	7431,6	6931,2	7142,3	6941,3	7243,7	6848,8	7342,4	6996,7	
6	Ciężar filtru przed pomiarem	g_1	mg	6920,0	6147,3	6641,2	6232,2	6721,3	6236,2	6831,3	6291,6	
7	Przyrost ciężaru filtru	Δg	mg	511,6	783,9	501,1	709,1	522,4	612,6	511,1	705,1	
8	Stężenie zapylenia	c	g/m^3	10,0	6,0	3,8	3,0	2,6	2,0	1,7	1,5	

Tablica 11

Wyniki pomiarów stężeń zapylenia dla różnych gęstości pyłów

Lp.	Wyszczególnienie		Wymiar	Numer pomiaru						Uwagi
				1	2	3	4	5	6	
1	2		3	4	5	6	7	8	9	10
1	Gęstość pyłu	γ_p	kg/m^3	2200	1900	1500	1300	1100	1692	
2	Średnia średnica pyłu	d_p	μ	42,2	42,2	42,2	42,2	42,2	42,2	
3	Stęż. zapylenia przed skruberem	C_p	g/m^3	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	
4	Obj. powietrza przepływającego przez licznik gazu	V''	l	419	334	416	321	258	353	
5	Czas przepływu powietrza przez licznik	t_{prz}	min.	20	20	20	20	20	20	
6	Ciężar filtru po pomiarze	g_2	mg	7563,7	6368,2	6943,4	6896,3	7131,2	7485,9	
7	Ciężar filtru przed pomiarem	g_1	mg	6931,3	5796,4	6136,2	6241,3	6561,1	6842,2	
8	Przyrost ciężaru filtru	Δg	mg	632,4	571,8	807,2	655,0	570,0	643,7	
9	Stęż. zapylenia za skrub.	C_k	g/m^3	1,515	1,71	1,94	2,04	2,21	1,82	
10	Sprawność odpylania	η	%	69,7	65,8	61,2	59,1	55,8	63,6	
11	Współ. szybkości odpylania	K	m/h	5,30	4,76	4,21	3,98	3,62	4,49	

Uwaga:

Pomiar 1 - pył z pieca karbidowego, Pomiar 2 - pył z kredy, pomiar 3 - pył cementowy pomiar 4 - pył wapienny, pomiar 5 - pył węgla kamiennego, pomiar 6 - pył krzemianowy.

Tablica 12

Podział cząstek wg wymiarów pozostałości na sicie D.J.N. Nr 50

Lp.	Wymiary cząstek (mm)	Przeciętna średnica frakcji (d_i/mm)	Liczba cząstek we frakcji n_i	$n_i d_i$
1	0 - 0,01	0,005	-	-
2	0,01-0,05	0,03	-	-
3	0,05-0,1	0,075	4	0,300
4	0,1-0,2	0,15	206	30,900
5	0,2-0,3	0,25	76	19,000
6	0,3-0,4	0,35	49	17,150
7	0,4-0,5	0,45	28	12,600
8	0,5-0,6	0,55	16	8,800
9	0,6-0,7	0,65	7	4,550
10	0,7-0,8	0,75	9	6,750
11	0,8-0,9	0,85	-	-
12	0,9-1,0	0,95	-	-
13	1,0-1,5	1,25	-	-
	R a z e m		395	100,050

$$d_p = \frac{\sum n_i \cdot d_i}{\sum n_i}$$

$$d_{pl} = \frac{100,050}{395} = 0,253 \text{ mm} = 0,253\ 10^{-3} \text{ m}$$

Tablica 13

Podział cząstek wg wymiarów pozostałości na sicie D.J.N. Nr 60

Lp.	Wymiary cząstek (mm)	Przeciętna średnica frakcji $(d_i$ (mm)	Liczba cząstek we frakcji n_i	$n_i\ d_i$
1	0 - 0,01	0,005	-	-
2	0,01-0,05	0,03	12	0,36
3	0,05-0,1	0,075	84	6,30
4	0,1 - 0,2	0,15	131	19,65
5	0,2 - 0,3	0,25	63	15,75
6	0,3 - 0,4	0,35	28	9,80
7	0,4 - 0,5	0,45	14	6,30
8	0,5 - 0,6	0,55	19	10,45
9	0,6 - 0,7	0,65	8	5,20
10	0,7 - 0,8	0,75	6	4,50
11	0,8 - 0,9	0,85	4	3,40
12	0,9 - 1,0	0,95	-	-
13	1,0 - 1,5	1,25	-	-
	R a z e m		369	81,71

$$d_p = \frac{\sum n_i\ d_i}{\sum n_i}$$

$$d_{p2} = \frac{81.71}{369} = 0,221 \text{ mm} = 0,221.10^{-3} \text{ m}$$

Tablica 14

Podział cząstek wg wymiarów pozostałości na sicie D.J.N. Nr 70

Lp.	Wymiary cząstek (mm)	Przeciętna średnica frakcji d_i (mm)	Liczba cząstek we frakcji n_i	$n_i\ d_i$
1	0 - 0,01	0,005	-	-
2	0,01 - 0,05	0,03	-	-
3	0,05 - 0,1	0,075	48	3,60
4	0,1 - 0,2	0,15	262	39,30
5	0,2 - 0,3	0,25	31	7,75
6	0,3 - 4	0,35	16	5,60
7	0,4 - 0,5	0,45	8	3,60
8	0,5 - 0,6	0,55	-	-
9	0,6 - 0,7	0,65	3	1,95
10	0,7 - 0,8	0,75	2	1,50
11	0,8 - 0,9	0,85	1	0,85
12	0,9 - 1,0	0,95	-	-
13	1,0 - 1,5	1,25	-	-
	R a z e m		371	64,15

$$d_p = \frac{\sum n_i\ d_i}{\sum n_i}$$

$$d_{p3} = \frac{64,15}{371} = 0,173 \text{ mm} = 0,173 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

Tablica 15

Podział cząstek wg wymiarów pozostałości na sicie D.J.N. Nr 80

Lp.	Wymiary cząstek (mm)	Przeciętna średnica frakcji d_i (mm)	Liczba cząstek we frakcji n_i	$n_i\ d_i$
1	0 - 0,01	0,005	7	0,035
2	0,01-0,05	0,03	18	0,540
3	0,05 -0,1	0,075	171	12,820
4	0,1 - 0,2	0,15	51	7,650
5	0,2 - 0,3	0,25	14	3,500
6	0,3 - 0,4	0,35	7	2,450
7	0,4 - 0,5	0,45	9	4,050
8	0,5 - 0,6	0,55	6	3,300
9	0,6 - 0,7	0,65	1	0,650
10	0,7 - 0,8	0,75	-	-
11	0,8 - 0,9	0,85	-	-
12	0,9 - 1,0	0,95	-	-
13	1,0 - 1,5	1,25	-	-
	R a z e m		284	34,995

$$d_p = \frac{\sum n_i\ d_i}{\sum n_i}$$

$$d_{p4} = \frac{34.995}{284} = 0,123 \text{ mm} = 0,123.10^{-3} \text{ m}$$

Tablica 16

Podział cząstek wg wymiarów pozostałości na sicie D.J.N. Nr 100

Lp.	Wymiary cząstek (mm)	Przeciętna średnica frakcji d_i (mm)	Liczba cząstek we frakcji n_i	$n_i d_i$
1	0,- 0,01	0,05	12	0,06
2	0,01 -0,05	0,03	24	0,72
3	0,05 - 0,1	0,075	235	17,62
4	0,1 - 0,2	0,15	28	4,20
5	0,2 - 0,3	0,25	14	3,50
6	0,3 - 0,4	0,35	7	2,45
7	0,4 - 0,5	0,45	3	1,35
8	0,5 - 0,6	0,55	1	0,55
9	0,6 - 0,7	0,65	-	-
10	0,7 - 0,8	0,75	-	-
11	0,8 - 0,9	0,85	-	-
12	0,9 - 1,0	0,95	-	-
13	1,0 - 1,5	1, 25	-	-
	R a z e m		324	30,45

$$d_p = \frac{\sum n_i d_i}{\sum n_i}$$

$$d_{p5} = \frac{30,45}{324} = 0,094 \text{ mm} = 0,094 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

Tablica 17

Analiza frakcyjna pyłów wytrąconych
w filtrze workowym przy obciążeniu 140 $m^3/m^2.h$

Lp.	Wymiary cząstek (μ)	Przeciętna średnica frakcji d_i (μ)	Liczba cząstek we frakcji n_i	$n_i\ d_i$
1	0,0 - 0,5	0,25	-	-
2	0,5 - 1,0	0,75	-	-
3	1,0 - 5,0	3,0	-	-
4	5,0 - 10,0	7,5	12	90,0
5	10 - 20	15,0	19	285,0
6	20 - 30	25,0	48	1200 ,0
7	30 - 40	35,0	64	2240,0
8	40 - 50	45,0	131	5895,0
9	50 - 60	55,0	83	4565,0
10	60 - 70	65,0	22	1430,0
11	70 - 80	75,0	9	675,0
12	80 - 90	85,0	1	85,0
13	90 -100	95,0	-	-
	R a z e m		389	16465,0

$$d_p = \frac{\sum n_i \cdot d_i}{\sum n_i}$$

$$d_{p6} = \frac{16465.0}{389} = 42,2\mu = 42,2.10^{-6}\ m$$

Tablica 18

Analiza frakcyjna pyłów wytrąconych
w filtrze workowym przy obciążeniu 100 $m^3/m^2.h$

Lp.	Wymiary cząstek (μ)	Przeciętna średnica frakcji d_i (μ)	Liczba cząstek we frakcji n_i	$n_i\ d_i$
1	0,0 - 0,5	0,25	-	-
2	0,5 - 1,0	0,75	2	1,5
3	1,0 - 5,0	3,0	7	21,0
4	5,0 - 10,0	7,5	16	120,0
5	10 - 20	15,0	39	585,0
6	20 - 30	25,0	123	3075,0
7	30 - 40	35,0	68	2380,0
8	40 - 50	45,0	41	1845,0
9	50 - 60	55,0	7	385,0
10	60 - 70	65,0	9	585,0
11	70 - 80	75,0	-	-
12	80 - 90	85,0	3	255,0
13	90 -100	95,0	-	-
	R a z e m		315	9252,5

$$d_p = \frac{\sum n_i \cdot d_i}{\sum n_i}$$

$$d_{p7} = \frac{9252,5}{315} = 29,4\,\mu = 29,4 \cdot 10^{-6}\ m$$

Tablica 19

Analiza frakcyjna pyłów wytrąconych
w filtrze workowym przy obciążeniu 75 $m^3/m^2.h$

Lp.	Wymiary cząstek (μ)	Przeciętna średnica frakcji d_i (μ)	Liczba cząstek we frakcji n_i	$n_i\ d_i$
1	0,0 - 0,5	0,25	-	-
2	0,5 - 1,0	0,75	7	5,25
3	1,0 - 5,0	3,0	16	48,00
4	5,0 - 10,0	7,5	49	367,50
5	10 - 20	15,0	115	1725,00
6	20 - 30	25,0	63	1575,00
7	30 - 40	35,0	25	875,00
8	40 - 50	45,0	17	765,00
9	50 - 60	55,0	4	220,00
10	60 - 70	65,0	2	130,00
11	70 - 80	75,0	-	-
12	80 - 90	85,0	-	-
13	90 - 100	95,0	-	-
	R a z e m		298	5710,75

$$d_p = \frac{\sum n_i \cdot d_i}{\sum n_i}$$

$$d_{p8} = \frac{5710,75}{298} = 19,16\ \mu = 19,16 \cdot 10^{-6}\ m$$

Tablica 20

Analiza frakcyjna pyłów wytrąconych w filtrze workowym przy obciążeniu 50 $m^3/m^2.h$

Lp.	Wymiary cząstek (μ)	Przeciętna średnica frakcji d_i (μ)	Liczba cząstek we frakcji n_i	$n_i\ d_i$
1	0,0 - 0,5	0,25	-	-
2	0,5 - 1,0	0,75	8	6,0
3	1,0 - 5,0	3,0	62	186,0
4	5,0 -10,0	7,5	80	600,0
5	10 - 20	15,0	138	2070,0
6	20 - 30	25,0	34	850,0
7	30 - 40	35,0	16	560,0
8	40 - 50	45,0	7	315,0
9	50 - 60	55,0	3	165,0
10	60 - 70	65,0	2	130,0
11	70 - 80	75,0	1	75,0
12	80 - 90	85,0	-	-
13	90 - 100	95,0	-	-
	R a z e m		351	4957,0

$$d_p = \frac{\sum n_i \cdot d_i}{\sum n_i}$$

$$d_{p9} = \frac{4957,0}{351} = 14,12\,\mu = 14,12.10^{-6}\ m$$

Tablica 21

Analiza frakcyjna pyłów wytrąconych
w filtrze workowym przy obciążeniu 30 $m^3/m^2.h$

Lp.	Wymiary cząstek (μ)	Przeciętna średnica d_i (μ)	Liczba cząstek we frakcji n_i	$n_i\ d_i$
1	0,0 - 0,5	0,25	3	0,75
2	0,5 - 1,0	0,75	39	29,25
3	1,0 - 5,0	3,0	185	555,00
4	5,0 -10,0	7,5	72	540,00
5	10 - 20	15,0	15	225,00
6	20 - 30	25,0	4	100,00
7	30 - 40	35,0	6	210,00
8	40 - 50	45,0	4	180,00
9	50 - 60	55,0	-	-
10	60 - 70	65,0	-	-
11	70 - 80	75,0	-	-
12	80 - 90	85,0	-	-
13	90 - 100	95,0	--	-
	R a z e m		328	1840,00

$$d_p = \frac{\sum n_i \cdot d_i}{\sum n_i}$$

$$d_{p10} = \frac{1840,00}{328} = 5,6\ \mu = 5,6 \cdot 10^{-6}\ m$$

Tablica 22

Wartości modułu "M" obliczone i mierzone

Lp.	Parametr zmienny	M obliczone 10^4	M zmierzone 10^4	Błąd względny %	U w a g i
1	w = 2,3 m/sec	5,04	5,07	0,59	$B = \frac{M_z - M}{M_z} 100\%$
2	w = 2,36 "	5,16	4,7	-9,8	
3	w = 2,4 "	5,20	5,32	2,26	
4	w = 2,44 "	5,30	5,46	2,93	
5	w = 2,50 "	5,40	5,22	-3,45	
6	w = 2,62 "	5,61	5,72	1,92	
7	w = 2,74 "	5,82	5,68	-246	
8	w = 3,00 "	6,26,	5,65	-10,8	
9	w = 3,40 "	6,91	7,1	2,68	
10	w = 3,70 "	7,39	7,66	3,52	
11	w = 4,20 "	8,18	7,67	-6,65	
12	w = 4,60 "	8,80	7,85	-12,1	
13	w = 5,00 "	9,49	8,33	-13,93	
14	w = 3,4 "	6,91	7,50	7,87	
15	w = 5,4 "	10,0	8,75	-14,3	Pomiarów Lp.15-19 nie brano pod uwagę jako dających duży rozrzut
16	w = 5,6 "	10,30	8,03	-28,2	
17	w = 5,7 "	10,40	11,21	7,22	
18	w = 5,7 "	10,40	8,97	-15,94	
19	w = 5,7 "	10,40	7,60	-36,8	
20	w = 4,4 "	8,43	7,70	- 9,48	
21	w = 4,0 "	7,87	7,43	- 5,92	
22	$d_p = 0{,}253\ 10^{-3}$ m	9,61	9,13	- 5,26	
23	$d_p = 0{,}221\ 10^{-3}$ m	9,22	8,68	- 6,22	
24	$d_p = 0{,}173\ 10^{-3}$ m	8,58	7,80	-10,0	
25	$d_p = 0{,}123\ 10^{-3}$ m	7,74	7,11	- 8,86	
26	$d_p = 0{,}094\ 10^{-3}$ m	7,14	6,18	-15,53	
27	$d_p = 42{,}2\ 10^{-6}$ m	5,61	5,61	0,0	Wartość przeciętnego błędu obliczono dla 32 pom.
28	$d_p = 29{,}4\ 10^{-6}$ m	5,04	4,78	- 5,44	
29	$d_p = 19{,}16\ 10^{-6}$ m	4,43	4,30	- 3,02	$Bp = \frac{\sum (M_{io} - M_{ip})}{n}$
30	$d_p = 14{,}12\ 10^{-6}$ m	4,04	3,85	-4,94	$Bp = 0{,}395 \cdot 10^{-4}$
31	$d_p = 5{,}6\ 10^{-6}$ "	3,06	3,28	6,70	
32	$\gamma_p = 2200$ kg/m^3	5,61	5,61	0,0	
33	$\gamma_p = 1900$ kg/m^3	4,97	5,04	1,39	
34	$\gamma_p = 1500$ "	4,11	4,46	7,85	
35	$\gamma_p = 1300$ "	3,66	4,21	13,06	
36	$\gamma_p = 1100$ "	3,21	3,83	16,2	
37	$\gamma_p = 1692$ "	4,53	4,75	4,63	

POLITECHNIKA ... BIBLIOTEKA GŁÓWNA ... Gliwice

ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ
ukazują się w następujących seriach:

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

Dotychczas ukazały się następujące zeszyty serii Ch:

Chemia z. 1, 1954 r., s. 87, zł 13,—
Chemia z. 2, 1957 r., s. 140, zł 29,25
Chemia z. 3, 1959 r., s. 110, zł 24,20
Chemia z. 4, 1961 r., s. 30, zł 2,80
Chemia z. 5, 1961 r., s. 165, zł 34,—
Chemia z. 6, 1961 r., s. 33, zł 3,15
Chemia z. 7, 1961 r., s. 62, zł 10,—
Chemia z. 8, 1961 r., s. 58, zł 6,30
Chemia z. 9, 1962 r., s. 119, zł 9,—
Chemia z. 10, 1962 r., s. 58, zł 5,80
Chemia z. 11, 1962 r., s. 110, zł 8,40
Chemia z. 12, 1962 r., s. 148, zł 11,50
Chemia z. 13, 1963 r., s. 82, zł 4,70
Chemia z. 14, 1963 r., s. 73, zł 5,—
Chemia z. 15, 1963 r., s. 81, zł 4,40
Chemia z. 16, 1963 r., s. 92, zł 5,30
Chemia z. 17, 1963 r., s. 117, zł 7,50
Chemia z. 18, 1963 r., s. 118, zł 7,65
Chemia z. 19, 1963 r., s. 96, zł 6,40
Chemia z. 20, 1963 r., s. 148, zł 9,10
Chemia z. 21, 1964 r., s. 72, zł 3,65
Chemia z. 22, 1964 r., s. 73, zł 5,50
Chemia z. 23, 1964 r., s. 116, zł 7,50
Chemia z. 24, 1964 r., s. 302, zł 14,40
Chemia z. 25, 1964 r., s. 113, zł 6,90
Chemia z. 26, 1665 r., s. 95, zł 5,50
Chemia z. 27, 1965 r., s. 137, zł 7,20
Chemia z. 28, 1966 r., s. 90, zł 7,—
Chemia z. 29, 1966 r., s.
Chemia z. 30, 1966 r., s.

Cena zł 5.–