

Mieczysław ROCZNIK

Instytut Fizyki Politechniki Śląskiej

DYSPERGOWANIE CZĄSTEK AEROSZU W PROCESIE AKUSTYCZNEJ KOAGULACJI

Streszczenie. Celem niniejszej pracy jest doświadczalne zbadanie wpływu stężenia aeroszlu i natężenia fali akustycznej na efekty koagulacji. Analizując uzyskane wyniki otrzymano odpowiedź na pytanie, w jaki sposób należy zmieniać natężenie fali akustycznej przy zmianach stężenia aeroszlu w celu zapewnienia stałych efektów koagulacji.

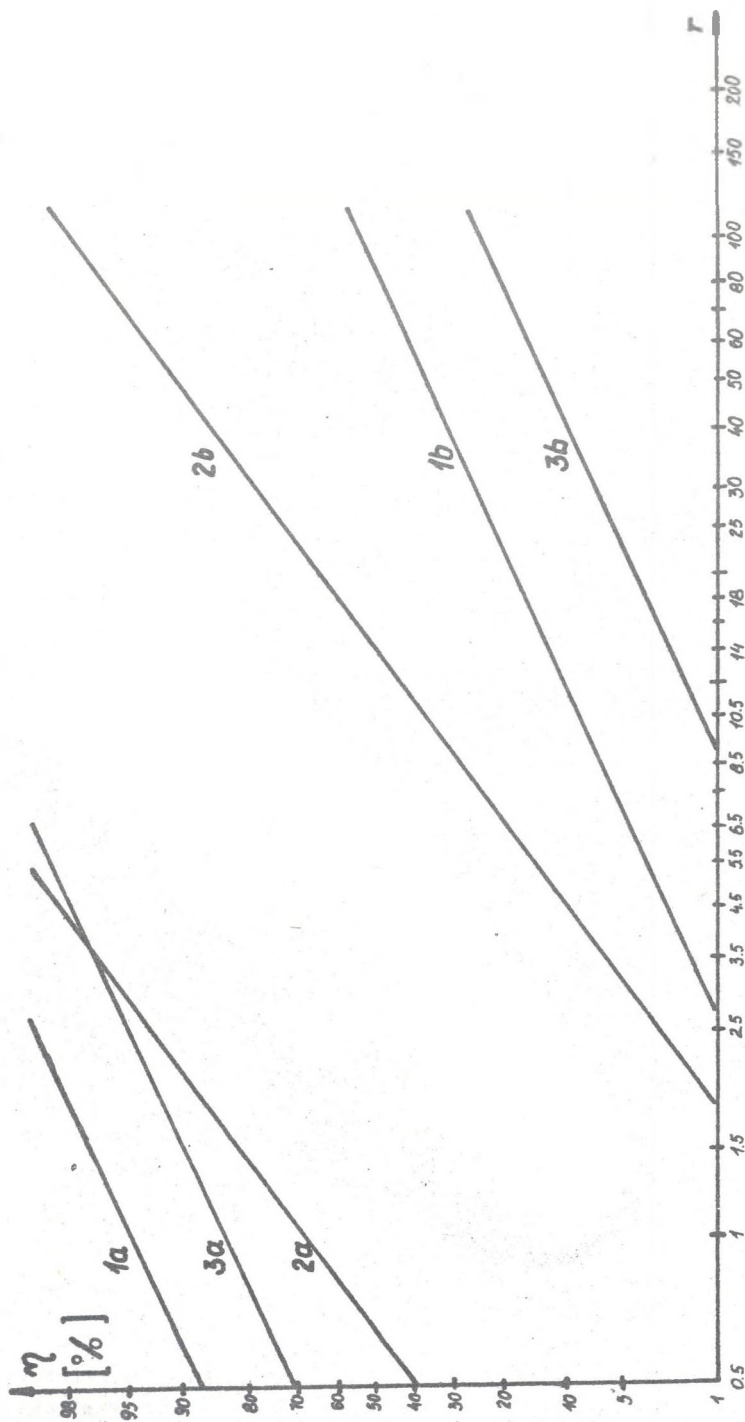
Przy określaniu efektów koagulacji badano pod mikroskopem zmiany rozkładu statystycznego ziaren pyłu.

Praca określa zakres natężenia fali akustycznej, w którym zmiany efektu koagulacji wywołane fluktuacją stężenia aeroszlu można kompensować odpowiednimi zmianami natężenia fali.

Zjawisko rozbijania cząstek aeroszlu jest znane w praktyce odpylania gazów. Można spotkać się z nim np. w cyklonie [1], gdzie za duża prędkość odwirowywania powoduje za silne zderzenia cząstek ze ściankami cyklonu. Również przy akustycznej koagulacji aeroszlu zauważono takie zjawisko [2], uważając, że przyczyną rozdrabniania aeroszlu mogą być silne prądy i zawirowania powietrza opływającego większe aglomeraty lub różnice ciśnienia na końcach takiego aglomeratu, spowodowane falą akustyczną [2].

Efekty rozbijania cząstek są również widoczne w wynikach pomiarów efektów akustycznej koagulacji aeroszlu omówionych i przedstawionych w pracy [3]. Obecnie zostaną przedstawione dodatkowe argumenty, które pozwalają sądzić, że zjawisko rozdrabniania cząstek aeroszlu następuje przy zbyt silnych ich zderzeniach.

Rysunek 1 przedstawia dystrybuanty przykładowych wyników pomiarów narysowane w skali laplaso-logarytmicznej [4]. Linia 1 przedstawia pył niekoagulowany, a linie 2 i 3 pył po koagulacji w polu akustycznym, przy czym linia 2 dla dużego, a linia 3 dla nieco mniejszego natężenia fali akustycznej. Dystrybuanty oznaczone indeksem "a" dotyczą rozkładu frakcyjnego wielkości ziaren pyłu, a indeksem "b" rozkładu masy. Z porównania linii 1 i 3 widać wyraźnie, że proces koagulacji powoduje zmniejszenie ilości drobnych ziaren pyłu, a jednocześnie powstawanie ziaren dużych. Powoduje to równoległe przesunięcie dystrybuanty narysowanej na papierze o siatce laplaso-logarytmicznej [5]. Jednak w przypadku dużych natężeń mamy dwa zjawiska: koagulację objawiającą się ubywaniem cząstek najdrobniejszych i dyspergowanie dużych cząstek. Powoduje to w efekcie zwiększenie



Rys. 1. Przykładowa dystrybucja rozkładu frakcyjnego
Exemplary sizes distribution

a - rozkład wielkości cząstek - sizes particles distribution, b - rozkład masy - masses distribution
1 - pył nieskoagulowany - dust before coagulation, 2 - pył po koagulacji w polu akustycznym o bardzo dużym
natężeniu - dust after coagulation in acoustic field at very high acoustic wave intensity, 3 - pył po koa-
gulacji w polu akustycznym o mniejszym natężeniu - dust after coagulation in acoustic field at slighter
intensity

się kąta nachylenia dystrybuanty. Oznacza to, że aerozol staje się bardziej monodispersyjny.

Na marginesie zasadniczego nurtu rozważań warto zauważyć, że efekty procesu koagulacji powinny zawsze być przedstawione jako zmiany jego składu frakcyjnego. Często stosowana metoda określania zmian ilości odzyskiwanego w cyklonie pyłu mówi o sprawności układu kolumna koagulacyjna - cyklon. Niestety, wadą akustycznej metody koagulacji pyłu jest to, że zmiany składu frakcyjnego w procesie koagulacji, które są bardzo wyraźnie widoczne na rys. 1, jednak nie są dostatecznie duże, aby osiągnąć bardzo wysoką sprawność pracy cyklonu. Wadę tę można usunąć przez zastosowanie multicyklonów, o odpowiednio dobranych parametrach. Analogicznie za zaletę tej metody można uznać wyjątkową łatwość w zmniejszaniu ilości bardzo drobnych ziaren pyłu.

Na rysunkach 2-5 przedstawione są doświadczalne i teoretyczne zależności natężenia fali akustycznej wymaganego przy osiągnięciu stałych efektów koagulacji od stężenia aerozolu. Wykresy przedstawiające zależności stwierdzone doświadczalnie zostały sporządzone na podstawie przedstawionych w pracy [3] pomiarów efektów akustycznej koagulacji aerozolu utworzonego z rozpylonego w powietrzu pyłu mączki bitumicznej. Wykresy przedstawiające zależności teoretyczne sporządzone zostały na podstawie teorii statystyczno-bezwładnościowej [8], omówionej ponadto w pracy [6]. Ponieważ krzywa teoretyczna dla szerokich przedziałów natężeń pokrywa się z krzywą doświadczalną, więc odstępstwa między nimi dla dużych natężeń fali akustycznej są rezultatem wzajemnego rozdrabniania cząstek przy zderzeniach. Prawidłowością jest, że załamanie się krzywych doświadczalnych, a więc odejście od zależności przewidywanej teoretycznie, następuje dla natężeń fali akustycznej, dla których cząsteczki w ruchu drgającym osiągają pewną w każdym przypadku prawie jednakową energię kinetyczną. Poniżej udowodnimy słuszność sformułowanej tu hipotezy, że o przejściu od zjawiska koagulacji do zjawiska dyspergowania decyduje energia kinetyczna cząstek.

Aby przekonać się o tym, należy wyprowadzić pojęcie maksymalnej energii kinetycznej drgających cząstek. Jak wiadomo, maksymalna wartość energii kinetycznej dowolnej cząstki wynosi:

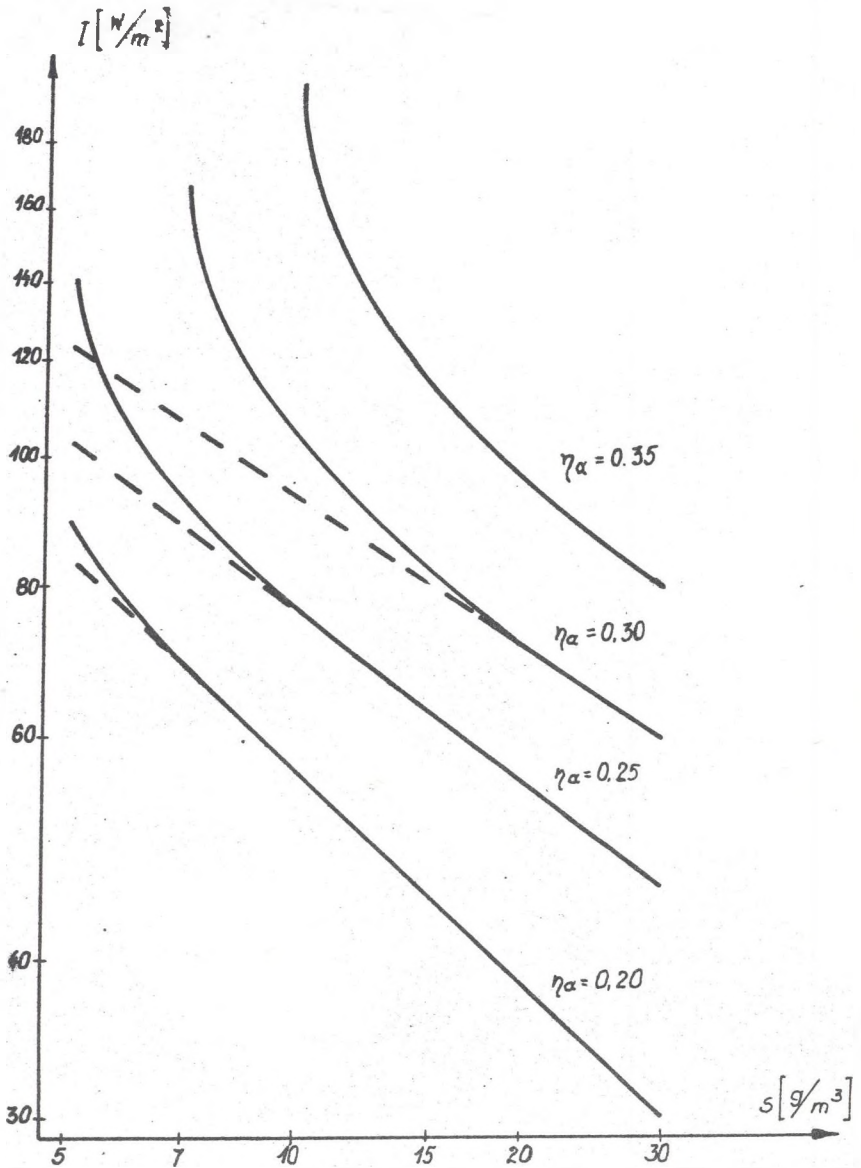
$$E_K = \frac{1}{2} m_p u_p^2, \quad (1)$$

gdzie:

m_p - masa cząstki pyłu.

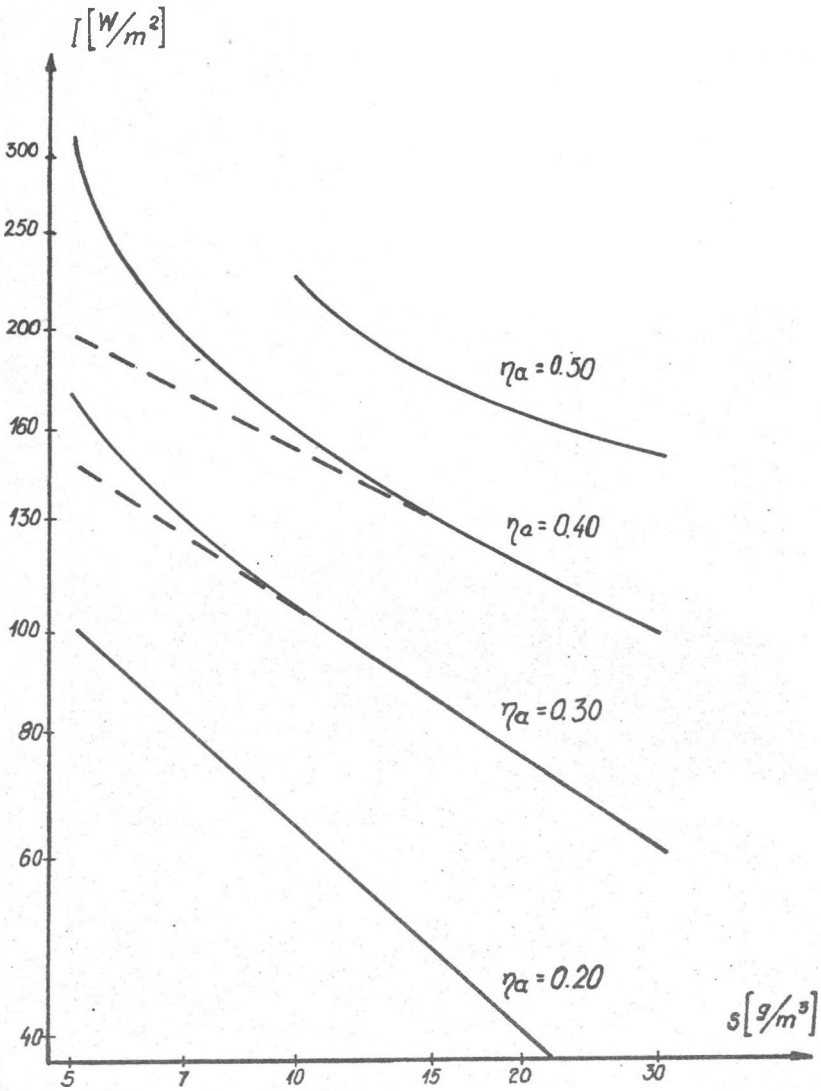
u_p - amplituda prędkości cząstki drgającej pod wpływem fali akustycznej.

Zakładając kulisty kształt cząstki oraz że ruch drgający następuje pod wpływem propagacji płaskiej fali akustycznej, można napisać:



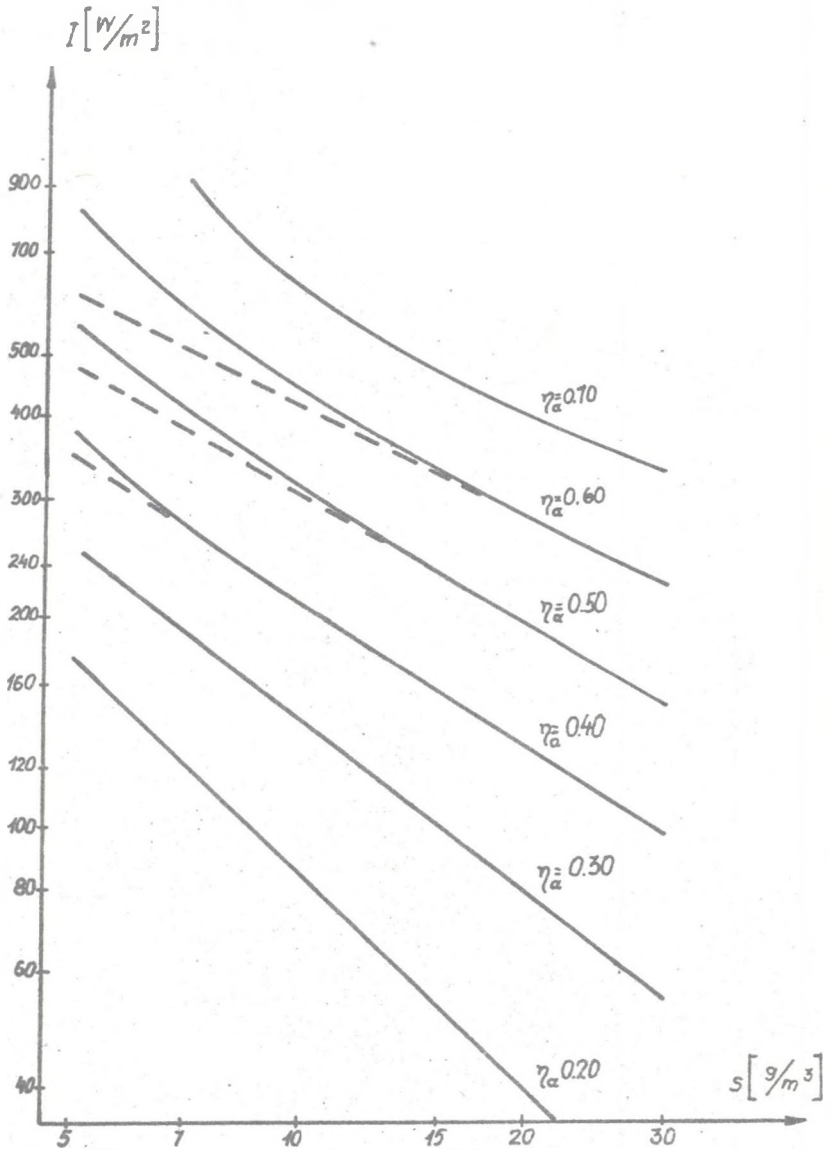
Rys. 2. Związek stężenia aerozolu i natężenia fali akustycznej przy stałej sprawności koagulacji η i częstotliwości fali $f = 1630$ Hz
 Coherence aerosol concentration and acoustic wave intensity at its frequency $f = 1630$ Hz and unchanging

- — — — — związek wyznaczony doświadczalnie
 coherence obtained experimentally
- - - - - związek teoretyczny określony wzorem (12)
 theoretical coherence definite formula (12)



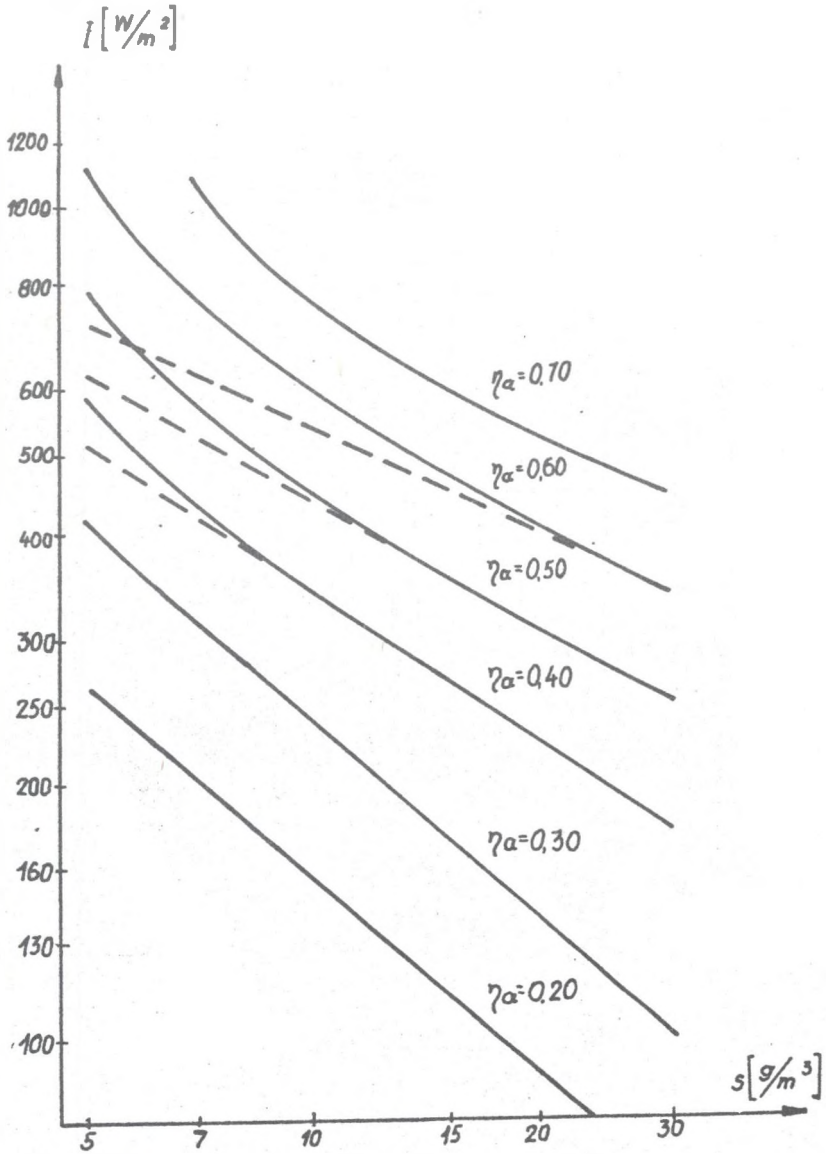
Rys. 3. Związek stężenia aerozolu i natężenia fali akustycznej przy stałej sprawności koagulacji η i częstotliwości fali $f = 2460$ Hz
 Coherence aerosol concentration and acoustic wave intensity at its frequency $f = 2460$ Hz and unchanging

- — — — — związek wyznaczony doświadczalnie
- — — — — coherence obtained experimentally
- - - - - związek teoretyczny określony wzorem (12)
- — — — — theoretical coherence definite formula (12)



Rys. 4. Związek stężenia aerozolu i natężenia fali akustycznej przy stałej sprawności koagulacji η i częstotliwości fali $f = 3700$ Hz
 Coherence aerosol concentration and acoustic wave intensity at its frequency $f = 3700$ Hz and unchanging

- — — — — związek wyznaczony doświadczalnie
 coherence obtained experimentally
- - - - - związek teoretyczny określony wzorem (12)
 theoretical coherence definite formula (12)



Rys. 5. Związek stężenia aerozolu i natężenia fali akustycznej przy stałej sprawności koagulacji η i częstotliwości fali $f = 4900$ Hz
 Coherence aerosol concentration and acoustic wave intensity at its frequency $f = 4900$ Hz and unchanging

- — — — — - związek wyznaczony doświadczalnie
- - - - - - coherence obtained experimentally
- - - - - - związek teoretyczny określony wzorem (12)
- - - - - - theoretical coherence definite formula (12)

$$m_p = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_p \quad (2)$$

$$u_p = \mu_p u_g = \mu_p \sqrt{\frac{2I}{\rho_c}} \quad (3)$$

gdzie:

r - promień cząstki,

ρ_p - gęstość pyłu,

μ_p - współczynnik porywu cząstki przez ośrodek,

u_g - amplituda prędkości ośrodka w ruchu drgającym wymuszonym propagacją fali akustycznej,

I - natężenie fali akustycznej,

ρ_c - oporność falowa ośrodka.

Jak wiadomo [3], współczynnik porywu określa wzór:

$$\mu_p = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{4\pi \rho_p r^2 f^2}{9\eta} \right)^2}} \quad (4)$$

gdzie:

f - częstotliwość fali akustycznej,

η - współczynnik lepkości ośrodka gazowego.

Podstawiając (2), (3) i (4) do (1) otrzymamy:

$$E_K = \frac{2}{3} \pi r^3 \rho_p \frac{I}{\rho_c} \frac{1}{1 + \left(\frac{4\pi \rho_p r^2 f^2}{9\eta} \right)^2} \quad (5)$$

Widać więc, że amplituda energii kinetycznej poszczególnych cząsteczek w ruchu wywołanym falą akustyczną zależy zarówno do natężenia i częstotliwości fali akustycznej, jak również od rozmiarów cząstki r . Dla stałych warunków pola akustycznego poszczególne cząstki w zależności od swych rozmiarów mają więc różne wartości energii kinetycznej w ruchu drgającym. Przyrównując do zera pierwszą pochodną wyrażenia (5) względem r można przekonać się, że ekstremum (maksimum) wartości energii kinetycznej przypada dla cząstek o promieniu:

$$r_m = \left(\frac{9\sqrt{3}\eta}{4\pi \rho_p f^2} \right)^{1/2} \quad (6)$$

Podstawiając (6) do (5) można obliczyć maksymalną wartość energii kinetycznej E_{KM} cząstek drgających w ustalonych warunkach pola akustycznego.

$$E_{KM} = \frac{9}{16} \frac{(\sqrt{3}\eta)^{3/2}}{(\pi \rho_p)^{1/2} f^{3/2} \rho_c} \frac{2I}{\rho_c} \quad (7)$$

W tabeli 1 dla poszczególnych częstotliwości fali akustycznej podane są:

- 1) obliczony ze wzoru (6) promień cząstek r_m , dla którego występuje maksymalna wartość energii kinetycznej,
- 2) natężenie I odczytane z wykresów przedstawionych na rysunkach 2-5, dla których występuje, załamanie linii doświadczalnych zależności $\eta_a(I)$, czyli pojawienie się efektów rozbijania cząstek w procesie koagulacji,
- 3) obliczone ze wzoru (7) odpowiadające tym natężeniom wartości maksymalnych energii kinetycznych cząstek E_{KM} .

Tabela 1

$f = 1630 \text{ Hz}$	$r_m = 2,32 \mu\text{m}$	$I = 70 \text{ W/m}^2$	$E_{KM} = 0,58 \cdot 10^{-14} \text{ J}$
$f = 2460 \text{ Hz}$	$r_m = 1,89 \mu\text{m}$	$I = 120 \text{ W/m}^2$	$E_{KM} = 0,54 \cdot 10^{-14} \text{ J}$
$f = 3700 \text{ Hz}$	$r_m = 1,54 \mu\text{m}$	$I = 250 \text{ W/m}^2$	$E_{KM} = 0,60 \cdot 10^{-14} \text{ J}$
$f = 4900 \text{ Hz}$	$r_m = 1,34 \mu\text{m}$	$I = 350 \text{ W/m}^2$	$E_{KM} = 0,56 \cdot 10^{-14} \text{ J}$

Łatwo można zauważyć, że w miarę wzrostu częstotliwości fali akustycznej:

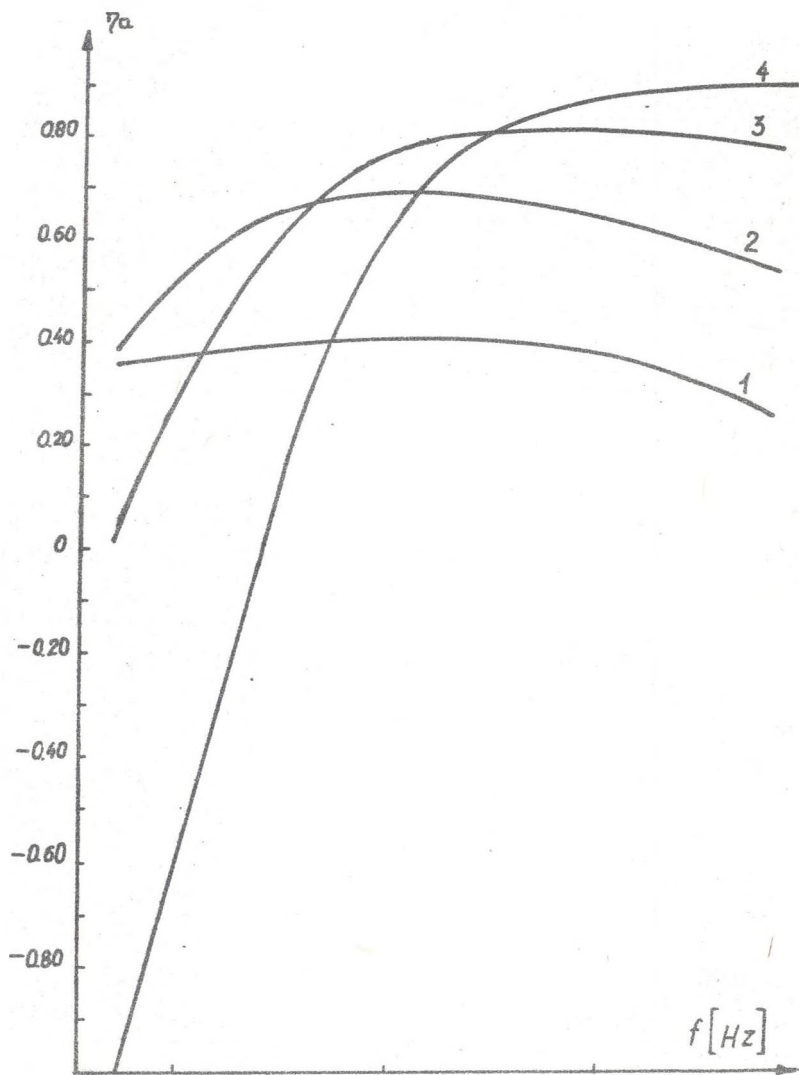
- 1) maleją rozmiary cząstek posiadających w danych warunkach największą energię kinetyczną,
- 2) wzrasta graniczne natężenie fali akustycznej, powyżej którego występuje zjawisko dyspergowania cząstek,
- 3) praktycznie nie zmienia się maksymalna energia cząstek aerozolu obliczona dla granicznego natężenia fali akustycznej, a więc dla progu występowania zjawiska dyspergowania cząstek.

Niewielki rozrzut obliczonych wartości E_{KM} dla poszczególnych częstotliwości fali akustycznej zapewne mieści się w granicach błędów pomiarowych. Dlatego też można przyjąć za słuszną postawioną wcześniej tezę, że proces rozdrabniania cząstek rozpoczyna się dla poszczególnych częstotliwości fali akustycznej w sytuacji, gdy energia zderzeń przekroczy pewną progową wartość.

Należy sądzić, że wartość energii cząstek wymagana do zwiększenia dyspersyjności aerozolu zależy od fizycznych własności pyłu i w przypadku badanego pyłu CaCO_3 jest wyjątkowo niska przez co w literaturze aerozol ten uważany jest za trudno koagulujący [2].

Dla aerozoli, w których fazę rozproszoną stanowią ciecze lepkie, prawdopodobnie dozwolone jest stosowanie przy koagulacji znacznie wyższych natężeń fali akustycznej, a w konsekwencji osiągnana jest znacznie wyższa jej sprawność [2].

Na rysunku 6 przedstawione są orientacyjne zależności sprawności koagulacji od częstotliwości fali akustycznej przy ustalonym stężeniu aerozolu i natężeniu fali akustycznej. Przedstawione wykresy zostały sporządzone na podstawie wyników pomiarów sprawności koagulacji w polu akustycznym,



Rys. 6. Zależność sprawności koagulacji od częstotliwości fali akustycznej przy stałym jej natężeniu I oraz stężeniu aerozolu $s=30 \text{ g/m}^3$
 Dependence of a coagulation effect upon acoustic wave frequency at constance its intensity I and aerosol concentration
 1 - $I = 100 \text{ W/m}^2$, 2 - $I = 300 \text{ W/m}^2$, 3 - $I = 600 \text{ W/m}^2$, 4 - $I = 1000 \text{ W/m}^2$

przedstawionych w pracy [3]. Efekty omawianego w tej pracy zjawiska dyspergowania dużych cząstek są obecnie wyraźnie widoczne, gdyż rezultatem tego zjawiska jest obniżanie się sprawności koagulacji aerozolu przy niskich częstotliwościach i dużych natężeniach fali akustycznej. Podobny przebieg zależności sprawności koagulacji od częstotliwości fali akustycznej przedstawiono w pracy [7].

LITERATURA

- [1] Andrzejewski R., Gutowski W.: Fizyczne własności pyłów. "Śląsk", Katowice, 1968, ss. 264-265.
- [2] Miednikow E.P.: Akusticzeskaja koagulacja i osazdzenie aerozolej, Izd. Ak. Nauk SSSR, Moskwa 1963, 170 i 211.
- [3] Roczniak M.: Akustyczna koagulacja aerozolu powstałego z pyłu mączki bitumicznej. ZN Politechniki Śląskiej, Mat.-Fiz. z. 51, Gliwice 1986.
- [4] Kołodziejczyk L., Rubik M., Mańkowski S.: Pomiarы w inżynierii sanitarnej. "Arkady", Warszawa 1974.
- [5] Bieliński W.A., Sapronow W.A., Timoszenko J.: Issledowanije struktury i fiziczeskich parametrow agriegatow submikronnych czastic pri akusticzeskoj koagulacji. Akusticzeskij Żurnał, XXII, nr 4, 1976.
- [6] Roczniak M.: Możliwości zapewnienia w warunkach przemysłowych stałych efektów akustycznej koagulacji aerozolu przy zmianach jego stężenia. ZN Politechniki Śląskiej Mat.-Fiz. z. 51, Gliwice 1986.
- [7] Stokes S.A.: Sonic agglomeration of carbon black aerosol, Chemical Engineering Progress, Philadelphia, 1950, 46, N8, 430.
- [8] Wyrzykowski R.: Teorie koagulacji akustycznej, ZN WSP Rzeszów 1971.

Recenzent: Prof. dr hab. Roman Wyrzykowski

Wpłynęło do Redakcji w grudniu 1985 r.

ДИСПЕРГИРОВАНИЕ ЧАСТИЦ АЭРОЗОЛЯ
В ПРОЦЕССЕ АКУСТИЧЕСКОЙ КООГУЛЯЦИИ

Р е з ю м е

Задачей этой работы есть экспериментальное обследование влияния концентрации аэрозоля и напряжения акустической волны на эффекта коогуляции. Анализируя полечены результаты одержали мы ответ на вопрос, как надо изменять напряжения акустической волны при изменениях концентрации аэрозоля для одержания постоянных эффектов коогуляции. При спределении эффектов коогуляции исследовано микроскопом изменения распределения по статистике зернов пыли. Работа определяет диапазон напряжения акустической волны, в которой изменения эффекта коогуляции проявлены флюктуацией концентрации аэрозоля можно компенсировать конгруэнтными изменениями напряжения волны.

DISPERSION OF AEROSOL PARTICLES IN ACOUSTIC
COAGULATION PROCESSES

S u m m a r y

Experimental study of influence of strength of aerosol and volume of acoustic wave upon result of coagulation is object of this paper. The answer to the question how volume of acoustic wave should be changed to ensure constant effects of coagulation when the strength of aerosol is variable was got by analysis of obtained results. Changes of statistical distribution of size of dust particles were studied with microscope to define effects of coagulation.

This paper defines the range of volume of acoustic wave in which changes of coagulation effect on account of fluctuation of strength of aerosol may be compensated by changes of volume of acoustic wave.