



**ODDZIAŁYWANIE FAL AKUSTYCZNYCH
NA FAZĘ ROZPROSZONĄ W OŚRODKACH PŁYNNYCH**

Action of acoustical field on dispersions in fluid

Henryka Czyż

Katedra Fizyki, Politechnika Rzeszowska, ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów
hczyz@prz.rzeszow.pl

STRESZCZENIE

W pracy przedstawiono zagadnienia dotyczące badania zjawisk towarzyszących oddziaływaniu fal akustycznych na cząstki fazy rozproszonej (modelowane kulistym oraz cylindrycznym kształtem) w ośrodkach płynnych. Tematyka pracy, posiadająca ważne aspekty aplikacyjne w ochronie środowiska naturalnego, wiąże się z właściwościami pola akustycznego, które polegają na przyspieszaniu ruchu cząstek rozproszonych w ośrodkach płynnych. Zagadnienia te należą do zakresu mechaniki ośrodków ciągłych i dotyczą wąskiej klasy zjawisk fizycznych towarzyszących propagacji fal akustycznych w dwuskładnikowych ośrodkach niejednorodnych (aerozole, zawiesiny). Zakłada się, że faza rozproszona nie rozpuszcza się w ośrodku płynnym, a analizowane zjawiska fizyczne wiążą się z przekazywaniem w polu akustycznym pędu z płynu rozpraszającego do zawieszonych w nim cząstek. W konsekwencji prowadzi to do koagulacji i wytrącania się zawieszonych cząstek. Wyniki badań prowadzą do wniosku, że przez dobór parametrów pola akustycznego do odpowiednich parametrów cząstek rozproszonych osiąga się optymalizację procesów prowadzących do usuwania z ośrodka zawieszonych w nim cząstek.

Artykuł zawiera krytyczny przegląd najważniejszych dotychczas opublikowanych prac dotyczących historii i obecnego stanu badań naukowych oraz wiedzy w zakresie prezentowanej dyscypliny. Część prac posiada obecnie raczej historyczną wartość, stanowi jednak ważne ogniwo w łańcuchu rozwoju akustyki fazy rozproszonej.

1. WPROWADZENIE

Zagadnienie oddziaływania fal akustycznych na fazę rozproszoną w ośrodkach płynnych należy uznać za jedno z podstawowych w akustyce. Opis naukowy tych zjawisk można nazwać akustyką fazy rozproszonej, a więc akustyką jednego tylko składnika dwuskładnikowego ośrodka, w którym istnieje pole akustyczne. Badania dotyczą zjawisk fizycznych towarzyszących propagacji fal akustycznych w ośrodkach niejednorodnych, w których jeden składnik - ciało stałe lub płyn - jest rozproszony w drugim składniku, płynie. Przy założeniu, że faza rozproszona nie rozpuszcza się w płynie, w którym jest rozproszona

zachodzące zjawiska fizyczne wiążą się z przekazywaniem pędu z ośrodka rozpraszającego do zawieszonych w nim cząstek. Prowadzi to w efekcie do procesów transportu zawieszonych cząstek i zmian ich lokalnych koncentracji, a w konsekwencji, w określonych warunkach, do koagulacji i wytrącania się zawieszonych cząstek. Stąd pojawia się zainteresowanie doborem takich wartości parametrów pola akustycznego do parametrów zawieszonych cząstek, które byłyby optymalne ze względu na intensyfikację procesów prowadzących do usuwania ich z ośrodka.

2. KIERUNKI I STAN BADAŃ NAUKOWYCH

Rozwój badań zjawisk fizycznych towarzyszących propagacji fal akustycznych w dwuskładnikowych ośrodkach niejednorodnych datuje się od początku lat trzydziestych ubiegłego wieku. Pierwszy okres badań teoretycznych i praktycznych oraz rozwoju tej dziedziny nauki i techniki podsumowany został w monografii Mednikowa [13]. Zawiera ona między innymi wykład mechaniki aerozoli będących pod wpływem fali akustycznej, przegląd dotychczasowych osiągnięć technicznych w budowie instalacji do koagulacji aerozoli i wyczerpujący zbiór odnośników literaturowych.

Obecnie prowadzone badania eksperymentalne (głównie przez ośrodki: hiszpański [9], w Madrycie pod kierunkiem prof. Gallego-Juareza oraz niemiecki [12]) stanowią bogaty materiał, z którym można porównywać wyniki analizy teoretycznej. Prace eksperymentalne prowadzone są z użyciem nowoczesnych przetworników ultradźwiękowych pracujących na częstotliwości około 20 kHz. Stosowane są one do generacji fal ultradźwiękowych w proponowanych zestawach do oczyszczania dymów, mgieł, sadzy itp. w polu akustycznym. Jak wynika z opublikowanych danych - najkorzystniejszą konfiguracją w metodzie akustycznego oczyszczania jest pole fali stojącej, zaś stosowane natężenia fali to $44 \cdot 10^2 - 214 \cdot 10^2 \text{ W/m}^2$. Promienie cząstek rozproszonych w ośrodkach badanych w eksperymentach wahały się od 10–60 μm . Obserwowano zwiększenie promienia cząstek w ciągu kilku sekund działania pola akustycznego.

Badano także skuteczność aglomeracji akustycznej w funkcji promienia fazy rozproszonej. Eksperymenty wskazywały, że akustyczna metoda koagulacji jest najskuteczniejsza dla cząstek fazy rozproszonej rzędu mikrona i mniejszych [15].

Organizacje zajmujące się ochroną środowiska naturalnego zwracają uwagę na fakt, że szczególnie groźne dla przyrody i zdrowia człowieka są aerozole i zawiesiny pyłów o średnicach mniejszych od kilku mikrometrów [4]. Oddziaływanie fal akustycznych okazuje się najbardziej efektywne dla takich właśnie rozmiarów cząstek. W procesie akustycznej koagulacji zwiększeniu ulega średnia wielkość cząstek, co zmniejsza toksyczność aerozolu i ułatwia dalsze oczyszczanie tradycyjnymi metodami.

Szczególnie interesującą konfigurację pola akustycznego zaproponowano w pracy [10], tzw. „drifting ultrasonic resonance fields” (DRF). Jest to nowy typ rezonatora ultradźwiękowego o zmieniającej się częstotliwości, dający, według Autorów, możliwości zwiększenia efektywności procesu pułapkowania cząstek.

O możliwości użycia pola akustycznego do separacji komórek w bioprocjach donoszą prace z ośrodków naukowych niemieckich, austriackich i japońskich [16] oraz w oczyszczaniu wody – z ośrodka izraelskiego [17].

W przypadku fali stojącej o niepłaskim czole fali, cząstki fazy rozproszonej oprócz dryfu w kierunku powierzchni maksimum prędkości akustycznej ośrodka (strzałek) wykonują także dryf poprzeczny, to jest poruszają się stycznie do powierzchni falowej. W przypadku czoła fali „wklęsłego” cząstki poruszają się w kierunku brzegów naczyń,

a przy czole fali „wypukłym” w kierunku środka naczynia. W wyniku tego następuje koncentracja cząstek w pewnych punktach, a nie tylko na pewnych płaszczyznach. Wzmacnia to efekt koagulacji, wspomagający wszelkie procesy oczyszczania. Efekt ten badany był teoretycznie i eksperymentalnie dla cząstek ciała stałego w wodzie [7]. Obserwowano gromadzenie się cząstek wzdłuż linii centralnej tuby z wodą, w polu fali stojącej (połączenie efektów: dryfu i przepływu). Zjawisko może być wykorzystane w nowych technologiach oczyszczania.

Oddziaływanie fal akustycznych na cząstki o kształcie wydłużonych cylindrów (ale o wiele krótszych niż ćwierć długości fali) było przedmiotem rozważań J. L. Diona i współpracowników, którzy akustycznymi metodami badali zawiesiny włókien celulozy [8].

Zjawisko gromadzenia się włókien celulozy w płaszczyznach strzałek prędkości ultradźwiękowej fali stojącej wykorzystano do szybkiego pomiaru wielkości włókien (dyspersji zawiesiny).

Badania teoretycznie i doświadczalnie ciśnienia promieniowania na cienkie, długie cząstki cylindryczne prowadzone były także w związku z pewnymi precyzyjnymi eksperymentami biofizycznymi z dziedziny fizjologii. Wyrażenie na siłę związaną z tym zjawiskiem, w przypadku prostopadłego ustawienia cząstki względem kierunku propagacji fali podano w pracy [19], dla dowolnego kąta padania – w pracy [6].

Z najnowszych prac odnotować należy eksperymentalne prace Mitome i in. [14], którzy badali zjawisko separacji komórek w płynach fizjologicznych i zaproponowali schemat rezonatora ultradźwiękowego wykorzystującego falę stojącą. Dzięki ciśnieniu promieniowania występuje efekt silnego pułapkowania cząstek, które gromadzą się w węzłach fali stojącej i są odfiltrowywane.

Analogiczne eksperymenty były prowadzone przez Tramplerę i in. [16] dla ciałek krwi.

E. Riera-Franco de Sarabia i in. [15] przedstawili projekt instalacji do akustycznego strącania cząstek dymu powstającego przy spalaniu węgla. W polu ultradźwiękowym wytworzonym przez płytowe generatory dużej mocy następuje łączenie cząstek w większe agregaty. W ciągu kilku sekund oddziaływania pola akustycznego na cząstki dymu zaobserwowano zmiany rozkładów ich rozmiaru.

Istotne są także prace [1], [5] dotyczące wyjaśnienia, w jaki sposób uzupełniany jest zapas małych cząstek fazy rozproszonej w strefie (tzw. strefa intensywnej koagulacji), gdzie mogą łączyć się z dużą cząstką.

Przegląd, w dostępnej literaturze, wyników badań zagadnienia oddziaływania fal akustycznych na fazę rozproszoną w ośrodkach płynnych odzwierciedla złożoność omawianych zjawisk, zwłaszcza w aspekcie aplikacyjnym [4], [9].

3. CZĄSTKI FAZY ROZPROSZONEJ W OŚRODKU PŁYNNYM

Niektóre wspólne cechy fizyczne cieczy i gazów pozwalają na wyrażenie zasadniczych praw rozchodzenia się fal akustycznych w obu rodzajach ośrodków w tej samej formie matematycznej.

Z pewnym przybliżeniem cieczy i gazy można traktować jako płyny, w których rozchodzi się fala akustyczna bez strat energii [11]. Dla celów praktycznych ośrodek rzeczywisty można traktować jako idealny, bezstratny, gdy osłabienie fal pochodzące od tłumienia na rozpatrywanej drodze jest niewielkie.

Cząstki ciała stałego lub cieczy rozproszone w ośrodku płynnym wykazują dużą ruchliwość.

W ośrodku płynnym, w którym rozchodzi się fala akustyczna cząstki fazy rozproszonej wykazują dodatkowo ruchy o bardziej złożonym charakterze [13]:

- a) biorą udział w ruchu drgającym ośrodka
- b) poruszają się ruchem postępowym tzn. dryfują pod wpływem czynników, takich jak: ciśnienie promieniowania dźwięku na cząstkę, asymetria ruchu drgającego ośrodka w fali stojącej, periodyczne zmiany lepkości ośrodka, deformacja kształtu fali
- c) wykazują ruch postępowy, zwany wiatrem akustycznym [13] (dotyczy cząstek powiększonych, po koagulacji i nie jest rozważane w tej pracy)
- d) przemieszczają się na skutek wzajemnych oddziaływań hydrodynamicznych

Odpowiednie równania ruchu pojedynczej cząstki fazy rozproszonej analizować należy w zależności od fizycznych parametrów pola akustycznego i zawiesiny.

W polu akustycznym rzeczywisty ruch cząstki zawieszonyj w ośrodku płynnym jest złożeniem szybkiego ruchu drgającego i powolnego ruchu postępowego względem ośrodka płynnego (dryf). W literaturze wielu Autorów [1], [10], [13], [18] prezentowało analizę zagadnienia, biorąc pod uwagę cztery główne czynniki powodujące dryf cząstek fazy rozproszonej w ośrodku płynnym w obecności pola akustycznego: ciśnienie promieniowania dźwięku na cząstkę, periodyczne zmiany lepkości drgającego ośrodka, deformacja kształtu fali akustycznej, asymetria ruchu drgającego ośrodka w akustycznej fali stojącej.

Zagadnienia teoretyczne dotyczące oddziaływania fal akustycznych z ośrodkiem niejednorodnym mają skomplikowany charakter. Z tej zapewne przyczyny, w wielu pracach z prezentowanej problematyki, nie udało się ustrzec błędnych wniosków i spostrzeżeń dotyczących badanych zjawisk i możliwości praktycznych zastosowań.

4. ANALIZA TEORETYCZNA ZAGADNIENIA

W analizie teoretycznej oddziaływania fal akustycznych na cząstki fazy rozproszonej w ośrodku płynnym przyjęto następujące założenia:

- a) ośrodek otaczający cząstkę fazy rozproszonej nie wykonuje innych ruchów oprócz ruchu falowego, spowodowanego istnieniem pola akustycznego
- b) cząstka fazy rozproszonej nie oddziałuje z innymi cząstkami (siły te należy brać pod uwagę dopiero przy odległościach międzycząsteczkowych rzędu rozmiarów cząstki), koncentracja cząstek jest mała
- c) rozważany w pracy model matematyczny zakłada kulisty kształt cząstek fazy rozproszonej lub wydłużonych cylindrów w przypadku włókien celulozy
- d) ruch pojedynczej cząstki fazy rozproszonej odbywa się wyłącznie pod wpływem sił dryfu oraz sił tarcia zależnych od prędkości.

Przyjmując najogólniejszą zależność sił oporu od prędkości i wspólną dla wszystkich sił dryfu w polu fali stojącej zależność od położenia, otrzymuje się równanie ruchu pojedynczej cząstki fazy rozproszonej w przybliżeniu Stokesa i Oseena w postaci [1]:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = -\rho_{St} \frac{dx}{dt} - \rho_{Os} \frac{dx}{dt} \left| \frac{dx}{dt} \right| + F_D \sin 2kx \quad (4.1)$$

gdzie: ρ_{St} i ρ_{Os} są współczynnikami tłumienia w przybliżeniu Stokesa i Oseena, m , x - to odpowiednio masa i położenie cząstki mierzone wzdłuż kierunku poprzecznego do płaszczyzn węzłowych fali stojącej zaś F_D - amplituda siły dryfu.

W zależności od parametrów cząstek fazy rozproszonej i rozważanego pola akustycznego można dokonać uproszczenia tego równania [1].

Dla dużych współczynników reprezentujących opór można spodziewać się rozwiązań nie wykazujących oscylacji, co świadczy o znikomej roli siły bezwładności. Można więc badać równanie (4.1) bez pierwszego wyrazu, a więc nieliniowe równanie I-rzędu. Uproszczenie tego rodzaju nazywa się przybliżeniem Kinga–St. Claira, od nazwisk Autorów, którzy pierwsi rozważali je w przypadku dryfu radiacyjnego W mechanice aerozoli przybliżenie Kinga–St. Claira uznane jest za szczególnie użyteczne, umożliwia bowiem analityczne oszacowanie stałych transportu cząstek do stref, gdzie następuje koagulacja.

Aby porównać skuteczność oddziaływania sił różnych typów dryfu występujących w polu akustycznym na cząstki fazy rozproszonej wprowadza się pojęcie przyspieszenia cząstki pod wpływem sił dryfu, amplitudę wartości tego przyspieszenia oznaczono A_D . Bez względu na mechanizm powstawania przyspieszenia cząstki pod wpływem siły dryfu dowolnego typu można zapisać kryterium stosowalności przybliżenia Kinga–St. Claira korzystając z tej praktycznej wielkości [1]:

(oznaczając: η – współczynnik lepkości ośrodka, r_p – promień cząstki, f - częstotliwość fali akustycznej, c – prędkość rozchodzenia się fali akustycznej w ośrodku)

$$A_D < \frac{81\eta^2 c}{64\pi r_p^4 \rho_p^2 f} \quad (4.2)$$

Powyższy warunek określa dla jakich wartości amplitudy przyspieszenia ruch cząstek w polu fali stojącej nie ma charakteru oscylacyjnego, a przybliżenie Kinga–St. Claira może być stosowane.

Badania porównawcze dryfów różnych typów można dokonać poprzez obliczenie wartości unormowanych amplitud przyspieszenia cząstki pod wpływem sił dryfu. Można wykazać, że istnieją: promień krytyczny cząstki i częstotliwość krytyczna fali akustycznej, które wyznaczają obszary dominacji porównywanych typów dryfu.

Oddziaływanie akustycznej fali stojącej na cząstki fazy rozproszonej powoduje zmiany koncentracji cząstek w obszarze między strzałką a węzłem tej fali.

Jeśli $N = N(x, t)$ oznacza liczbę cząstek na jednostkę objętości w miejscu określonym przez współrzędną x w chwili t , to rozwiązanie równania zachowania ilości cząstek (równanie ciągłości) pozwala określić funkcje rozkładu i stałe czasowe procesu zmian koncentracji cząstek w polu fali stojącej [1]:

$$N(x, t) = \frac{N_0}{\sin^2(kx) \exp(-\delta t) + \cos^2(kx) \exp(\delta t)} \quad (4.3)$$

$$\delta = 2kv_D \quad (4.4)$$

zaś v_D - wartość amplitudy prędkości dryfu, k – liczba falowa

Z postaci rozwiązania (4.3) równania ciągłości wynika, że cząstki fazy rozproszonej gromadzone są w okolicach węzłów lub strzałek fali stojącej, w zależności od znaku wartości przyspieszenia cząstki pod wpływem siły danego dryfu. Koncentracja cząstek w węzłach lub strzałkach zmienia się wykładniczo.

W węzłach fali stojącej koncentracja maleje jak $N_0 e^{-\delta t}$, a w strzałkach rośnie jak $N_0 e^{\delta t}$.

Wielkość δ^{-1} jest więc stałą czasową procesu koncentracji cząstek w okolicach strzałek lub węzłów fali stojącej, zależnie od znaku wartości amplitudy prędkości dryfu.

Jeżeli zaniedbuje się oddziaływanie między cząstkami i nie bierze się pod uwagę ich skończonych wymiarów można przyjąć, że rozmiar strefy, w której skupiają się w polu fali stojącej cząstki o promieniu r_p i masie m_p jest rzędu [2]:

(oznaczając: f – częstotliwość fali, k_B – stała Boltzmana, T – temperatura w skali Kelvina)

$$\sigma(r_p, f) = \left(\frac{k_B T}{2m_p A_D k} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.5)$$

Wartość powyższa pozwala ocenić szerokość strefy podwyższonej koncentracji cząstek wywołanej dryfem w polu fali stojącej.

Na podstawie badań jakościowych i ilościowych można stwierdzić, że w procesie odgazowywania cieczy decydującą rolę odgrywa dryf radiacyjny, powodując koncentrację pęcherzyków gazu w wodzie w płaszczyznach węzłowych fali stojącej [5].

Dryf asymetryczny w polu fali stojącej o dowolnym przestrzennym rozkładzie amplitudy drgań uznany jest za bardzo istotny, z punktu widzenia teorii i praktycznych zastosowań.

Zakłada się, że cząstka o promieniu r_p , gęstości ρ_p i masie m_p znajduje się w ośrodku płynnym o gęstości ρ_g i lepkości η . W ośrodku tym występuje fala akustyczna, opisana przez przestrzenny rozkład prędkości harmonicznym drgań cząstek ośrodka \vec{u}_g .

Przyjmując, że oddziaływanie cząstka – ośrodek odbywa się za pośrednictwem sił tarcia, opisanych prawem Stokesa, prędkość \vec{u}_p cząstki wyznaczyć można z równania:

$$m_p \frac{d\vec{u}_p}{dt} = 6\pi\eta r_p (\vec{u}_g - \vec{u}_p) \quad (4.6)$$

Cząstka w pierwszym przybliżeniu wykonuje ruch oscylacyjny o częstości takiej jak fala, innej na ogół amplitudzie i przesunięty w fazie. Wprowadzając czas relaksacji cząstki τ i współczynnik porywu μ_p określający amplitudę prędkości drgań cząstki fazy rozproszonej w stosunku do amplitudy prędkości drgań ośrodka otrzymuje się :

$$\vec{u}_p = \mu_p \vec{u}_g \exp(i\varphi) \quad (4.7)$$

Wielkość φ opisuje fazowe opóźnienie ruchu cząstki względem ośrodka. Jeśli amplituda prędkości drgań ośrodka jest funkcją położenia, ruch cząstki jest harmoniczny tylko w przybliżeniu, a chwilowy środek drgań będzie się przemieszczał. Należy położyć więc:

$$\vec{u}_p = \frac{d\vec{r}_0}{dt} + \frac{d\vec{\xi}}{dt} \quad (4.8)$$

gdzie: \vec{r}_0 opisuje chwilowe położenie punktu równowagi w ruchu drgającym, a $\vec{\xi}$ jest szybkozmienną funkcją czasu opisującą ten ruch.

W ogólnym przypadku w równaniu (4.6) należy wziąć wartość prędkości ośrodka \vec{u}_g w punkcie aktualnego położenia cząstki, a więc w punkcie $\vec{r}_0 + \vec{\xi}$, zatem zadana funkcja \vec{u}_g zawiera niejawnie funkcję szukaną \vec{u}_p . Czyni to równanie ruchu trudnym do rozwiązania w ogólnym przypadku. Należy skorzystać z przybliżenia składającego się z dwóch etapów. Po pierwsze zastosować rozwinięcie:

$$\vec{U}_g(\vec{r}_0 + \vec{\xi}) \approx \vec{U}_g(\vec{r}_0) + (\vec{\nabla})(\vec{U}_g) \vec{\xi} \quad (4.10)$$

gdzie: \vec{U}_g jest amplitudą prędkości drgań cząstek ośrodka w fali, zaś ∇_g (oznacza iloczyn diadyczny operatora Nabla i wektora \vec{U}_g).

Ponadto przewiduje się, że funkcja ζ opisuje prosty ruch harmoniczny, taki jak w fali płaskiej. Podstawiając (4.7) i (4.8) do równania ruchu (4.6) pominać należy dalej wszystkie wyrazy szybkozmiennie, otrzymując po przekształceniach równanie ruchu średniego chwilowego środka drgań cząstki:

$$m_p \frac{d^2 \vec{r}_0}{dt^2} + 6\pi\eta r_p \frac{d\vec{r}_0}{dt} = -\vec{\nabla} \left(\frac{1}{4} m_p \mu_p^2 U_g^2 \right) \quad (4.11)$$

Wyrażenie po prawej stronie (4.11) przedstawia siłę dryfu asymetrycznego w rozważanym przypadku. Wielkość pod operatorem gradientu opisuje potencjał Φ_{DA} tej siły.

$$\Phi_{DA} = \left(\frac{1}{4} m_p \mu_p^2 U_g^2 \right) \quad (4.12)$$

Funkcja μ_p zależy od promienia cząstki i częstotliwości fali. Dla bardzo małych rozmiarów cząstek jest ona praktycznie równa jedności, w otoczeniu pewnej częstotliwości krytycznej lub krytycznego promienia gwałtownie maleje do zera [13]. Z tego wynika, że opisywany dryf dotyczy tylko względnie małych cząstek, dla których $\mu_p \neq 0$. Cząstki dążą do punktów, w których potencjał siły dryfu (4.12) jest najmniejszy. Siła dryfu w tym przypadku gromadząc cząstki w punktach, pozwala osiągać znacznie większe koncentracje [3].

Za koagulujące działanie pola akustycznego, jak to wynika z analizy wpływu koagulacji inercyjnej i efektu amplitudowego na sprawność procesu koagulacji, odpowiedzialny jest proces łączenia się cząstek o różnych wymiarach, czyli efekt amplitudowy.

4. PODSUMOWANIE

Praca poświęcona jest tematyce z zakresu akustyki fazy rozproszonej, rzadko podejmowanej w literaturze krajowej. Dotyczy zagadnień związanych z zachowaniem się cząstek fazy rozproszonej w płynnym ośrodku ciągłym, w którym istnieje pole akustyczne. Oddziaływanie fal akustycznych, na znajdujące się w tym środowisku stochastycznie rozproszone cząstki posiada ważne aspekty aplikacyjne, jak również interesujące wątki teoretyczne. Przykładem mogą być rozważania dla cząstek innych niż te, które posiadają symetrię sferyczną, które są bardzo istotne, ponieważ w zagadnieniach tych oprócz siły występuje również moment siły. Ważne są też prace związane z problematyką dryfu poprzecznego cząstek w polu „dwuwymiarowej fali stojącej” o niepłaskim czole fali.

Na podkreślenie zasługuje dobra zgodność wyników badań teoretycznych i doświadczalnych w omawianej problematyce.

Wyniki badań pozwalają dostrzec pojawiającą się możliwość wykorzystania szeregu konfiguracji pola akustycznego w praktyce, głównie w ochronie środowiska naturalnego, do zapobiegania koncentrowaniu się zanieczyszczeń wód i powietrza. Wskazują one również na możliwość wykorzystania poznanych praw oddziaływania pola akustycznego na fazę rozproszoną w wielu procesach technologicznych.

LITERATURA

1. H. CZYŻ, On the concentration of aerosol particles by means of drift forces in a standing wave field, *Acustica*, **70**, 23-28 (1990).
2. H. CZYŻ, Rozkład przestrzenny cząstek wokół położenia równowagi w polu fali stojącej, *Materiały OSA 1997*, Gdańsk - Jastrzębia Góra, 211-216.
3. H. CZYŻ, The two-dimensional acoustic standing wave and its application in a coagulation of aerosols, *J.A.S.A.*, **103**, 2, 2764 (1998).
4. H. CZYŻ, Technical application of acoustic coagulation for precipitation of gases, *Proceedings of the International Symposium and Trade Fair on the Clean-up of Manufactured Gas Plants, Land Contamination & Reclamation*, **3**, 4, Florida State University, 14.1-14.2 (1995).
5. H. CZYŻ, W. ŚCIUK, The motion of gas bubbles in a liquid under the influence of acoustical standing wave, *Archives of Acoustics*, **4**, 22, 445-454 (1997).
6. H. CZYŻ, Podstawowe wielkości dynamiczne w zagadnieniu dryfu włókien w polu fali stojącej, *Materiały OSA 1992*, AGH, Kraków, 239-242.
7. Y. DAIN, M. FICHMAN, P. VAINSHTEIN, D. PNUELI, Dynamics of aerosol particles in two-dimensional high frequency sonic field, *Journal Aerosol Science*, **2**, 575-594 (1995).
8. J. L. DION, J. L. VALADE, K. N. LAW, Evolution d'une suspension de fibres dans un champs ultrasonore stationnaire, *Acustica* **65**, 284-289 (1988).
9. J. A. GALLEGO - JUAREZ, E. RIERA-FRANCO de SARABIA, G. RODRIGEZ CORRAL, J. MAGILL, K. RICHTER, S. FOURCAUDOT, P. BARRAUX, Application of high intensity acoustic waves for aerosol precipitation, *Proceedings of ASME 1991*, Atlanta, 601-606.
10. F. HAGER, E. BENES, W. BOLEK, M. GRÖSCHL, Separation of dispersed particles by drifting ultrasonic resonance fields, *Proceedings of Ultrasonic International Conference*, Oxford 1991, 261-266.
11. E. KOZACZKA, Fale nieliniowe w wodzie, *Materiały OSA 1999*, Zakopane, 39-50.
12. J. MAGILL, P. CAPERAN, J. SOMERS, K. RICHTER, S. FOURCAUDOT, J. A. GALLEGO-JUAREZ, E. R. RIERA-FRANCO de SARABIA, G. RODRIGEZ-CORRAL, Characteristics of an electroacoustic precipitator, *European Aerosol Conference*, Oxford 1992, 6-11.
13. E. P. MEDNIKOV, *Acoustic coagulation and precipitation of aerosols*, Consultants Bureau, New York 1966.
14. H. MITOME, T. KOZUKA, T. TUZIUTI, M. GRÖSCHL, B. E. HANDL, Generation of acoustic streaming in an ultrasonic resonator for particle separation, *Proceedings of WCU 1997*, Yokohama, 200-201.
15. E. R. RIERA-FRANCO de SARABIA, Application of high power ultrasound to enhance fluid/solid particle separation processes, *Ultrasonics*, **38**, 642-646 (2000).
16. A. ŚLIWIŃSKI, *Ultradźwięki i ich zastosowania*, WNT, Warszawa 2001.
17. P. VAINSHTEIN, M. FICHMAN, K. SHUSTER, C. GUTFINGER, The effect of centreline particle concentration in a wave tube, *Journal Fluid Mechanics*, **306**, 31-42 (1996).
18. T. G. WANG, C. P. LEE, *Radiation pressure and acoustic levitation*, Nonlinear Acoustics, Academic Press San Diego, New York, 177-205 (1997).
19. J. WU, G. DU, S. S. WORK, D. M. WARSHAW, Acoustic radiation pressure on a rigid cylinder, *J.A.S.A.*, **87**, 581-586 (1990).