

5. Варданян Р. С., Папаян Г. В. Изв. АН АрмССР, Физика, 22, 316 (1987).

6. Арманд Н. А., Секистов В. Н. Изв вузов, Радиофизика, 23, 555 (1980).

7. Турчак Л. И. Основы численных методов. Изд. Наука, М., 1987.

ՍՏՈԽԱՍՏԻԿ ՄԻՋԱՎԱՅՐԵՐՈՒՄ ՀԱՌԱԳԱՅԹՄԱՆ ՏԵՂԱՓՈԽՄԱՆ ԽՆԴԻՐՆԵՐՈՒՄ ՄԻ ՄՈՏԱՎՈՐՈՒԹՅԱՆ ՄԱՍԻՆ

Ռ. Ս. ՎԱՐԴԱՆՅԱՆ

Դիտարկվում է Կրեյնանի մոտավորությունը աղբյուրային միջինացված ֆունկցիայի համար Դալսոնի հավասարման վերաբերյալ: Ենթադրվում է, որ ցրման տարրական ակտի ժամանակ քվանտի վերադարձան հավանականությունը հանդիսանում է ձ-կորելացված պատահական Դաուսյան դաշտ: Դիտարկված մոտավորությամբ գտնված են աղբյուրային ֆունկցիան, ճառագայթման ինտենսիվությունը և քվանտի ցրումների միջին թիվը:

ON ONE APPROXIMATION IN PROBLEMS OF RADIATION TRANSFER IN STOCHASTIC MEDIA

R. S. VARDANYAN

The Creichnan approximation to the Dyson equation relative to the first moment of source function is considered. The quantum survival probability is assumed to be a δ -correlated arbitrary Caussian field. In the approximation under consideration we obtained the source function, the average number of quantum scatterings and the radiation intensity.

Изв. АН Армянской ССР, Физика, т. 24, вып. 3, 116—122 (1989)

УДК 532.529

УРЕГУЛИРОВАНИЕ КОНЦЕНТРИРОВАНИЯ МАГНИТНЫХ ЧАСТИЦ В СУСПЕНЗИЯХ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ В ПРИСУТСТВИИ СТОЯЧЕЙ ЗВУКОВОЙ ВОЛНЫ

С. В. АРУТЮНЯН, Т. Н. ГАРЕГИНЯН, Р. С. ОГАНЕСЯН,
М. А. ПЛУЗЯН

Ереванский медицинский институт

(Поступила в редакцию 15 апреля 1988 г.)

Исследовано влияние магнитного поля на концентрирование магнитных частиц в суспензиях в стоячем ультразвуковом поле. При учете сил вязкости, звукового излучения, выталкивания и магнитного поля показано, что частицы (эритроциты, феррочастицы) концентрируются в кольца и диски на равноотстоящих поверхностях, расположенных в окрестности узлов давления стоячей звуковой волны. Найдены области значений градиента магнитного поля, при которых имеет место указанное явление.

Давно известно, что под действием поля звуковой волны происходит концентрирование частиц, взвешенных в жидкой среде [1]. В дальнейшем этот факт был подтвержден на основе опытов над каплями толуола и частиц кварца в воде [2], а также полистиролевых частиц и красных кле-

ток крови в дегазированной воде [3]. В последней работе было теоретически показано также, что концентрирование частиц в суспензии происходит благодаря наличию стоячей звуковой волны и что расстояние между плоскостями концентрирования порядка $\lambda/2$, где λ —длина волны. Интерес к этому явлению обусловлен, например, возможными применениями эффекта в акушерской ультразвукографии. Так, в работе [4] показано, что под действием ультразвука частоты 3 МГц кровяной эмбрион цыпленка приостанавливается, а клетки крови концентрируются в позициях, отдаленных друг от друга на $\lambda/2$.

В данной работе мы изучали действие магнитного поля с постоянным градиентом на указанное явление. Эта задача представляет определенный научный интерес в связи с возможным применением для сепарации магнитных частиц.

Пусть суспензия частиц, обладающих магнитным моментом μ , находится в цилиндрически-симметричном объеме. Суспензия помещена в магнитное поле с постоянным градиентом и облучается ультразвуком, распространяющимся вдоль оси цилиндра. Мы предполагаем, что радиус частиц a намного меньше λ . (В дальнейшем силами взаимодействия частиц и влиянием потоков термальной конвекции на движение частиц будем пренебрегать). Форму частиц будем предполагать сферической. Напишем уравнения движения частиц в цилиндрической системе координат. Ось Z направим вдоль оси цилиндра.

$$\begin{cases} \frac{4\pi a^3}{3} (\rho_1 + \rho_0/2) \ddot{z} = F_{1z} + F_{2z} + F_{3z} + F_{4z}, \\ \frac{4\pi a^3}{3} (\rho_1 + \rho_0/2) \ddot{r} = F_{2r} + F_{4r}. \end{cases} \quad (1)$$

Здесь ρ_1 — плотность вещества частиц, ρ_0 — плотность жидкости, $V_1 = 4\pi a^3/3$ — объем частиц. Вид левой части уравнений (1) и (2) обусловлен гидравлическим сопротивлением жидкости движению частиц сферической формы [3, 5].

Сила F_1 вызвана полем стоячей звуковой волны

$$P = P_0 \sin kz \sin \omega t, \quad (3)$$

где P_0 , k и ω представляют соответственно амплитуду, волновое число и частоту звуковой волны. Узлы давления расположены в точках $z = \pi m/k$, где m — целое число. На мелкие частицы ($a \ll \lambda$) со стороны звукового поля действует сила F_{1z} , которая, согласно [3, 6], определяется формулой

$$F_{1z} = - \frac{\omega P_0^2 V_1}{4\rho_0 c_0^3} \left(\frac{5\rho_1 - 2\rho_0}{2\rho_1 + \rho_0} - \frac{\rho_0 c_0^2}{\rho_1 c_1^2} \right) \sin 2kz, \quad (4)$$

где c_0 и c_1 — скорости звука в жидкости и внутри частицы соответственно.

F_2 — сила вязкости, которая определяется формулой Стокса. При написании этой силы следует учитывать то обстоятельство, что в вязкой жидкости в поле стоячей звуковой волны при наличии твердых стенок возникают стационарные вихревые течения [5]. Поэтому в выражение силы вязкости входит относительная скорость частиц

$$F_{2z} = -6\pi\eta a (\dot{z} - u_z), \quad (5)$$

$$F_{2r} = -6\pi\eta a (\dot{r} - u_r), \quad (6)$$

η — динамический коэффициент вязкости жидкости, а u — скорость акустических микротечений. Следуя [3], будем пользоваться выражениями

$$u_z = -\frac{3P_0^2}{8\rho_0^2 c_0^3} \left[1 - 2\left(\frac{r}{R}\right)^2 \right] \sin 2kz, \quad (7)$$

$$u_r = -\frac{3P_0^2 k r}{8\rho_0^2 c_0^3} \left[1 - \left(\frac{r}{R}\right)^2 \right] \cos 2kz. \quad (8)$$

F_3 — вертикальная сила выталкивания

$$F_{3z} = V_1 (\rho_1 - \rho_0) g, \quad (9)$$

а g — ускорение свободного падения.

Сила F_4 , обусловленная магнитным полем с индукцией B , определяется формулой [7—9]

$$F_4 = (\mu \nabla) B. \quad (10)$$

Если полагать, что $\mu = \mu B/B$, то F_4 можно представить в виде [8]

$$F_4 = \mu (\nabla B), \quad (11)$$

где μ и B модули соответствующих векторов.

Подставляя формулы (4)—(11) в (1) и (2), получаем следующую систему уравнений

$$\begin{cases} \frac{4}{3} \pi a^3 \left(\rho_1 + \frac{\rho_0}{2} \right) \ddot{z} = - \frac{\omega P_0^2 V_1}{4\rho_0 c_0^3} \left(\frac{5\rho_1 - 2\rho_0}{2\rho_1 + \rho_0} - \frac{\rho_0 c_0^2}{\rho_1 c_1^2} \right) \sin 2kz - \\ - 6\pi\eta a \left\{ \dot{z} + \frac{3P_0^2}{8\rho_0^2 c_0^3} \left[1 - 2\left(\frac{r}{R}\right)^2 \right] \sin 2kz \right\} + V_1 (\rho_1 - \rho_0) g + \mu \frac{\partial B}{\partial z}, \\ \frac{4}{3} \pi a^3 \left(\rho_1 + \frac{\rho_0}{2} \right) \ddot{r} = - 6\pi\eta a \left\{ \dot{r} - \frac{3P_0^2 k r}{8\rho_0^2 c_0^3} \times \right. \\ \left. \times \left[1 - \left(\frac{r}{R}\right)^2 \right] \cos 2kz + \mu \frac{\partial B}{\partial r} \right\}. \end{cases} \quad (12)$$

Из уравнения (12) следует, что скорость частицы порядка

$$\dot{z} \sim \frac{\frac{4}{3} \pi a^3 \left(\rho_1 + \frac{\rho_0}{2} \right) \ddot{z}}{6\pi\eta a} = \frac{2a^2}{9\eta} \left(\rho_1 + \frac{\rho_0}{2} \right) \ddot{z}. \quad (14)$$

Скорости этого порядка частицы достигают за время порядка $\tau \sim \frac{\dot{z}}{\ddot{z}} \sim \frac{2a^2}{9\eta} \left(\rho_1 + \frac{\rho_0}{2} \right)$. Подставляя числовые значения $a \sim 10^{-4} + 10^{-6}$ см, $\eta \sim 0,01$ П, $\rho \sim (1 + 10)$ г/см³, получаем $\tau \sim 10^{-6} + 10^{-9}$ сек. Это время намного меньше времени, за которое частица проходит расстояние порядка $\lambda/4$. Последнее порядка десятков секунд. Следо-

вательно мы можем в уравнениях (12) и (13) пренебречь инерционными членами.

Опуская названные члены и разрешая уравнения (12) и (13) относительно $\dot{z}$ и $\dot{r}$, получаем

$$\dot{z} = -A \sin 2kz + D, \quad (15)$$

$$\dot{r} = A_1 \frac{r}{R} \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right) + D_1. \quad (16)$$

Здесь

$$A = \frac{\alpha^2 \omega P_0^2}{18 \eta \rho_0 c_0^3} \left[\frac{5\rho_1 - 2\rho_0}{2\rho_1 + \rho_0} - \frac{\rho_0 c_0^2}{\rho_1 c_1^2} + \frac{27\eta}{4\rho_0 \omega \alpha^2} \left(1 - 2 \frac{r^2}{R^2} \right) \right], \quad (17)$$

$$D = \frac{2\alpha^2 (\rho_1 - \rho_0) g}{9\eta} + \frac{2\alpha^2}{9\eta} M_s \frac{\partial B}{\partial z}, \quad (18)$$

$$A_1 = \frac{3P_0^2 k R}{8\rho_0^2 c_0^3} \cos 2kz, \quad (19)$$

$$D_1 = \frac{2\alpha^2}{9\eta} M_s \frac{\partial B}{\partial r}. \quad (20)$$

Очевидно, частицы будут собираться в тех областях внутри суспензии, где $\dot{z} = 0$ и $\dot{r} = 0$.



Рис. 1.

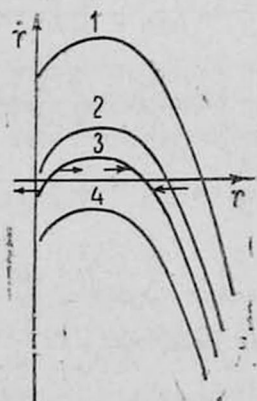


Рис. 2.

Рис. 1. Зависимость скорости частиц $\dot{z}$ от z .

Рис. 2. Зависимость скорости частиц $\dot{r}$ от r .

Сначала исследуем уравнение (15). На рис. 1 приведен график зависимости $\dot{z}$ от z .

Скорость частицы z равняется нулю на поверхностях (при $|D| < A$)

$$z = \frac{1}{2k} \left[(-1)^n \arcsin \frac{D}{A} + \pi n \right], \quad (21)$$

однако, как видно из рисунка 1, частицы будут собираться только в тех плоскостях, которые расположены вблизи узлов давления, так как скорость частицы только в указанной области направлена к плоскости концентрирования и сверху, и снизу (другими словами, частицы находятся в устойчивом положении).

Время, за которое частица из точки z доходит до точки z_f , определяется интегралом

$$\tau = \int_z^{z_f} \frac{dz}{D - A \sin 2kz}. \quad (22)$$

После интегрирования получаем

$$\tau = \frac{1}{2k(A^2 - D^2)^{1/2}} \left[\ln \left| \frac{\operatorname{tg} kz - \frac{A}{D} - \sqrt{\frac{A^2}{D^2} - 1}}{\operatorname{tg} kz - \frac{A}{D} + \sqrt{\frac{A^2}{D^2} - 1}} \right| \right]_z^{z_f}. \quad (23)$$

Когда $|D| > A$, концентрирование частиц не происходит ($\dot{z}$ не обращается в ноль, см. (15)).

Теперь рассмотрим движение вдоль цилиндра. На рис. 2 приведен график зависимости $\dot{r}$ от r для разных D_1 . В 1, 2 и 4 случаях частицы просто дрейфуют в радиальном направлении. В 3-м случае $\left(-\frac{2A_1}{3\sqrt{3}} < D_1 < 0\right)$ скорость $\dot{r}$ обращается в ноль в двух точках — R_1 и R_2 .

Устойчивой поверхностью концентрирования частиц является поверхность $r = R_1$. Внутри цилиндрической поверхности радиуса $r = R_2$ частицы совершают колебательное движение.

Сочетая картины движения частиц в z и r направлениях, можно прийти к выводу, что в магнитном поле с постоянным градиентом происходит концентрирование частиц. При этом, если

$$\frac{\partial B}{\partial r} > 0 \text{ и } \frac{\partial B}{\partial r} < -\frac{9\eta P_0^2 k R}{8\sqrt{3} M_s \alpha^2 \rho_0^2 c_0^3} \sqrt{1 - \frac{D^2}{A_0^2}}, \quad (24)$$

$$\text{где } A_0 = A \left(r = \frac{R}{\sqrt{3}} \right),$$

то частицы концентрируются на определенных плоскостях и совершают движение (дрейф) в радиальном направлении.

Если же

$$-\frac{9\eta P_0^2 k R}{8\sqrt{3} M_s \alpha^2 \rho_0^2 c_0^3} \sqrt{1 - \frac{D^2}{A_0^2}} < \frac{\partial B}{\partial r} < 0, \quad (25)$$

т. е. небольшой градиент магнитного поля направлен к оси цилиндра, в суспензии образуются кольца радиуса $r = R_1$ и диск радиуса $r = R_2$, где R_1 и R_2 положительные корни уравнения

$$A_1 \frac{r}{R} \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right) + D_1 = 0. \quad (26)$$

По радиусу частица от точки r до точки r_f достигает за время

$$\tau = \int_r^{r_f} \frac{dr}{A_1 \frac{r}{R} \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right) + D_1} \quad (27)$$

Характерное время движения по радиусу порядка R/A_1 . Для эритроцитов при параметрах, приводимых ниже, это время порядка 10^3 сек, для ферро-частиц — 10^{-2} сек.

Для иллюстрации полученных результатов проведем численный анализ. Для эритроцитов возьмем $\rho_1 = 1,09$ г/см³, $\alpha = 3,5 \cdot 10^{-4}$ см, $c_1 = 1,56 \cdot 10^5$ см/сек. $M_s = 1000$ Гс. Тогда при $P_0 = 1$ атм., $\omega = 8$ МГц, $\frac{\partial B}{\partial r} = 0,1$ Гс/см, $R = 0,5$ см получаем $R_2 = 0,088 R$, $R_1 = 0,937 R$. Расстояние между горизонтальными плоскостями концентрирования частиц порядка $5,6 \cdot 10^{-2}$ см. При этом в z направлении требуется градиент магнитного поля порядка 10^{-2} Гс/см.

Для ферромагнитных частиц соответственно имеем $\rho_1 = 7,8$ г/см³, $\alpha = 10^{-6}$ см, $c_1 = 4,98 \cdot 10^5$ см/сек, $M_s = 1000$ Гс. При $P_0 = 1$ атм., $\omega = 10^{10}$ Гц и $\frac{\partial B}{\partial r} = 10^8$ Гс/см, $R = 0,5$ см имеем $R_2 = 0,124 R$, $R_1 = 0,932 R$. Расстояние между плоскостями концентрирования порядка $1,6 \cdot 10^{-4}$ см, при этом в z направлении требуется градиент магнитного поля порядка 3 Гс/см.

Таким образом с помощью магнитного поля можно управлять процессом концентрирования магнитных частиц в суспензиях при наличии поля стоячей звуковой волны.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kundt A., Lehmann O. Annal. Physik (Poggendorff). 153, 1 (1874)
2. Sollner K., Bondy C. Trans. Faraday Soc., 32, 616 (1936)
3. Gould R. K., Coakley W. T. Finite-amplitude wave effects in fluids, с. 252, 1971
4. Dyson M., Woodward B., Pond J. Nature, 232, 572 (1972)
5. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Гидродинамика. Изд. Наука, М., 1986.
6. Агранат Б. А. и др. Основы физики и техники ультразвука. Изд. Высшая школа, М., 1987.
7. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Электродинамика сплошных сред. Изд. Наука, М., 1982.
8. Шлиомис М. И. УФН, 112, 427 (1987).
9. Терлеукий Я. П., Рыбаков Ю. П. Электродинамика. Изд. Высшая школа, М., 1980.

ՍՈՒՍՊԵՆԶԻԱՆԵՐՈՒՄ ՄԱԳՆԵՏԱԿԱՆ ՄԱՍԵՆԿՆԵՐԻ ԽՏԱՑՄԱՆ
ԿԱՐԳԱՎՈՐՈՒՄԸ ՄԱԳՆԵՏԱԿԱՆ ԴԱՇՏՈՎ ԿԱՆԳՈՒՆ
ՁԱՅՆԱՅԻՆ ԱԼԻՔԻ ԱՌԿԱՅՈՒԹՅԱՆ ԴԵՊՔՈՒՄ

Ս. Վ. ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ, Թ. Ն. ԳԱՐԵԳԻՆՅԱՆ, Ռ. Ս. ՀՈՎՀԱՆՆԻՍՅԱՆ,

Մ. Ա. ՊԼՈՒՋՅԱՆ

Ուսումնասիրված է սոսպենդիաներում կանգուն ուղարձայնի աղեղնությամբ մագնիսական մասնիկների խտացման վրա մագնիսական դաշտի աղեղնությունը: Մածուցիկության, ձայնային ճառագայթման, արթմնեղյան և մագնիսական ուժերի հաշվառմամբ ցույց է տրված,

որ մասնիկները (էրիթրոցիտներ, ֆերոմասնիկներ) խտանում են ձայնի ճնշման հանգույցների մոտակայքում գտնվող հավասարահեռ մակերևույթների վրա տեղաբաշխված օղակների և սկավառակների տեսքով: Գտնված են մագնիսական դաշտի զրադիենտի արժեքների այն տիրույթները, որոնց դեպքում տեղի ունի հիշատակված երևույթը:

MONITORING OF CONCENTRATION OF MAGNETIC PARTICLES IN SUSPENSIONS BY MAGNETIC FIELD IN THE PRESENCE OF STANDING SONIC WAVE

S. V. HARUTYUNYAN, T. N. GAREGINYAN, R. S. HOVANISYAN,
M. A. PLUZYAN

The effect of magnetic field on the concentration of magnetic particles in suspensions in the presence of standing ultrasonic wave is considered. It is shown that taking into account the viscous force, the acoustic pressure, the buoyancy and the magnetic force, the particles (erythrocytes, ferroparticles) aggregate into annuli and discs on equidistant surfaces located near pressure nodes of the standing sonic wave. The values of magnetic field gradient are found for which the process in question takes place.

Изв. АН Армянской ССР, Физика, т. 24, вып. 3, 122—126 (1989).

УДК 551.501.771:551.508.7

ОПТИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГАЗОВОГО СОСТАВА ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЫ, ИСПОЛЬЗУЮЩИЙ ЭФФЕКТ ДОППЛЕРА

А. Г. ГОРЕЛИК

Московский институт машиностроения

Ж. Б. ХАЧАТРЯН

Ереванский государственный университет

(Поступила в редакцию 24 июля 1988 г.)

В работе рассмотрена возможность определения газового состава верхних слоев атмосферы, с помощью средств активной радиолокации, работающих в оптическом диапазоне, включающем инфракрасную область электромагнитного излучения.

В [1] показана возможность и перспективность применения средств активной радиолокации, работающих в микроволновом диапазоне, для определения содержания «малых» газовых компонент в верхней атмосфере используя эхо-сигналы от отражателя, установленного на борту искусственного спутника Земли, движущегося по круговой орбите.

В основе предложенного метода, так же как и в [2, 3], лежит определение в процессе измерений, формы линии поглощения, которая зависит от распределения исследуемого газа в верхней атмосфере.

За счет движения спутника изменяется частота отраженного сигнала и таким образом осуществляется плавная частотная «перестройка» системы локационного зондирования, что обеспечивает возможность даже при фиксированной частоте излучения находящегося на Земле передатчика