

Minina Marina Valer'evna

Open Company «Agency on the High Technology and Innovative Technologies».

The Arctic Public Academy of Sciences.

E-mail: m-minina@yandex.ru; selin1@mail.ru.

14-16, Markina Street, Off. 42, S.-Peterburg, 197198, Russia.

Phones: +78122344868; +79216321186; Phone/Fax: +78124984227.

Executive Director; the Scientific Secretary; Cand. of Eng. Sc.

Malik Saad

The Russian State Hydrometeorological University.

E-mail: mr.saad@gmail.com.

3, Metallistov, Avenue, St.-Petersburg, 195196, Russia.

Phone: +79643651396.

The Department of Sea Information Technologies; Post-graduate Student.

Soboleva Kseniya Valer'evna

Leningrad Regional branch VPP "Uniform Russia".

The St.-Petersburg State Electrotechnical University.

E-mail: ksumitko@yandex.ru.

30, Vasi Alexeeva Street, Off. 62, St.-Petersburg, 198188, Russia.

Phones: +78127847518; Fax: +78123719257; +79516654323.

Press-secretary; Post-graduate Student.

УДК 534.29:551.594.25

М.А. Тимошенко

**ДИФфуЗИОННЫЙ ПОТОК ПРИ ОСАЖДЕНИИ НАНОАЭРОЗОЛЕЙ
В ЗВУКОВОМ ПОЛЕ**

Рассматривается диффузия аэрозолей в акустическом поле с целью их осаждения. Получены аналитические выражения для потока наноразмерных частиц через гидродинамический и акустический пограничные слои в зависимости от частоты диффузионного потока через пограничный слой в звуковом поле для разных радиусов частиц. Приводятся трёхмерные нанофотографии исследованных типов табака. В конце работы приведены краткие выводы о поведении диффузионного потока нано- и субмикронных частиц при прохождении их через акустический и гидродинамический пограничные слои.

Диффузия; граничные слои; наночастицы; звуковое поле.

М.А. Timoshenko

**DIFFUSION STREAM AND PRECIPITATION OF NANO AEROSOL
IN THE SHAMP ACOUSTIC**

The aerosol diffusion with the purpose of precipitation is considered in the article. Analytical expressions for a stream nano particles through hydrodynamic and acoustic interfaces depending on frequency of a diffusive stream through an interface in a sound field for different radiuses of particles are received. Are resulted three-dimensional nanofotograph the investigated types of tobacco. In the end of work short conclusions about behavior of a diffusive stream nano- and sub-micronic particles are resulted at their passage through acoustic and hydrodynamic interfaces.

Diffusion; boundary layers; nanoparticales; shamp acoustic.

После подстановки в конечную формулу $P_y(x)$ для диффузионного потока ([1]. С. 139-144) соответствующих выражений [2, 3], для толщин акустического δ_a и гидродинамического δ_h пограничных слоев, коэффициента диффузии D , начального потока $P_0 = n_0 v_0$ и коэффициента $\beta = n_{\text{мол}} / n_0$, где n_0 и $n_{\text{мол}}$ – концентрация наночастиц и газа около источника, получаем расчетные формулы для оценки относи-

тельного изменения осаждаемых диффузионных потоков нано- и субмикронных аэрозолей через гидродинамические пограничные слои соответственно в акустическом поле

$$\frac{\Pi_y(x)}{\Pi_0} = \frac{kT(\rho\omega)^{\frac{1}{2}}(1+\alpha)\beta}{v_0(2\eta)^{\frac{1}{2}}6\pi\eta R\left(1+\frac{3}{16}\text{Re}\right)} \exp\left[-\frac{(\rho\omega)^{\frac{1}{2}}k(1+\alpha)T\beta}{v_0h(2\eta)^{\frac{1}{2}}\left(1+\frac{3}{16}\text{Re}\right)6\pi\eta R}x\right] \quad (1)$$

и в гидродинамическом потоке

$$\frac{\Pi_y(x)}{\Pi_0} = \frac{kT(\rho)^{\frac{1}{2}}(1+\alpha)\beta}{(v_0)^{\frac{1}{2}}(\eta\ell)^{\frac{1}{2}}6\pi\eta R} \exp\left[-\frac{kT(\rho)^{\frac{1}{2}}(1+\alpha)\beta}{(v_0)^{\frac{1}{2}}(\eta\ell)^{\frac{1}{2}}h6\pi\eta R}x\right]. \quad (2)$$

Для удобства наглядного анализа от температуры T , вязкости η и плотности ρ среды, размера частиц R , скорости течения v_0 , числа Рейнольдса Re и поправки Милликена α для аэрозоля, высоты канала h , расстояния x и частоты f звука ($\omega=2\pi f$) сокращения параметров в (1) и (2) не произведены.

Экспоненциальные члены в формулах (1) и (2) можно переписать в виде $\exp(-K_a x)$ и $\exp(-K_e x)$, где K_a и K_e назовем соответственно коэффициентами акустического и гидродинамического осаждения нано- и субмикронных частиц. Из (1) коэффициент акустического осаждения равен

$$K_a = \frac{(\rho\omega)^{\frac{1}{2}}k(1+\alpha)T\beta}{v_0h(2\eta)^{\frac{1}{2}}\left(1+\frac{3}{16}\text{Re}\right)6\pi\eta R}. \quad (3)$$

Из (2) коэффициент гидродинамического осаждения принимает вид

$$K_e = \frac{kT(\rho)^{\frac{1}{2}}(1+\alpha)\beta}{(v_0)^{\frac{1}{2}}(\eta\ell)^{\frac{1}{2}}h6\pi\eta R}. \quad (4)$$

При проектировании технологических аппаратов, использующих осаждение тонкодисперсных промышленных аэрозолей (при нанесении защитных покрытий; осаждение субмикронных частиц технического углерода-, оксидов железа и др. в электрофильтрах, создание новых материалов с покрытиями из наночастиц и др.), надо знать зависимость потока высокоадгезионного аэрозоля через гидродинамический и акустический пограничные слои от основных параметров среды, аэрозоля и акустического поля. Математическая модель, заложенная в формулах (1) и (2), позволяет это сделать.

На рис. 1 представлены расчетные зависимости относительного изменения диффузионных потоков для аэрозольных частиц разных размеров в функции от частоты звука f в точке $x_1=0,15$ м от начала координат. Кривые 1, 2, 3, 4 и 5 соответствуют радиусам частиц R , равным 50, 100, 300, 600 и 900 нм. Температура T в расчетах принята комнатной (20°C) или в градусах Кельвина $T^\circ\text{K}=T^\circ\text{C}+273=293^\circ\text{K}$, как требуется в формуле (1). Скорость аэрозоля в начале канала $v_0 = 1 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. Ширина

канала $h=0,1$ м. Динамическая вязкость воздуха $\eta = 1,8 \cdot 10^{-5} \frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с}}$. Плотность воз-

духа $\rho = 1,2 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$. Приведенные значения параметров примерно соответствуют

условиям проведенного экспериментального исследования диффузионного осаждения потока nano- и субмикронных аэрозольных частиц.

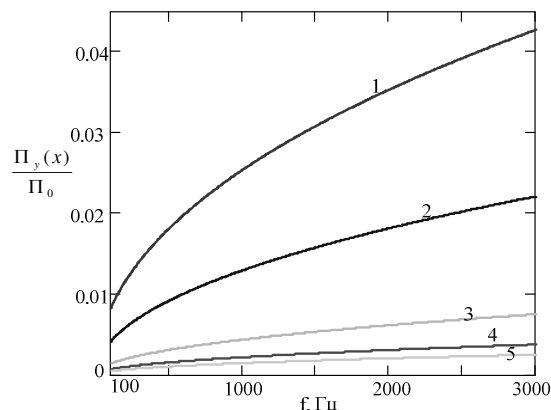


Рис. 1. Изменение от частоты диффузионного потока через пограничный слой в звуковом поле для разных радиусов частиц (кривая 1 – $R=50$ нм; 2 – $R=100$ нм; 3 – $R=300$ нм; 4 – $R=600$ нм и 5 – $R=900$ нм)

Как видно из графиков рис. 1, с увеличением частоты звука диффузионный поток через акустический пограничный слой растет, что связано с уменьшением пограничного слоя δ_a при повышении частоты. Коэффициент K_a акустического осаждения nano- и субмикронных частиц через пограничный слой, как видно из выражения (3), зависит от частоты звука и от размера тонкодисперсных аэрозолей. Частота и размеры частиц действуют в экспоненциальном члене $\exp(-K_a x)$ в формуле (1) разнонаправлено, что видно и из графиков (см. рис. 1). В пределах действия экспоненциального члена в (1) низкочастотная ветвь графиков (см. рис. 1) демонстрирует понижение диффузионного потока частиц через акустический пограничный слой. Из сравнения кривых 1÷5 видно, что с ростом размера частиц диффузионный поток частиц через акустический пограничный слой уменьшается из-за уменьшения коэффициента диффузии (падения их подвижности). Влияние экспоненциального члена в (1) при изменении расстояния x , пройденного частицами разных размеров, обсудим позднее.

Для наглядной связи реальной действительности и расчетных параметров осаждаемого диффузионного потока на рис. 2 представлено экспериментально полученная с одного из сканов с помощью атомно-силовой микроскопии трехмерное изображение аэрозольных наночастиц сигаретного дыма «Malboro». Как видно, частицы имеют разные радиусы. Размеры наиболее многочисленных мелких частиц составляют $20 \div 60$ нм. Эта величина примерно соответствует кривой 1 предыдущего рис. 1. Микрофотографии (см. рис. 2) получены при частоте 930 Гц и уровне звукового давления $p_{зв}=140$ дБ (соответственно $p=200$ Па, амплитуда колебательной скорости $U_0=0,5$ м/с). Масштаб сканированной микрофотографии наночастиц указан на рис. 2. По набору подобных сканов с атомно-силового микроскопа были выполнены измерения распределения всех наблюдаемых частиц по размерам. По этим измерениям построен в вероятностно-логарифмическом масштабе график дисперсного распределения наночастиц дыма сигарет «Malboro». График дисперсного распределения в указанных координатах имеет вид прямой линии, что говорит о гауссовом законе распределения использованных в экспериментах наночастиц аэрозоля сигаретного дыма по размерам [1–3].

В инновационных технологических установках с использованием нано- и субмикронных частиц (по сообщениям из литературы) размеры каналов, где движется осаждаемый аэрозоль небольшие. Поэтому оценим влияние расстояния x в расчетной модели по формуле (1) на осаждение диффузионного потока через акустический пограничный слой. На рис. 3 представлена серия графиков частотной зависимости изменения осаждаемого диффузионного потока через акустический пограничный слой при дискретных расстояниях $x_1=0,15$ м; $x_2=0,35$ м; $x_3=0,55$ м и $x_4=0,65$ м для размеров частиц $R=50$ нм (соответственно кривые 1, 2, 3 и 4) и $R=300$ нм (кривые 5, 6, 7 и 8). Остальные расчетные параметры (T, ν_0, h, η, ρ , диапазон частот) такие же, как для рис. 1.

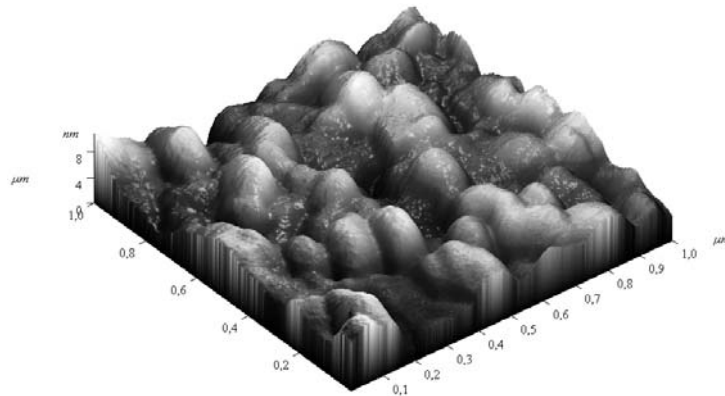


Рис. 2. Трехмерная микрофотография наночастиц сигаретного дыма «Malboro» (частота звука 930 Гц, уровень звукового давления 140 дБ)

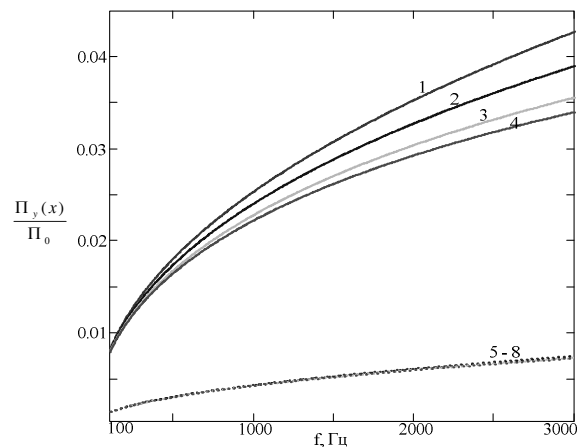


Рис. 3. Изменение от частоты диффузионного потока через акустический пограничный слой для различных расстояний x по каналу (кривые 1, 2, 3 и 4 соответствуют $x_1=0,15$ м; $x_2=0,35$ м; $x_3=0,55$ м и $x_4=0,65$ м при $R=50$ нм; кривые 5, 6, 7 и 8 при $R=300$ нм, x_1, x_2, x_3 и x_4 – те же)

Как видно из графиков, с увеличением расстояния x высокочастотная область графиков заметно спадает. Диффузионный поток через акустический пограничный слой с расстоянием уменьшается, демонстрируя законы сохранения массы (из-за обеднения основного потока). В пределах одного метра падение потока составляет 1,2 раза.

Сравнение диффузионных потоков через акустический пограничный слой между нано- и субмикронными частицами предсказывает заметное увеличение осаждения именно наночастиц (особенно на повышенных частотах). Осаждение в акустическом поле потока наночастиц при некоторых сочетаниях остальных параметров в 5–8 раз превышает соответствующие значения для субмикронных частиц.

Проанализируем по математической модели зависимость осаждаемого в акустическом поле диффузионного потока через пограничный слой при различной температуре T . На рис. 4 представлена серия графиков частотной зависимости изменения в точке $x_1=0,15$ м диффузионного потока через акустический пограничный слой при температуре 20, 100, 200 и 300° С исходного потока аэрозоля (кривые 1, 2, 3 и 4 соответственно). Кривые (см. рис. 4) рассчитаны для аэрозольных частиц $R=50$ нм. Остальные расчетные параметры (диапазон частот, v_0 , h , η , ρ , x_1) такие же, как для рис. 1.

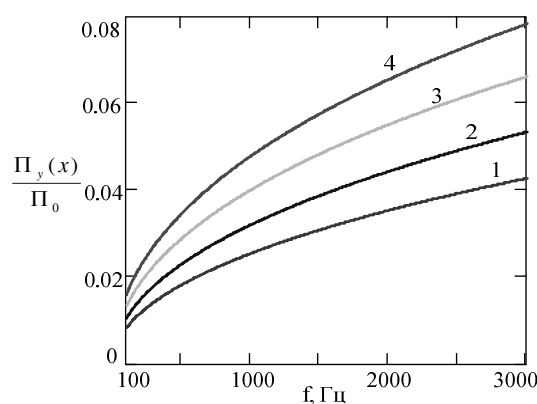


Рис. 4. Частотная зависимость диффузионного потока через акустический пограничный слой для различных температур при $x_1=0,15$ м (для $R=50$ нм кривые 1, 2, 3 и 4 соответственно приведены для температур 20, 100, 200 и 300° С)

Как видно из графиков в акустическом поле с ростом температуры увеличивается диффузионный поток через акустический пограничный слой. Это увеличение связано с ростом коэффициента диффузии D аэрозольных частиц. Из выражения (1) видно, что при изменении температуры среды поток субмикронных аэрозольных частиц через акустический пограничный слой для более крупных частиц субмикронного размера ослабевает по сравнению с аналогичным потоком для наноразмерных частиц промышленных аэрозолей при тех же изменениях температуры среды. Указанные изменения на некоторых частотах могут достигать 5–7 раз.

Как видно из проведенного выше численного анализа математической модели диффузионного потока нано- и субмикронных частиц через акустический и гидродинамический пограничные слои, при проектировании технологических установок с осаждением различных тонкодисперсных промышленных аэрозолей, работающих в условиях разнообразия комбинаций входящих параметров среды, аэрозоля и акустического поля наибольшее влияние оказывают размеры частиц, частота звука, температура и вязкость газовой среды.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тимошенко М.А. Диффузия субмикронных частиц в потоке через гидродинамический и акустический пограничные слои // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2010. – № 9 (110). – С. 139-144.

2. Тимошенко В.И., Чернов Н.Н. Взаимодействие и диффузия частиц в звуковом поле. – Ростов-на-Дону: Ростиздат, 2003. – 304 с.
3. Тимошенко В.И., Чернов Н.Н. Осаждение и осадконакопление промышленных дымов. – Ростов-на-Дону: Ростиздат, 2004. – 224 с.
4. Эберт Г. Справочник по физике. – М.: Физматлит, 1963.

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н. А.И. Жорник.

Тимошенко Мария Алексеевна

Технологический институт федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге.

E-mail: timoshenkomaria@mail.ru.

347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44.

Тел.: 88634371795.

Кафедра электрогидроакустической и медицинской техники; аспирант.

Timoshenko Maria Alexseevna

Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Autonomous Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”.

E-mail: timoshenkomaria@mail.ru.

44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia.

Phone: +78634371795.

The Department of Hydroacoustic and Medical Engineering; Post-graduate Student.