

УДК 534.29:551.594.25

М.А. Лупандина, В.И. Тимошенко, Н.Н. Чернов

**ВЛИЯНИЕ АКУСТИЧЕСКОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ  
НА ОСАЖДЕНИЕ НАНОРАЗМЕРНЫХ АЭРОЗОЛЕЙ\***

*Рассматривается осаждение наноразмерных аэрозолей в потоке через акустический пограничный слой. Приводится микрофотография наноразмерных частиц сигаретного дыма, полученная с помощью атомно-силовой микроскопии. Приведено выражение для оценки относительного изменения диффузионного потока нано- и субмикронных аэрозолей через акустический пограничный слой, по этому выражению проведен анализ в зависимости от различных параметров (температуры, вязкости, плотности среды, скорости, размеров частиц, частоты). В статье представлены графики зависимостей осаждения от некоторых из перечисленных параметров.*

*Акустический пограничный слой; наночастицы; осаждение наноразмерных аэрозолей.*

M.A. Lupandina, V.I. Timoshenko, N.N. Chernov

**THE ACOUSTIC BOUNDARY LAYER EFFECT ON NANOSIZE AEROSOLS  
SEDIMENTATION**

*The sedimentation of nano aerosols in the blast over acoustic boundary layer is considered at article. The tobacco smoke nanoparticles photomicrography taken with atomic-force microscope is adduced. The expression for relative overpatching diffusion flux of nano and submicron aerosols over acoustic boundary layer evaluation is adduced, the analysis on this expression depending on different parameters (temperature, viscosity, density, velocity of field, particles size, frequency) is adduced. The dependence diagrams of sedimentation from some of enumeration parameters are represented at article.*

*The acoustic boundary layer; nanoparticles; sedimentation of nanosize aerosols.*

Биотехнологические процессы (экстракции, очистки, сушки лекарственных препаратов, старения вин и др.) интенсифицируются в акустическом поле, во мно-

гом благодаря уменьшению толщины пограничного слоя ( $\delta_a = \sqrt{\frac{2\eta}{\rho\omega}}$ ), где

$\omega = 2\pi f$ ,  $f$  – частота звука,  $\eta$  и  $\rho$  – сдвиговая вязкость и плотность среды) по сравнению с гидродинамическим и диффузионным слоями [1]. Диффузионный поток  $\Pi_y(x)$  (число частиц в единицу времени на единицу площади), например, наноразмерных частиц никотиновой смолы сигаретного дыма преодолевает тонкий акустический пограничный слой и осажается со звуком значительно интенсивней, чем без звука.

Для наглядности на рис. 1 представлено экспериментально полученное с помощью атомно-силовой микроскопии трехмерное изображение аэрозольных наночастиц сигаретного дыма «Malbo»». Как видно, частицы имеют разные радиусы. Размеры наиболее многочисленных мелких частиц составляют 20÷60 нм. Микрофотография (см. рис. 1) получена при частоте 930 Гц и уровне звукового давления  $p_{зв}=140$  дБ (или соответственно  $p=200$  Па – амплитуда колебательной скорости  $U_0=0,5$  м/с). Масштаб сканированной микрофотографии наночастиц указан на рис. 1. По набору подобных сканов с атомно-силового микроскопа были выполне-

\* Работа выполнена при поддержке Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 гг.» ГК №14.518.11.7068.

ны измерения распределения всех наблюдаемых частиц по размерам. По этим измерениям построен в вероятностно-логарифмическом масштабе график дисперсного распределения наночастиц дыма сигарет «Malboro» [2].

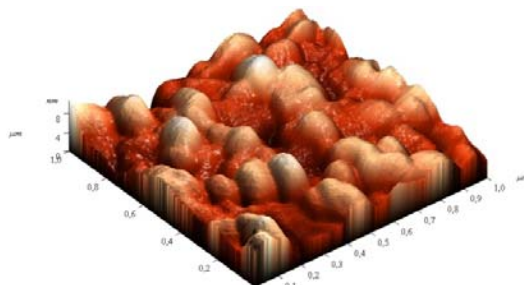


Рис. 1. Трехмерная микрофотография наночастиц сигаретного дыма «Malboro» (частота звука 930 Гц, уровень звукового давления 140 дБ)

Расчет диффузионного потока  $\Pi_y(x)$  наноразмерных аэрозольных частиц через акустический пограничный слой может быть проведен на основе решения диффузионного уравнения для потока в канале шириной  $h$ , для течения пылегазовых частиц с учетом изменения температуры  $T$ , давления  $P$ , скорости  $v$  при наличии пограничного слоя [2].

Созданная математическая модель позволила получить формулу для оценки относительного изменения диффузионного потока нано- и субмикронных аэрозолей через акустический пограничный слой:

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

В инновационных технологических установках (в том числе и биотехнологиях) используются газовые среды с различными параметрами: температуры  $T$ , вязкости  $\eta$ , плотности  $\rho$  и др. Расчетная формула (1) позволяет проанализировать изменение осаждаемого потока нано- и субмикронных частиц через акустический пограничный слой.

Проанализируем по математической модели (1) зависимость осаждаемого в акустическом поле диффузионного потока через пограничный слой при различной температуре  $T$ . На рис. 2 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).

Как видно из графиков, в акустическом поле с ростом температуры увеличивается диффузионный поток через акустический пограничный слой. Это увеличение связано с ростом коэффициента диффузии аэрозольных частиц. Из сравнения результатов, представленных на рис. 2, 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. Из рис. 2 видно, что при повышении температуры влияние экспоненциального члена в формуле (1) растет. Убыль потока осаждаемого через акустический пограничный слой, особенно наноразмерных частиц, на повышенных частотах больше по сравнению с аналогичным процессом для более крупных субмикронных аэрозолей.

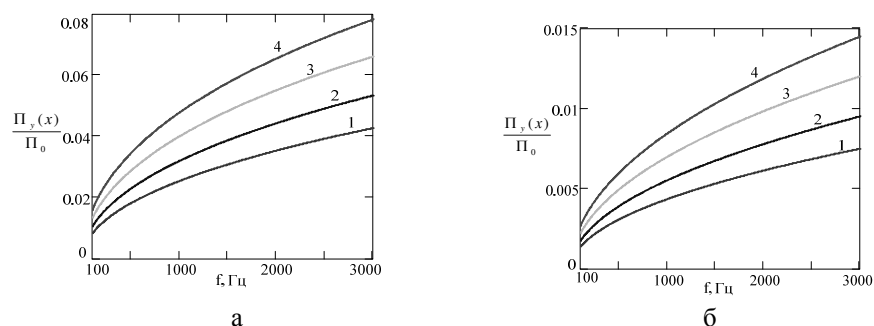


Рис. 2. Частотная зависимость диффузионного потока через акустический пограничный слой для различных температур при  $x_1=0,15$  м (для  $R=50$  нм – а,  $R=300$  нм – б; кривые 1, 2, 3 и 4 соответственно приведены для температур 20, 100, 200 и 300 °С)

Эксперименты по акустическому осаждению нано- и субмикронных аэрозолей были проведены с четырьмя типами сигаретного дыма: «Malboro», «Bond», «Наша Марка» и «Махорка». Лабораторная установка и методика взятия и обработки результатов описаны в [3].

Как видно из рис. 3, в звуковом поле наблюдается спад с увеличением расстояния  $x$  диффузионного потока тонкодисперсного аэрозоля, осажденного через акустический пограничный слой. Толщина  $\delta_a$  акустического пограничного слоя в условиях данного эксперимента меньше миллиметра ( $\delta_a = \sqrt{\frac{2\eta}{\rho\omega}} \approx 7 \cdot 10^{-5}$  м).

Функция спада  $\Pi_y(x)$  в эксперименте близка к экспоненте, что соответствует математической модели по выражению (1), описывающему процесс осаждаемого диффузионного потока тонкодисперсных аэрозольных частиц через акустический пограничный слой. Полученные зависимости коррелируют с расчетными графиками на рис. 2, построенных при параметрах, близких к эксперименту.

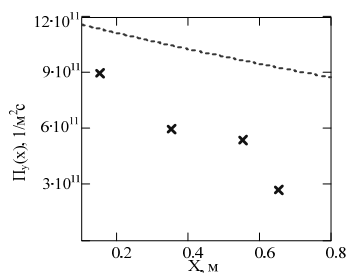


Рис. 3. Изменение осажденного диффузионного потока через акустический пограничный слой частиц дыма сигарет «Malboro» от расстояния  $x$  (крестики – эксперимент, пунктирная линия – теория)

Удовлетворительное совпадение экспериментальных и расчетных результатов для четырех типов осажденных тонкодисперсных аэрозолей позволяет сделать вывод о правильной математической модели диффузионного потока нано- и субмикронных частиц через акустический и гидродинамический пограничные слои.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тимошенко (Лупандина) М.А. Диффузионный поток при осаждении наноаэрозолей в звуковом поле // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2011. – № 9 (122). – С. 206-211.
2. Тимошенко (Лупандина) М.А., Чердиченко Д.И. Исследования влияния чатиц сигаретного дыма на дыхательные пути человека // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2008. – № 5 (82). – С. 221-224.
3. Тимошенко (Лупандина) М.А., Чернов Н.Н. Дисперсное распределение аэрозольных наночастиц сигаретного дыма при курении // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2008. – № 5 (82). – С. 224-226.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.И. Короченцев.

**Лупандина 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, ГСП 17А; тел.: 88634371795; кафедра электрогидроакустической и медицинской техники; к.т.н.

**Тимошенко Владимир Иванович** – e-mail: ega@fep.tti.ru; кафедра электрогидроакустической и медицинской техники; д.т.н.; профессор.

**Чернов Николай Николаевич** – кафедра электрогидроакустической и медицинской техники; д.т.н.; профессор.

**Lupandina Maria Alekseevna** – Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: timoshenkomaria@mail.ru; GSP 17A, 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371795; the department of hydroacoustic and medical engineering; cand. of eng. sc.

**Timoshenko Vladimir Ivanovich** – e-mail: ega@fep.tti.ru; the department of hydroacoustic and medical engineering; dr. of eng. sc.; professor.

**Chernov Nikolay Nikolaevich** – the department of hydroacoustic and medical engineering; dr. of eng. sc.; professor.

УДК 621.396

**Б.А. Сальников, Е.Н. Сальникова**

### СИНТЕЗ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ АНТЕНН С ОГРАНИЧЕННОЙ РЕАКТИВНОСТЬЮ

*Рассмотрен метод решения задач синтеза ультразвуковых антенн с ограниченной реактивностью. Предложено меру реактивности ультразвуковых антенн оценивать с помощью функции локальной добротности и интегральной оценки локальной добротности. Такой подход даёт возможность оптимизировать геометрию излучающих участков на поверхности антенн с учётом ограничений на реактивность и точность реализации заданных диаграмм направленности. Введенные определения энергетической эффективности антенн являются более чувствительными и позволяют осознанно выбирать область расположения излучающих участков при решении задачи синтеза с ограниченной реактивностью, не прибегая к вариационным методам.*

*Синтез антенн; локальная добротность; оптимизационный синтез.*

**B.A. Salmnikov, E.N. Salmnikova**

### SYNTHESIS OF ULTRASONIC ANTENNAS WITH RESTRICTED REACTIVITY

*The method of resolving synthesis tasks of ultrasonic antennas with restricted reactivity is considered. It has been proposed to estimate measure of ultrasonic antennas reactivity using function of local quality factor and integral estimation of local quality factor. Such way of getting es-*