

2. *Воробьёв В.Н., Бескид П.П., Митько В.Б., Татарникова Т.М.* Инновационный подход к образовательным технологиям в области морского приборостроения // Учёные записки РГГМУ. – 2010. – № 12.
3. *Колесниченко В.В., Митько В.Б.* Гидрофизический мониторинг мелководных регионов в целях обеспечения экологической безопасности // Труды ЮФУ. – Таганрог, 2009.
4. *Митько В.Б., Минина М.В.* Эволюция геополитических факторов, определяющих миссию России в Арктике // Труды II Международного конгресса «Глобалистика-2011». – М., 2011.
5. *Ивченко В.В.* Очерки инновационной экономики приморских регионов России. – Калининград, 2006.
6. *Мазур И.И.* Арктика – точка бифуркации в развитии глобального мира // Век глобализации. – 2010. – № 2.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. В.В. Яковлев.

**Воробьёв Владимир Николаевич**

Российский государственный гидрометеорологический университет.

E-mail: vnv@rshu.ru.

195196, Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., 98.

Тел.: +78124440262; факс: +78124446090.

Проректор по науке; к.г.н.; профессор.

**Митько Валерий Брониславович**

E-mail: vmitko@yandex.ru; vmitko@ArcticAS.ru.

198188, Санкт-Петербург, ул. Васи Алексеева, 30, оф. 62.

Тел. +78127847518, факс: +78123719257; +79213944397.

Председатель СПб отделения Секции Геополитики и безопасности РАЕН; Президент Арктической общественной академии наук; д.т.н.; профессор.

**Vorob'yov Vladimir Nikolaevich**

The Russian State Hydrometeorological University.

E-mail: vnv@rshu.ru.

98, Maloohhtinsky Avenue, St.-Petersburg, 195196, Russia.

Phone: +78124440262; Fax: +78124446090.

Prorector on a science; Cand. Of G. Sc.

**Mit'ko Valeriy Bronislavovich**

E-mail: vmitko@yandex.ru; vmitko@ArcticAS.ru.

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

Chairman of SPb of Branch of Section of Geopolitics and Safety of the Russian Academy of Natural Sciences; the President of the Arctic Public Academy of Sciences; Dr. of Eng. Sc.; Professor.

УДК 534.29:551.594.25

**М.А. Тимошенко, Н.Н. Чернов, П.С. Голосов**

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ  
И СРАВНЕНИЕ С ТЕОРИЕЙ ДИФфуЗИОННОГО ПОТОКА  
НАНО- И СУБМИКРОННЫХ ЧАСТИЦ ЧЕРЕЗ АКУСТИЧЕСКИЙ  
И ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ ПОГРАНИЧНЫЕ СЛОИ**

*Рассматриваются результаты экспериментального исследования диффузионного потока в релейской трубе с жёсткими стенками наноразмерных аэрозолей через акустический и гидродинамический пограничные слои при осаждении на ситалловые подложки. Приводятся расчёты диффузионного потока для дымов 3-х типов сигарет: «Malboro», «Наша марка», «Махорка». Для каждого типа сигарет приведены также результаты*

экспериментального расчёта диффузионного потока. Приведены трёхмерные нанофотографии частиц дыма каждого типа табака использованного в эксперименте. Сделаны краткие выводы о результатах работы.

*Диффузия; пограничный слой; наноразмерные аэрозоли; ситаллы; осаждение; атомно-силовой микроскоп.*

**M.A. Timoshenko, N.N. Chernov, P.S. Golosov**

**EXPERIMENTAL RESULTS OF INVESTIGATION AND COMPARRISON WITH THE THEORY DIFFUSION FLUE OF SUBMICRONIC AND NANOPARTICLES THRU ACOUSTIC AND DIFFUSION BOUNDARY LAIR**

*Results of an experimental research of a diffusive stream in Reley pipe with rigid walls nanopartcles aerosols through acoustic and hydrodynamic interfaces are considered at sedimentation on sytall crystals substrates. Calculations of a diffusive stream for smokes 3-x types of cigarettes are resulted: «Malboro», «Nasha Marka », "Makhorka". For each type of cigarettes results of experimental calculation of a diffusive stream are also resulted. Are resulted three-dimensional nanophotos particles of a smoke of each type of tobacco used in experiment. Short conclusions are drawn on results of work.*

*Diffusion; boundary lair; nanoparticles; sytall crystals; sedimentation.*

Экспериментальные исследования осаждения реальных промышленных тонкодисперсных аэрозолей крайне затруднительны [1–4] из-за сложности генерирования (воспроизведения) аэрозольного потока и измерения параметров процесса. Из литературных источников нам не известны исследования диффузионного потока и параметров (размеров, структуры агрегатов и дисперсного состава) аэродисперсной среды, состоящей из различных дымов с нано- и субмикронными частицами. Выполнить измерения с такими аэрозолями стало возможным только благодаря появлению атомно-силовой микроскопии.

В данной статье представлены результаты измерения диффузионного потока через пограничные слои нано- и субмикронных частиц табачного дыма различных сортов сигарет. Из-за высокой подвижности и адгезионной способности нано- и субмикронных частиц табачного дыма их налипание на специально обработанные подложки (для наномикроскопов) в экспериментальной акустической установке позволяет их рассмотреть и подсчитать число частиц, осажденных в единицу времени на единицу площади. А это и есть (по определению) исследуемый диффузионный поток.

Нами обработана микрофотография с одного из сканов наноразмерных аэрозольных частиц табачного дыма сигарет «Malboro», полученная с помощью атомно-силового микроскопа. Проба аэрозоля была взята при диффузионном осаждении на ситаловую подложку в экспериментальной установке при расстоянии  $x_1 = 0,15$  м при комнатной температуре  $T = 20^\circ\text{C}$  и скорости протяжки аэрозоля  $v_0 = 1$  м/с. Звуковое давление было установлено на уровне  $p_{зв} = 140$  дБ (или  $p_{зв} = 200$  Па, амплитуда колебательной скорости  $U_0 = 0,5$  м/с) на частоте  $f = 930$  Гц. Обработка большого числа сканов соответствующей подложки, полученных с помощью атомно-силового микроскопа, позволила получить величину осажденного диффузионного потока наноразмерных частиц через акустический пограничный слой, равную  $\Pi_y(x_1) = 36 \cdot 10^{12}$  1/м<sup>2</sup>с. Таким же образом и при тех же параметрах ( $f, p_{зв}, T, v_0$ ) получены значения осажденного диффузионного потока указанных нано- и субмикронных частиц в точках  $x_2 = 0,35$  м,  $x_3 = 0,55$  м и  $x_4 = 0,65$  м. По результатам эксперимента построен график изменения в акустическом поле осажденного через акустический пограничный слой диффузионного потока тонкодисперсных частиц табачного дыма сигарет марки «Malboro» (рис. 1). Экспериментальные точки на графике отмечены крестиками.

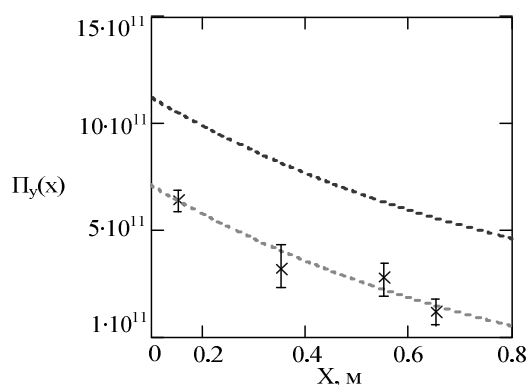


Рис. 1. Изменение осажденного диффузионного потока через акустический пограничный слой частиц дыма сигарет «Malboro» от расстояния  $x$  (крестики – эксперимент, верхняя пунктирная линия – теория)

Как видно из графика, в звуковом поле наблюдается спад с увеличением расстояния  $x$  диффузионного потока тонкодисперсного аэрозоля, осажденного через акустический пограничный слой. Толщина  $\delta_a$  акустического пограничного слоя [4] в условиях данного эксперимента меньше миллиметра  $\left( \delta_a = \sqrt{\frac{2\eta}{\rho\omega}} \approx 7 \cdot 10^{-5} \text{ м} \right)$ .

Функция спада  $P_y(x)$  в эксперименте близка к экспоненте, что соответствует математической модели по выражению из [4], описывающему процесс осаждаемого диффузионного потока тонкодисперсных аэрозольных частиц через акустический пограничный слой. На наноперефотографиях (рис. 1) частиц табачного дыма сигарет марки «Malboro» видны аэрозольные частицы размером от 20 до 200 нм.

На рис. 1 пунктирной линией представлен расчетный график изменения  $P_y(x)$  по математической модели формулы из [2] при  $\beta = 10^4$ . Из сравнения графиков видно удовлетворительное совпадение теории и эксперимента для перечисленных параметров.

Такая же серия экспериментов по осаждению тонкодисперсных аэрозолей через акустический пограничный слой была проведена с аэрозолем табачного дыма сигарет «Наша марка».

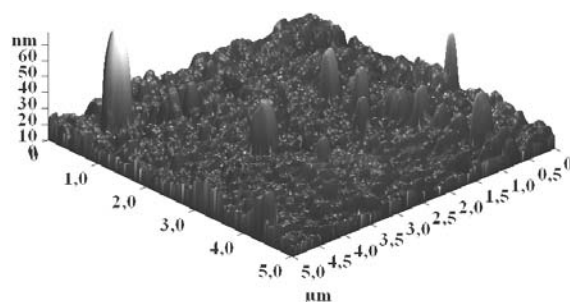


Рис. 2. Трехмерная микрофотография осажденных в звуковом поле нано- и субмикронных частиц дыма сигарет «Наша марка», полученная с помощью атомно-силового микроскопа (частота звука 930 Гц, уровень звукового давления 140 дБ)

Микрофотография одного из сканов с атомно-силового микроскопа приведена на рис. 2. Пробы брались при тех же основных параметрах ( $f, p_{зв}, v_0, x_1, T, p, \rho, \eta$ ), что и в предыдущих экспериментах. На сканах, полученных для дыма сигарет «Наша марка», размеры частиц заметно крупнее по сравнению с аэрозолем сигарет марки «Bond» и, тем более, «Malboro», но все же остаются в пределах всего субмикронного диапазона, встречаются частицы с размерами меньше 100 нм.

Подсчет всех частиц на сканах со всех ситаловых подложек в тех же точках ( $x_1 \div x_4$ ) в этой серии экспериментов позволил построить (см. на рис. 3) график изменения от расстояния  $x$  диффузионного потока в звуковом поле через акустический пограничный слой субмикронных аэрозольных частиц дыма сигарет «Махорка». На графике рис. 3 экспериментальные результаты отмечены крестиками. Из графика (см. рис. 3) виден экспоненциальный спад потока осажденных частиц. Из сравнения (см. рис. 3) с предыдущими результатами (см. рис. 3) видно, что численные значения осажденного диффузионного потока через акустический пограничный слой у дыма сигарет «Наша марка» меньше, чем у дыма сигарет «Bond», тем более, «Malboro» (см. рис. 1). Эти экспериментальные результаты коррелируются с расчетными графиками по математической модели. Сравнение пунктирного расчетного графика рис. 3 с экспериментальным показывает, что экспериментальная кривая (нижняя) попадает в доверительный интервал.

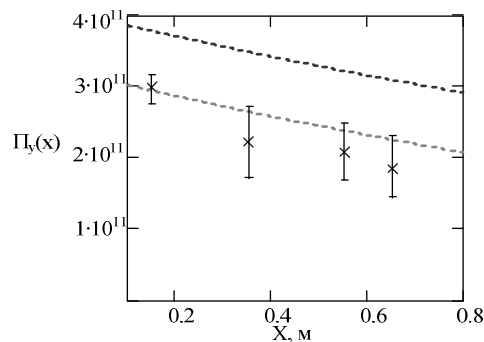


Рис. 3. Изменение осажденного в звуковом поле потока через акустический пограничный слой частиц дыма сигарет «Наша марка» от расстояния  $x$  (крестики – эксперимент, верхняя пунктирная линия – теория)

Самые крупные частицы табачного дыма зафиксированы нами в экспериментах с дымом махорки. На рис. 3 приведена микрофотография одного из сканов с атомно-силового микроскопа при воздействии звукового поля на поток аэрозоля дыма махорки. Остальные параметры ( $f, p_{зв}, v_0, x_1, T, p, \rho, \eta$ ) такие же, как в предыдущих экспериментах. На представленном рис. 4 и на других сканах из этой серии экспериментов (см. разд. 4) видно, что размеры аэрозольных частиц дыма махорки самые большие среди всех четырех сортов сигарет. Масштаб размеров виден на нанофотографии. И все-таки, размеры на рис. 4 остаются в районе субмикронных.

На рис. 5 показаны экспериментально полученные графики изменения в звуковом поле с расстоянием  $x$  диффузионного потока аэрозоля дыма махорки. Экспериментально зафиксированные на разных ситаловых подложках и сосчитанные со всех сканов частицы позволили оценить поток осажденных через акустический пограничный слой субмикронных частиц. Крестиками на рис. 5 отмечены экспериментальные результаты численных величин потока. Также наблюдается экспоненциальная зависимость уменьшения с ростом  $x$  потока осажденных в звуковом поле через акустический пограничный слой. Эта экспериментальная зависимость удовлетворительно совпадает с теоретическими расчетами (пунктирная линия на рис. 5).

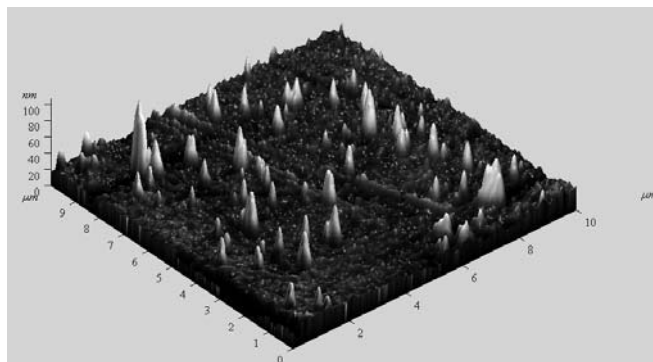


Рис. 4. Трехмерное изображение осажденных в звуковом поле нано- и субмикронных частиц дыма махорки, полученное с помощью атомно-силового микроскопа (частота звука 930 Гц, уровень звукового давления 140 дБ)

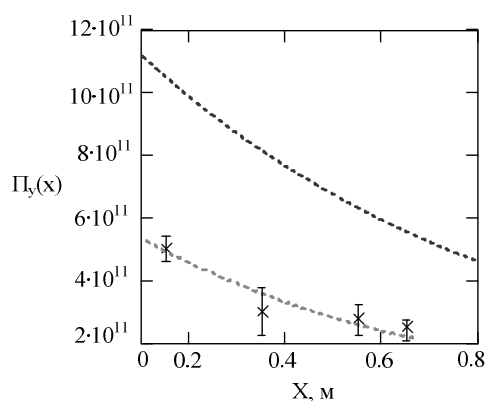


Рис. 5. Изменение осажденного в звуковом поле потока через акустический пограничный слой частиц дыма сигарет марки махорки от расстояния  $x$  (крестики – эксперимент, верхняя пунктирная линия – теория)

Экспериментальные исследования диффузионного потока нано- и субмикронных аэрозолей через гидродинамический пограничный слой для тех же четырех типов сигаретного дыма были проведены без воздействия акустического поля. Основные параметры при экспериментах ( $v_0$ ,  $x$ ,  $T$ ,  $p$ ,  $\rho$ ,  $\eta$ ) те же, что и в предыдущих экспериментах (только без звукового поля). Осажденный диффузионный поток через гидродинамический пограничный слой для сигаретного дыма с меньшими частицами выше, по сравнению с дымом более простых сигарет. Экспериментальная зависимость осажденного потока от расстояния  $x$  также выдерживается, что соответствует математической модели для осаждения через гидродинамический пограничный слой. Из экспериментальных данных следует, что осажденный диффузионный поток через гидродинамический пограничный слой существенно меньше по сравнению с соответствующим осаждением в звуковом поле диффузионного потока нано- и субмикронных частиц через акустический пограничный слой.

В завершение следует сказать об изменении осажденного диффузионного потока нано- и субмикронных частиц через акустический и гидродинамический пограничные слои не только в функции от расстояния  $x$ , но и от времени  $t$ . Для более крупных промышленных аэрозолей микронного размера [1, 4] кинетика (макропро-

цесс) изменения в акустическом поле счетной концентрации осажденных частиц теоретически и особенно широко экспериментально исследовалась в функции от времени  $t$ . В наших экспериментах диффузионного осаждения нано- и субмикронных частиц через пограничные слои явно было замечено с самого начала изменение количества осажденных на силовую подложку частиц не только в функции от расстояния в точках ( $x_1 \div x_4$ ), но и от времени  $t$ . Так, если брали время экспозиции больше 1 с (например, 2 с или тем более 3 с), то на сканах при атомно-силовой микроскопии число осажденных частиц было столь велико, что они заслоняли друг друга, хаотично громоздились и слипались. В таких случаях подсчитать число осажденных частиц на сканах (а, следовательно, и поток) было невозможно.

В экспериментах время  $t$  явно влияло на функцию осажденного диффузионного потока через акустический и гидродинамический пограничные слои. Кстати, в математической модели [2] диффузионного потока нано- и субмикронных частиц через акустический и гидродинамический пограничные слои. В аргументах экспоненты легко ввести время  $t$ , поделив расстояние  $x$  на скорость  $v_0$ . Формулы в этом случае приобрели бы традиционный (для акустической коагуляции и осаждения микронных промышленных аэрозолей) вид [1, 4]. Но экспериментально исследовать процесс диффузионного осаждения нано- и субмикронных частиц подсчетом по сканам функции от времени не представляется возможным или очень затруднительно.

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 В.И., Чернов Н.Н. Осаждение и осадконакопление промышленных дымов. – Ростов-на-Дону: Ростиздат, 2004. – 224 с.
2. Тимошенко М.А. Диффузия субмикронных частиц в потоке через гидродинамический и акустический пограничные слои // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2010. – № 9 (110). – С. 139-144.
3. Тимошенко М.А., Чернов Н.Н. Модель осаждения частиц сигаретного дыма на поверхность в звуковом поле с учетом квазистационарности среды // Нелинейные акустические системы. Сборник статей, май, 2008. – Ростов-на-Дону: ЗАО «Ростиздат», 2008. – С. 206-213.
4. Тимошенко В.И., Чернов Н.Н. Взаимодействие и диффузия частиц в звуковом поле. – Ростов-на-Дону: Ростиздат, 2003. – 304 с.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. Я.Е. Ромм.

#### **Чернов Николай Николаевич**

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

E-mail: nik-chernov@yandex.ru.

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

Тел.: 88634371795.

Кафедра электрогидроакустической и медицинской техники; д.т.н.; профессор.

#### **Тимошенко Мария Алексеевна**

E-mail: timoshenkomaria@mail.ru.

Кафедра электрогидроакустической и медицинской техники; аспирант.

#### **Голосов Петр Сергеевич**

E-mail: Golemstone@mail.ru.

347922, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2, корп. Е.

Тел.: +79518256497.

Кафедра электрогидроакустической и медицинской техники; магистрант.

**Chernov Nikolay Nikolaevich**

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

E-mail: nik-chernov@yandex.ru.

44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia.

Phone: +78634371795.

The Department of Hydroacoustic and Medical Engineering; Dr. of Eng. Sc.; Professor.

**Timoshenko Maria Alexeevna**

E-mail: timoshenkomaria@mail.ru.

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

**Golosov Peter Sergeevich**

E-mail: Golemstone@mail.ru.

2, Shevchenko Street, Building E, Taganrog, 374922, Russia.

Phone: +79518256497.

The Department of Hydroacoustic and Medical Engineering; Undergraduate Student.

УДК534:535

**Г.Ю. Джуплина, В.А. Закарян, Г.В. Калашников, А.В. Саенко, И.Б. Старченко**

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОПТОАКУСТИЧЕСКОГО  
ЭФФЕКТА В МОДЕЛЬНЫХ СУСПЕНЗИЯХ НАНОТРУБОК  
И НАНОВОЛОКОН С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНФРАКРАСНОГО ЛАЗЕРА\***

*Разработана экспериментальная установка по исследованию оптоакустического эффекта в жидких средах в присутствии нанотрубок и нановолокон. Установка включает две части: источник лазерного излучения и приемный акустический тракт. Подготовлены модельные жидкие среды в виде суспензий наночастиц в 2 %, 5 %, 10 % и 15 % желатине. Проанализированы источники шума, которые следует учитывать при обработке сигналов. Проведен анализ базы записей оптоакустических сигналов, выявлено возрастание амплитуды основной гармоники сигнала в присутствии углеродных наночастиц в 1,5–2 раза.*

*Оптоакустический эффект; нанотрубки; нановолокна; лазер.*

**G.Yu. Dzhuplina, V.A. Zakaryan, G.V. Kalashnikov, A.V. Saenko,  
I.B. Starchenko**

**EXPERIMENTAL STUDY OF THE OPTOACOUSTIC EFFECT IN THE  
MODEL NANOTUBES AND NANOFIBERS SUSPENSIONS WITH INFRARED  
LASER**

*An experimental assembly for studying of photoacoustic effect in liquids in the presence of nanotubes and nanofibers was developed. Assembly consists of two parts: the laser light source and receiving acoustic path. Model fluids were prepared as suspensions of nanoparticles in 2 %, 5 %, 10 % and 15 % gelatin. The sources of noise that should be considered in signal processing were analyzed. An analysis of database records of optoacoustic signals showed an increase of the amplitude of the main harmonic signal in the presence of carbon nanoparticles in the 1,5–2 times.*

*Optoacoustice ffect; nanotubes; nanofibers; laser.*

Теоретические исследования формирования оптоакустических полей при облучении лазером жидких сред и рассеяния оптоакустических импульсов на бактериальных частицах были проведены в [1]. В [2, 3] было показано, что увеличение

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (ГК № 14.740.11.0452).