

**Ivanov Alexei Nikolayevich** – PJSC “TAGMET”; e-mail: al\_013@mail.ru; 3, Kuznechnaya street, ap. 13, Taganrog, Russia; phone: +79054568876, +79515368406; engineer.

**Timoshenko Vladimir Ivanovich** – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: ega@tgn.sfedu.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371795; the department of hydroacoustic and medical engineering; dr. of eng. sc.; professor.

УДК 534.29: 551.594.25

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

### **МАКРОПРОЦЕСС АКУСТИЧЕСКОГО ОСАЖДЕНИЯ ТОНКОДИСПЕРСНЫХ ДЫМОВ**

*Рассматриваются закономерности макропроцесса (кинетики) акустической коагуляции и осаждения высокодисперсных аэрозолей в акустическом поле. Теоретически и экспериментально показано, что под действием мощного акустического поля происходит экспоненциальное изменение счётной концентрации мелкодисперсных частиц промышленных дымов. Приведено экспериментально полученное уравнение для возгонного дыма металлургического производства. Показано, что акустическое осаждение дыма зависит от сочетания параметров: интенсивности звука, концентрации аэрозоля, времени озвучивания и температуры пылегазового потока.*

*Получено решение уравнения для изменения осаждаемого диффузионного потока наночастиц через акустический и гидродинамический пограничные слои. Показано, что акустическое поле интенсифицирует процесс осаждения наноразмерных аэрозолей.*

*Акустическая коагуляция; осаждение дымов; аэрозольные частицы; пограничные слои; диффузия.*

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

### **MACROPROCESS ACOUSTIC PRECIPITATION FINE FUMES**

*The patterns of macro-process (kinetics) of acoustic coagulation of the fine aerosols in an acoustic field are considered of flow fields of industrial aerosols in an acoustic field to their intensive coagulation is shown. Exponential change in number density of particles of industrial fumes occurring under the influence of a powerful acoustic field is shown theoretically and experimentally. Experimentally driven regression equation for smoke of steel production is given. Acoustic deposition of smoke depends on a combination of various parameters such as sound intensity, concentration of aerosol time scoring, temperature dust and gas flow.*

*The solution for changing the deposition of the diffusion flux of nanoparticles through the acoustic and hydrodynamic boundary layers is obtained. An acoustic field intensifies the process of deposition of nanoscale aerosols.*

*Acoustic coagulation; sedimentation fumes; aerosol particles; boundary layers; diffusion.*

Экспериментальные исследования макропроцесса (кинетики) акустической коагуляции и осаждения были проведены нами с различными промышленными аэрозолями (около полутора десятков видов) [1, 2, 3]. Везде подтверждалась модель экспоненциального изменения во времени счётной концентрации  $N$  частиц. Например, для возгонных аэрозолей конвертерного производства стали с аэрозольными частицами, медианный размер которых по счёту составлял 0,2 мкм, методом регрессионного анализа получено экспериментальное уравнение кинетики процесса акустической коагуляции в виде

$$\frac{N}{N_0} = \exp(-1,04 - 0,098c_g + 0,007c_g^2 + 0,0045c_g f - 0,056c_g T_{036} - 0,0077T f - 0,026f T_{036} + 0,098T_{036}^2). \quad (1)$$

Из уравнения регрессии видно, что процесс акустической коагуляции зависит от основных параметров звукового поля и пылегазового потока: интенсивности  $I$  и частоты  $f$  звука, весовой концентрации  $c_s$  и температуры  $T$  аэрозоля, а также времени озвучивания  $T_{озв}$ . Влияние оказывает не только тот или иной параметр, но и их совокупность. Рассчитанный коэффициент множественной корреляции равен 0,91 с достоверностью 99 %. При получении уравнения (1) использован метод отсева несущественных факторов. На очереди исследования для получения подобного уравнения регрессии для наночастиц.

На основе опыта акустического осаждения промышленных аэрозолей [1, 2] мы знаем, что при проектировании технологических аппаратов, использующих осаждение наноразмерных аэрозолей в потоке при интенсифицирующем воздействии звука (при нанесении защитных покрытий, создании новых материалов с наночастицами, протекции осаждения на лопатки турбин и на корпуса быстро движущихся аппаратов и др.), надо знать зависимость потока  $\Pi$  высокоадгезионного аэрозоля через гидродинамический  $\delta_r$  и акустический  $\delta_a$  пограничные слои от основных параметров среды (плотности  $\rho$ , кинематической вязкости  $\nu = \frac{\rho}{\eta}$ , температуры  $T$ ), аэрозолей и акустического поля.

Наноразмерные частицы (особенно никотина табачного дыма) обладают высокой адгезионной способностью. Поэтому, пройдя пограничные слои, они осаждаются на поверхности. Отсюда была сформулирована [4] задача математического моделирования (на базе первого уравнения Фика) диффузионного потока  $\Pi_x$ ,  $\Pi_y$  наночастиц через пограничные слои (рис. 1) применительно к технологическим аппаратам для осаждения тонкодисперсных аэрозолей. Осаждение аэрозолей таким же образом происходит на поверхности (лопатки турбин, корпуса летательных и быстро движущихся аппаратов через гидродинамический

$$\delta_r = \sqrt{\frac{l^2}{Re}} = \sqrt{\frac{\nu l}{V_0}} \quad (2)$$

или акустический

$$\delta_a = \sqrt{\frac{2\nu}{\omega}} \quad (3)$$

пограничные слои, где  $V_0$  – начальная скорость потока,  $\omega = 2\pi f$  – круговая частота звука,  $l$  – характерный размер течения,  $Re$  – число Рейнольдса (для частицы в акустическом поле [1] вместо  $V_0$  должна стоять скорость обтекания, а характерный размер равен диаметру).

Решается уравнение непрерывности для стационарного ( $\frac{\partial \Pi}{\partial t} = 0$ ) потока в виде

$$\frac{\partial \Pi_x}{\partial x} + \frac{\partial \Pi_y}{\partial y} = 0 \quad (4)$$

где диффузионный поток  $\Pi_y(x)$  через соответствующий пограничный слой (рис. 1) на стенку равен

$$\Pi_y(x) = -D \frac{\partial N(x,y)}{\partial y} \quad (5)$$

Как видно из (5), основной причиной увеличения осаждаемого диффузионного потока наночастиц  $\Pi_y$  при озвучивании является рост градиента счётной концентрации  $\frac{\partial N(x,y)}{\partial y}$  за счёт резкого уменьшения толщины акустического  $\delta_a$  пограничного (3) слоя (по сравнению с гидродинамическим  $\delta_r$  при отключении звука), а также рост коэффициента  $D_a$  диффузии для наночастиц (по сравнению с микронными аэрозолями) [1].

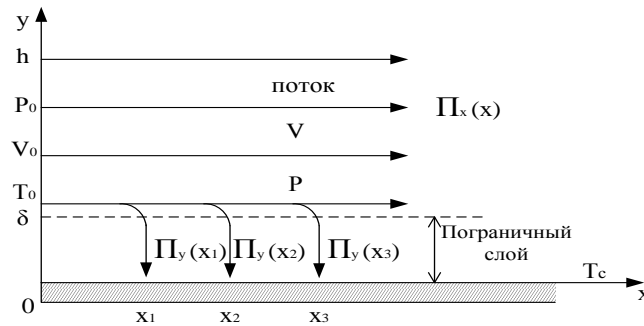


Рис. 1. Ответвление диффузионного потока через пограничный слой

В работе [4] учтено изменение давления  $p_0$ , температуры  $T_0$ , скорости  $V_0$  от изменения толщины пограничного слоя. В итоге получено дифференциальное уравнение для потока  $\Pi_y(x)$  в виде

$$\frac{d\Pi_y(x)}{dx} + \Pi_y(x) \frac{DT_c}{\delta V_0 h T_0} = 0, \quad (6)$$

где  $T_c$  – температура стенки,  $T_0$  – температура в потоке.

Решение уравнения (6) дало выражения для оценки относительного изменения осаждаемых потоков нано- и субмикронных аэрозолей через пограничные слои  $\delta_a$  и  $\delta_r$ , соответственно, в акустическом поле:

$$\frac{\Pi_y(x)}{\Pi_0} = \frac{kT(p\omega)^{\frac{1}{2}}(1+\alpha)\beta}{V_0(2\eta)^{\frac{1}{2}}6\pi\eta R(1+\frac{3}{16}Re)} \exp \left[ -\frac{(p\omega)^{\frac{1}{2}}k(1+\alpha)T\beta}{V_0 h(2\eta)^{\frac{1}{2}}(1+\frac{3}{16}Re)6\pi\eta R} x \right] \quad (7)$$

и в гидродинамическом потоке:

$$\frac{\Pi_y(x)}{\Pi_0} = \frac{kT(p)^{\frac{1}{2}}(1+\alpha)\beta}{(V_0)^{\frac{1}{2}}(\eta l)^{\frac{1}{2}}6\pi\eta R} \exp \left[ -\frac{kT(p)^{\frac{1}{2}}(1+\alpha)\beta}{(V_0)^{\frac{1}{2}}(\eta l)^{\frac{1}{2}}h6\pi\eta R} x \right], \quad (8)$$

где  $k$  – постоянная Больцмана;  $(1+\alpha)$  – поправка Хенингема – Милликена в коэффициенте диффузии [1].

Математическая модель, заложенная в формулах (7) и (8), позволяет рассчитать осаждаемый диффузионный поток наноразмерных частиц при варьировании параметров аэрозоля (радиуса частиц  $R$ , коэффициента диффузии  $D$ , скорости потока  $V_0$ ), среды (вязкости  $\eta$  и  $\nu$ , плотности  $\rho$ , температуры  $T$ ), акустического поля (частоты  $f$ , амплитуды колебательной скорости) и размеров канала  $h$ .

В опубликованных работах [4] показаны результаты расчётов и экспериментов с четырьмя типами аэрозолей. Оценено интенсифицирующее действие акустического поля. Осаждение в акустическом поле потока наночастиц при некоторых сочетаниях параметров в 5–8 раз превышает соответствующие значения для субмикронных частиц. На рис. 2 приведено изменение осаждаемого диффузионного потока через акустический пограничный слой частиц дыма сигарет «Malboro» от расстояния  $x$ .

Удовлетворительное совпадение экспериментальных и расчетных результатов для четырех типов осаждаемых тонкодисперсных аэрозолей позволяет сделать вывод о правильной математической модели диффузионного потока нано- и субмикронных частиц через акустический и гидродинамический пограничные слои. Экспериментально можно дополнительно оценить влияние акустических течений (рэлеевских и шлихтинговских [2] с учётом их пороговости) на величину осаждаемого потока наночастиц.

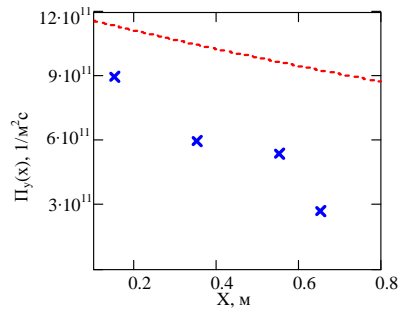


Рис. 2. Изменение осаждаемого диффузионного потока через акустический пограничный слой частиц дыма сигарет “Malboro” (крестики – эксперимент, пунктирная линия – теория)

Приведённая математическая модель имеет отношение к загрязнению дыхательных путей у курильщиков (активных и пассивных). В частности, из (8) следует, что у ребёнка, как у пассивного курильщика, осаждение диффузионного потока никотина пропорционально выше, чем у взрослого человека, так как ширина канала  $h$  находится в знаменателе.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тимошенко В.И., Чернов Н.Н. Взаимодействие и диффузия частиц в звуковом поле. – Ростов-на-Дону: Ростиздат, 2003. – 304 с.
2. Тимошенко В.И., Чернов Н.Н. Осаждение и осадконакопление промышленных дымов. – Ростов-на-Дону: Ростиздат. – 224 с.
3. Timoshenko V., Belenkij V. and Fedoruk T. Kinetics of sonic coagulation and precipitation of high disperse aerosols // Ultrasonics. – 1976. – Vol. 14, № 5. – P. 218-222.
4. Лупандина М.А. Осаждение нано- и субмикронных частиц при интенсификации технологических процессов в мощном акустическом поле: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Таганрог, 2012. – 23 с.

Статью рекомендовал к опубликованию д.м.н., профессор В.Н. Чернов.

**Тимошенко Владимир Иванович** – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет»; e-mail: ega@fer.tti.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634371795; кафедра электрогидроакустической и медицинской техники, д.т.н.; профессор.

**Чернов Николай Николаевич** – e-mail: nik-chernov@yandex.ru; кафедра электрогидроакустической и медицинской техники; д.т.н.; профессор.

**Лупандина Мария Алексеевна** – e-mail: timoshenkomaria@mail.ru.

**Timoshenko Vladimir Ivanovich** – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: ega@tgn.sfedu.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371795; the department of hydroacoustic and medical engineering; dr. of eng. sc.; professor.

**Chernov Nikolay Nikolaevich** – e-mail: nik-chernov@yandex.ru; the department of hydroacoustic and medical engineering; dr. of eng. sc.; professor.

**Lupandina Maria Alekseevna** – e-mail: timoshenkomaria@mail.ru.