

В. И. Тимошенко, Н. Н. Чернов

ВОЗДЕЙСТВИЕ МОЩНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

Рассматриваются физические основы проявления и использования нелинейных акустических эффектов в инновационных технологических процессах с тепло- и массопереносом в экологии и биомедицине.

Акустические волны; инновационные технологии; технологические процессы; экология; биомедицина; нелинейные акустические эффекты.

V.I. Timoshenko, N.N. Chernov

INFLUENCE OF POWERFUL ACOUSTIC WAVES ON ENGINEERING PROCESS

The basic physics of nonlinear acoustic effects display & use at innovation engineering process with heat & mass transmission in ecology & biomedicine are considered.

Acoustic waves; innovation technologies; engineering process; ecology; biomedicine; nonlinear acoustic effects.

В работах кафедры электрогидроакустической и медицинской техники ТТИ ЮФУ (ТРТИ, ТРТУ) за последние 45 лет в области нелинейной акустики, важное место занимали фундаментальные аспекты воздействия мощных акустических волн на технологические процессы в жидких и газообразных средах. Нами физически обоснованы и реализованы технологии интенсификации процессов тепло- и массопереноса, а также диффузии, гидродинамического взаимодействия, коагуляции и осаждения различных промышленных аэрозолей (дымов) в мощном звуковом поле.

В мощном звуковом поле помимо колебательного движения возникает направленное движение среды, так называемые акустические течения. Впервые их наблюдал в 1831 году Фарадей над колеблющейся мембраной. Поясню механизм возникновения течения. Пусть в газе или в жидкости на некотором расстоянии L происходит перепад средней плотности акустической энергии из-за вязкого поглощения звука. Этот перепад равен изменению радиационного давления ΔP на расстояние L . От этого перепада радиационного давления возникает сила, толкающая массу жидкости или газа в направлении убыли энергии. Точно так же радиационное давление света толкает хвосты комет в сторону от солнца. Несколько лет назад все мы наблюдали комету Галлея после сумерек. Направленные массы в акустическом поле – это и есть акустическое течение (или звуковой ветер). Можно то же самое объяснить вязкими потерями импульса. Стационарные вихревые потоки возникают [1] в мощном акустическом поле в свободном пространстве (экартовские течения), в стоячей волне (рэлеевские течения) и в акустическом пограничном слое (шлихтинговские течения). Нам довелось довольно много заниматься этим интересным нелинейным явлением. Кстати, общее уравнение акустических течений получается из гидродинамических уравнений движения и непрерывности с добавлением уравнения потока массы. В книге «Нелинейная акустика» (авторы Л.К.Зарембо и В.И.Тимошенко, М., МГУ, 1984 г.) глава об аку-

стических течениях написана, в основном, в Таганроге. Наш интерес к акустическим течениям, особенно, к мелкомасштабным вихрям в пограничном слое около препятствий, был вызван интенсифицирующим действием этих вихревых потоков на процессы тепло- и массопереноса, а, следовательно, на все технологические процессы: ультразвуковая очистка, сушка, ускорение горения, экстракция, эмульгирование, травление, пропитка, гальванические покрытия и многие другие.

Нам удалось теоретически описать характер акустических течений в пограничном слое для эллиптического цилиндра (рис. 1). Ранее были известны решения для кругового цилиндра. Самыми результативными (и трудными) были наши обширные эксперименты (см. рис. 2) по наблюдению характера акустических течений при изменении амплитуды колебаний и частоты на 3 порядка (в 1000 раз). Для этого в жидкость или газ мы вводили легкие частицы, которые полностью увлекались течением; они подсвечивались стробоскопически. По длине треков мы судили о скорости течений. На рис. 3 представлена полученная нами экспериментально диаграмма трансформации акустических течений, возникающих вблизи кругового

цилиндра радиуса a в зависимости от числа Рейнольдса $Re = \frac{m_n}{m_\eta} \approx \frac{\rho_o V'_{\max} \alpha}{\eta}$ и

относительной амплитуды колебательного смещения ξ/a . Представьте себе, в каждом квадранте в тончайшем пограничном слое около поверхности препятствия в разные стороны крутятся вихри мелкомасштабных акустических течений (шлихтинговских), обеспечивая смену вещества или перенос тепла. Эти вихри к тому же перемещаются в пространстве, следуя фазе акустического поля. В следующий полупериод направление вращений вихрей меняется на противоположное. В силу нелинейности акустические течения имеют пороговый и гистерезисный характер. На диаграмме рис. 3: 1 – граница перехода течений области I в течения области II; 2 – нижняя граница исчезновения течения области II; 3 – верхняя граница появления течения области II; 4 – граница перехода течений области II в течение области III. Заштрихованы области значений ξ и Re , где справедливы теоретические решения задачи об акустических течениях соответственно при малых и больших Re . Эта диаграмма позволяет предсказывать характер акустических течений.

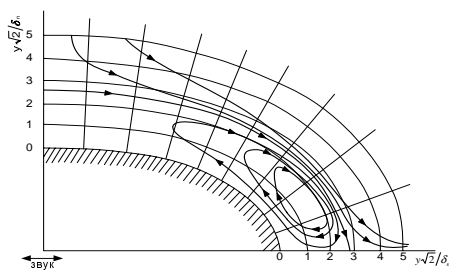


Рис. 1. Линии тока акустических течений около эллиптического цилиндра в звуковом поле

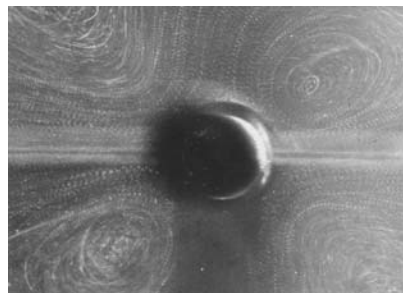


Рис. 2. Фотография акустических течений около кругового цилиндра

Нами обнаружены в области III быстрые отрывные течения, которые еще мало изучены. Трудная, но интересная тема для кандидатской диссертации. Вернемся к области течений I и II. Толщина акустического пограничного слоя $\delta = \sqrt{2\nu/\omega}$

меньше гидродинамического пограничного слоя и много меньше толщины диффузного слоя. Через тонкий пограничный слой в акустическом поле значительно более интенсивно проходят процессы диффузии тепла и массы. Вот почему ультразвук интенсифицирует практически все технологические процессы.

В нашей книге к 40-летию кафедры «Судьбу сотворившие» (2002 г., Ростиздат) по годам приведены выполненные сотрудниками хоздоговорные работы по созданию, исследованию и внедрению на предприятиях установок интенсификации с помощью ультразвука: дублирования кож, бактерицидной обработки пивной тары, увеличения стойкости пива, эмульгирования водомасляных и строительных растворов, экстракции облепихового масла из жома, коагуляции и осаждения тонкодисперсных аэрозолей, сушки зефира, распыления лекарств и др. Одна из последних работ под руководством профессора Чернова Н.Н. – тепловое разрушение (гипертермия) локальных раковых новообразований за счет поглощения сфокусированного ультразвукового пучка (частота 2,5 МГц, длительность $\tau = 0,5$ мкс, интенсивность $J = 10 \div 1000$ Вт/см², диаметр пятна – 2,5 мм, диаметр мозаичного преобразователя 25 см).

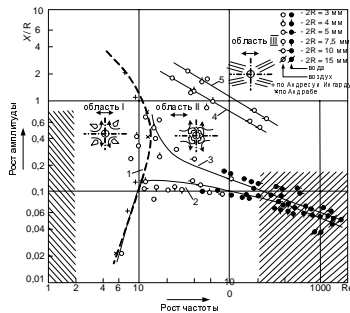


Рис. 3. Диаграмма трансформации акустических течений вблизи кругового цилиндра

вых давлений порядка 145 дБ образуются агрегаты из десятков, сотен и даже тысяч первоначальных частиц. Нами изучены микро- и макропроцессы акустической коагуляции. Разработана теория гидродинамического взаимодействия аэрозольных частиц от влияния гидродинамических полей при вязких режимах обтекания (стоксовском и осеевском). Экспериментально изучена кинетика процесса акустической коагуляции и осаждения 16-ти типов промышленных аэрозолей: дымы ТЭЦ, угольная пыль, оксиды железа, технический углерод (сажа), окиси цинка (белила), фталевый ангидрид (для лакокраски) и др.

При расчетах изменения счетной концентрации субмикронных аэрозольных частиц в звуковом поле по уравнению диффузии нами используется (см. слайд 9)

коэффициент диффузии в виде $D_{ак} = \frac{kT(1+\alpha)}{6\pi\eta R} \left(1 + \frac{3}{16} Re\right)^{-1}$, где k – постоянная

Больцмана. Эта полученная мной формула отличается от известной энштейновской наличием двух множителей в скобках. Первый из них $(1+\alpha)$ учитывает изменение подвижности частиц из-за прерывистости среды для частиц с радиусом менее 1 мкм (поправка Милликена). Вторая скобка учитывает изменение силы сопротивления аэрозольной частицы в мощном звуковом поле при явной несимметрии осеевского обтекания при $Re > 1$ и размерах частиц более 2 мкм. Эти резуль-

Значительный цикл исследований и работ по внедрению новых технологий нелинейной акустики был посвящен акустической коагуляции и осаждению тонкодисперсных промышленных аэрозолей (дымов и туманов). Для иллюстрации на рис. 4 представлены микрофотографии с электронного микроскопа укрупнившихся субмикронных аэрозольных частиц оксидов железа конвертерного производства стали. Их медианный размер меньше длины световой волны. Видно, что за время порядка 2,5 секунд в мощном звуковом поле частотой 400 Гц при уровне звуковых

таты опубликованы мною в Акустическом журнале АН СССР и в Докладах Парижской Академии наук по представлению академика Р.Люка. Того самого Люка, который с П. Бикаром открыл дифракцию света на ультразвуке, то есть открыл взаимодействие фотонов и фононов. Это нелинейное явление используется профессором В.В. Роздобудько и его коллегами на нашем факультете в блестящей работе по созданию уникальных акусто-оптических приборов.

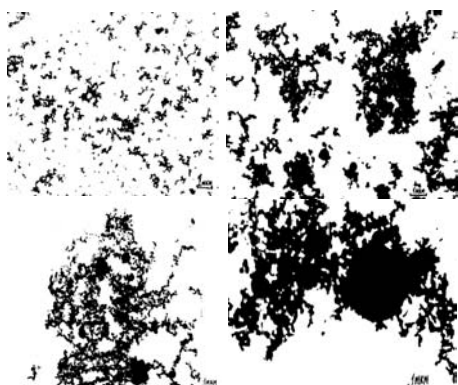


Рис. 4. Коагуляция субмикронных и наночастиц оксидов железа при конверторном производстве стали

Акустическая коагуляция необходима как эффективный метод быстрого укрупнения субмикронных аэрозольных частиц для их последующего осаждения в существующих промышленных осадительных аппаратах, особенно в электрофильтрах. Результаты исследований и применения изложены в докторских диссертациях В.И. Тимошенко (1975 г.) и Н.Н. Чернова (2005 г.), а также в монографиях «Взаимодействие и диффузия частиц в звуковом поле» и «Осаждение и осадконакопление промышленных дымов» (2004 г., Ростиздат).

Для промышленного внедрения метода акустической коагуляции на кафедре разработаны комплекты конструкторской документации мощных излучателей звука типа элекросирен большой, средней и малой производительности. На рис. 5 показана фотография сирены большой мощности над электрофильтром Новочеркасской ТЭЦ и двух малых сирен перед циклоном в цехе фталевого ангидрида Таганрогского лакокрасочного завода.



а



б

Рис. 5. Акустическое осаждение промышленных дымов
а – Новочеркасская ГРЭС; б – Лакокрасочный завод

В последние годы нами проводятся исследования направленной диффузии и осаждения в звуковом поле наноразмерных аэрозольных частиц различных сортов сигарет (Мальборо, Наша марка, Бонд и махорка). Моделируются условия осаждения наночастиц в переменном потоке в дыхательном тракте человека при активном и пассивном курении. На рис. 6 видны агрегаты наночастиц дыма сигарет марки «Мальборо» от пассивного курения. Микрофотографии получены с помощью атомно-силового микроскопа факультетского Наноцентра. Решены уравнения направленной диффузии таких частиц в переменном потоке и в стационарных условиях. Эти исследования нужны не только для проблемы охраны здоровья человека, но и для бурно развивающихся био- и нанотехнологий.

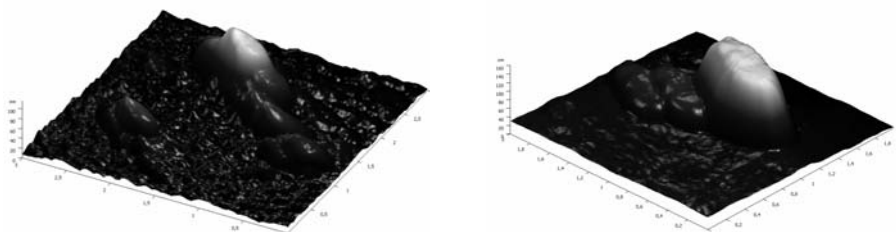


Рис. 6. Наночастицы сигаретного дыма

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Зарембо Л.К., Тимошенко В.И. Нелинейная акустика. – М.: МГУ, 1984. – 104 с.
2. Гидроакустическая энциклопедия / Главный редактор В.И.Тимошенко. – По гранту РФФИ. Таганрог: ТРТУ, 1999. – 788 с., 2-е изд. 2000. – 582 с.
3. Тимошенко В.И., Чернов Н.Н. Взаимодействие и диффузия частиц в звуковом поле. – Ростов-на-Дону: Ростиздат, 2003.–304 с.
4. Тимошенко В.И., Чернов Н.Н. Осаждение и осадконакопление промышленных дымов. – Ростов-на-Дону: Ростиздат, 2004. – 224 с.

Тимошенко Владимир Иванович

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

E-mail: egamt@tsure.ru

347928, Россия, г. Таганрог, ГСП 17А, Некрасовский, 44

Тел.: 8(8634) 37-17-95

Чернов Николай Николаевич

E-mail: egamt@tsure.ru

Timoshenko Vladimir

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

E-mail: egamt@tsure.ru

44, Nekrasovsky, Taganrog, GSP-17a, Russia, Ph.: +7(8634) 37-17-95

Chernov Nicolay

E-mail: egamt@tsure.ru