

# РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПЫЛЕВЫХ ЧАСТИЦ И АДСОРБИРОВАННЫХ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ГРАНУЛИРОВАННОМ ВОЗДУШНОМ ФИЛЬТРЕ АЭС В УСЛОВИЯХ ВЫНУЖДЕННОГО АКУСТИЧЕСКОГО РЕЗОНАНСА

*О.П. Леденёв, И.М. Неклюдов*

*Институт физики твердого тела, материаловедения и технологий ННЦ ХФТИ,  
Харьков, Украина*

Исследованы особенности распределения пылевых частиц и адсорбированных химических элементов, накапливаемых в воздушном фильтре, состоящем из гранул адсорбента, в процессе интенсивного продувания через него аэрозольного потока. В определенных аэродинамических условиях в фильтре возможна генерация акустических колебаний, приводящих к появлению стоячих волн давления (плотности), которые влияют на динамику частиц и приводят к накоплению пылевых масс и к избыточному насыщению гранул адсорбируемыми химическими элементами в областях пучности волн. Проведено сравнение с экспериментальными результатами, полученными аэродинамическим моделированием и гамма-анализом распределения адсорбированных элементов.

PACS: 28.41.Te; 43.20.Ks; 43.25.Uv; 43.28.+h; 83.80.Fg

## ВВЕДЕНИЕ

На атомных электростанциях (АЭС) в системах очистки воздуха от радиоактивных нуклидов, возникающих при работе ядерных реакторов, используются воздушные фильтры, заполненные гранулами угольного адсорбента, которые играют важную роль в соблюдении норм экологии и безопасности станций. Угольные фильтры АУ-1500 рассчитаны на эксплуатацию в течение многих лет и продолжают использоваться на атомных станциях Украины и в настоящее время без существенных изменений. В то же время в них было выявлено наличие ряда особенностей, которые сказываются на работоспособности фильтрующего устройства. Так, на определенном этапе работы возникает ненормированный рост воздушного сопротивления фильтра, приводящий к ограничению срока его службы. Возможны также одиночные непредсказуемые выбросы накопленных нуклидов, возникновение которых не может быть объяснено исходя из конструкции фильтра и не приводит в то же время к каким-либо иным последствиям в его работе. Изначально предусмотреть такие долговременные особенности его работы было невозможно, так как они связаны с некоторыми специфическими физическими процессами, происходящими в фильтрах под действием силовых нагрузок, которым они подвержены в процессе эксплуатации и природу которых еще предстоит выяснить и соотносить с наблюдаемыми явлениями.

Отметим, что задача исследования особенностей физических процессов в фильтрах, вынужденных работать в условиях пылевой, радиационной и аэродинамической нагрузок и воздействующих на его сложную рабочую среду, которая состоит из гранул адсорбента, имеющих пористое внутреннее строение, является достаточно сложной. Она стыкуется с физикой пылевых сред, которые интенсивно исследуются во многих областях физики, начиная от физики межзвездного пространства [1, 2], физики плазмы – при исследовании пылевых кристаллов, пылевых ионно-акустических волн, квантовых пылевых акустических волн [3–8], и в сугубо приклад-

ных областях, связанных, например, с физикой аэрозолей [9–11]. Газы, содержащие гранулированные частицы, образуют отдельный класс гранулированных газов со своими особенностями рассеяния частиц, распределением по энергиям, температурой, возможностью нелинейного взаимодействия и структурообразования [12–14]. В то же время, насыщенные гранулированные среды существенно отличаются от сплошных однородных материалов как своими упругими и деформационными свойствами [15], так и возможными типами колебаний и распределением полей напряжений при воздействии внешних силовых нагрузок [16]. Перенос и структурообразование пылевых масс в таких гранулированных средах характеризуются возможностью возникновения максимумов плотности пыли в глубине фильтра, которые были обнаружены в экспериментальных исследованиях, проведенных на макетах фильтрующих устройств [17, 18]. При исследовании адсорберов АУ-1500 после их эксплуатации на АЭС методом гамма-активационного анализа было показано [19], что распределения ряда адсорбируемых химических элементов характеризуются несколькими явно выраженными чередующимися максимумами, расположенными в глубине фильтра в направлении распространения потока воздуха.

В [20] было показано, что расположения максимумов осевшей из аэрозольного потока пыли и максимумов в распределении химических элементов коррелируют в фильтрах между собой. Плотность накопления адсорбируемых химических элементов в единице массы пыли превышает аналогичный показатель для гранул. В пылевых массах, возникших при частичной деструкции гранул угольного адсорбента, доступ к наноразмерным порам для химических элементов, переносимых воздухом, и соответственно их адсорбция существенно увеличены. Это связано с тем, что отношение внешней поверхности, через которую возможно проникновение элементов внутрь гранул и их захват на адсорбирующей поверхности внутренних пор, к объему гранулы пропорционально  $1/d_{ГР}$ , где  $d_{ГР}$  – усредненный размер

гранулы. В то же время для частиц пыли величина  $l/d_{п}$  в  $10^2 \dots 10^3$  раз больше. Время диффузионного переноса химических элементов с поверхности в глубину гранулы равно  $\tau \sim d_{гр}^2 / \langle D \rangle$ , где  $\langle D \rangle$  – усредненный коэффициент диффузии элемента в воздухе и по внутренней адсорбирующей поверхности, так как в процессе участвуют оба эти механизма. Учтем, что поток химических элементов, проникающих в частицу, пропорционален относительной доступности внутренней адсорбирующей поверхности частицы, рассмотренной выше и деленной на время проникновения  $J \propto \langle D \rangle / d^3$  [21]. Так как характерные размеры частиц пыли и гранул отличаются в  $10^2 \dots 10^3$  раз, то процесс адсорбции на пыли во много раз более быстрый, чем в гранулах. Поэтому неоднородное распределение пыли ведет к такому же распределению накопленных химических элементов. Этот вывод позволяет связать местоположение максимумов распределения пыли с положением максимумов в распределении адсорбированных химических элементов, но в то же время не позволяет сделать достаточно обоснованного вывода о причинах появления таких пылевых максимумов в глубине фильтра. В работе [17] указывалось на возможность реализации диффузионного механизма сепарации и разделения частиц пыли по массам аналогичного процессу, происходящему в хроматографических колонках на молекулярном уровне. Однако этот механизм не позволяет объяснить все особенности распределения пылевых масс в фильтре и описывает, видимо, диффузионные пылевые «хвосты» вблизи фронтальной области фильтра. В то же время гамма-резонансные исследования показывают [19], что имеются максимумы в распределении накопленных химических элементов и вблизи выхода из фильтра, где почти отсутствуют пылевые массы и, следовательно, элементы содержатся в гранулах фильтра. Эта работа расширяет рамки проведенных ранее исследований и посвящена выяснению вероятного влияния возможных в фильтре акустических явлений в воздухе на распределение в нем пылевых масс и адсорбируемых химических элементов. Такие вынужденные колебания могут возбуждаться воздушным потоком, который проникает через неоднородную гранулированную среду, и сопровождаться диссипацией его энергии. Рассмотрение проведено в приближении, когда длина возбуждаемых стоячих волн  $\lambda$  существенно больше характерных

размеров гранул угольного адсорбента  $\lambda \gg d_{гр}$ , но

сравнимых с длиной фильтра  $\lambda \sim L$ .

## 1. АКУСТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В ФИЛЬТРЕ

Рассмотрим акустические явления в гранулированном фильтре, через который при разности давлений на его входной и выходной поверхностях  $\Delta P$  прокачивается поток воздуха  $J$ , переносящий мелкодисперсную пыль. Будем полагать, что пылевая нагрузка  $k$ , под которой мы понимаем относительное

массовое содержание пыли в единице объема воздуха

как  $k = m_n / m_g$ , мала  $k \ll 1$ . Как показали исследования

[17, 18, 20], перенос воздуха сопровождается частичным структурообразованием пылевых масс и, учитывая долговременность работы фильтра, относительное массовое количество пыли, накапливаемой в адсорбере, может достигать в отдельных местах почти 100 % заполнения свободных объемов между гранулами. При достаточно больших интегральных пылевых нагрузках это происходит, например, в приповерхностном слое фильтра и имеет явно выраженные максимумы плотности накопленной пыли в глубине адсорбера. Возможный физический механизм такого поведения пылевых масс остается неизвестным, и в данном исследовании мы рассматриваем влияние вынужденных акустических колебаний, возникающих в гранулированной среде под действием потока воздуха, на распределение пыли и поглощаемых химических элементов в глубине фильтра.

Как мы отмечали ранее [17], перенос пыли в воздушном потоке регулируется воздействием на ее частицы нескольких сил, таких как сила вязкого увлечения пыли воздухом, сила инерции, проявляющаяся в областях, где поток, обтекая гранулы, резко меняет свое направление, и гравитационная сила. В настоящем исследовании мы обращаем внимание на возможное существенное влияние на распределение пыли и адсорбированных химических элементов акустических колебаний, которые могут возбуждаться в адсорбере потоком воздуха, протекающим между гранулами под действием разности давлений, создаваемой внешним прокачивающим воздух источником.

Рассмотрим физические основы процесса генерации звуковых колебаний потоком воздуха в гранулированном фильтре. На границе фильтра при непрерывности потока воздуха имеется скачок его скорости  $V$ , и внутренний объем фильтра можно рассматривать как потенциальную яму, в которой скорость потока воздуха больше, чем вне ее (рис. 1).

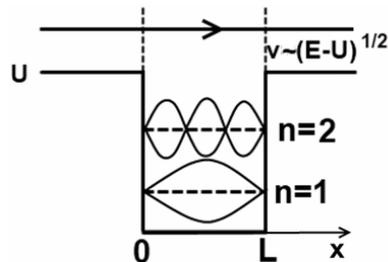


Рис. 1. Первые две нечетные гармоники стоячих акустических волн в фильтре длиной  $L$

Скорость  $V$  существенно меньше, чем скорость звука  $s$  в воздухе, но она важна для механизма, вызывающего генерацию акустических колебаний в воздухе, который будет рассмотрен ниже.

Волновое уравнение для колебаний давления в воздухе может быть представлено в виде

$$\Delta P - (1/s^2) \partial^2 P / \partial t^2, \quad (1)$$

где  $P(x, y, z, t)$  – давление в звуковой волне;  $\Delta = \partial^2 / \partial x^2 + \partial^2 / \partial y^2 + \partial^2 / \partial z^2$  – оператор Лапласа;  $t$  – время. Скорость звука определяется зависимостью плотности воздуха  $\rho$  от давления  $s^2 = (\partial P / \partial \rho)_s$  при постоянной энтропии. Видно, что в гранулированной среде скорость звука должна мало отличаться от свободного пространства, если внутренние объемы гранул, доступные для заполнения воздухом, являются малыми по сравнению со свободным объемом полостей. В то же время, внутренняя адсорбционная поверхность гранулы существенно превышает ее геометрическую поверхность [22, 23]. Тогда этот дополнительный внутренний объем не оказывает существенного влияния на колебания при изменении давления и соответственно на скорость звука [24].

Важным параметром является колебательная скорость движения  $v$  частиц воздуха, который рассматривается как непрерывная среда:

$$v = (1/\rho) \text{grad} \int P dt. \quad (2)$$

На границе свободного пространства и гранулированной среды граничные условия приводят к условиям  $P_1 = P_2$  и  $v_1 = v_2$ . Отметим, что скорость звука для колебаний с длиной волны много больше разме-

ра гранул  $\lambda \gg d_{gp}$  внутри гранулированной среды не

будет отличаться от свободного пространства.

Гармоническое одномерное звуковое поле описывается уравнением Гельмгольца:

$$\Delta P + k^2 P = 0, \quad (3)$$

где волновой вектор  $k = \omega/s$ ,  $\omega$  – угловая частота,  $\omega = 2\pi f$ ,  $f$  – линейная частота. В общем случае волна имеет вид:  $P(x, t) \sim \exp[i(kx - \omega t)]$ , где вектор  $k$  является комплексным  $k = k_1 + ik_2$ , и его мнимая часть описывает поглощение волны в среде  $P \sim \exp(-\alpha x) \cdot \exp[i(k_1 x - \omega t)]$ , где  $\alpha = k_2$  [25]. Коэффициент поглощения звука в гранулированной среде имеет большую величину для колебаний, длина волны которых сравнима и меньше, чем характерные размеры гранул. Рассеяние волн, имеющих

$\lambda \gg d_{гр}$ , можно в рассматриваемой задаче полагать

малым и не влияющим на рассматриваемый вопрос [25].

Для адсорбера, у которого поверхность является свободной для проникновения воздуха, как в фильтрах, звуковое давление на его границе обращается в нуль:  $P = 0$ , и скорость частиц воздуха достигает максимального значения:  $v = v_{\max}$ , т. е. в нем возможны только собственные стоячие колебания воздуха, которые описываются нечетными гармониками.

Так как стоячие волны задаются условиями, при которых на границе имеются пучности скорости воздуха  $v$  и нули давления, то пучности давления  $P$  оказываются сдвинутыми на четверть длины волны в глубь фильтра. Спектр допустимых волн описывается выражением:

$$P_n = P_0 \sin[(2n-1)\pi x/L] \cdot \exp[i(2n-1)\pi s t/L], \quad (4)$$

где  $L$  – длина адсорбера,  $n = 1, 2, 3, \dots$ . Частоты разрешенных гармоник связаны между собой соотношением:  $f_n = (2n-1)f_1$ , где  $f_1$  – основная гармоника с  $\lambda = 2L$ .

Теперь рассмотрим физические механизмы, которые собственно и могут приводить к возникновению в фильтре акустических колебаний. Для этого оценим основные величины, характеризующие перенос воздушных масс и возможные колебательные процессы, – число Рейнольдса  $Re$  и число Струхала  $Sh$  для гранулированной среды [26]. Угольные гранулы адсорбента, которыми заполнен фильтр, можно условно заменить равными по объему гранулами шаровидной формы диаметром  $D$ . Тогда

$$Re = \rho V D / \mu = V D / \nu, \text{ где } \nu = \mu / \rho \text{ – кинематическая}$$

вязкость воздуха. Подставляя характерный диаметр гранулы  $D \approx 2,5 \cdot 10^{-3}$  м, плотность воздуха, равную

при комнатной температуре  $\rho \approx 1,2$  кг/м<sup>3</sup>, и

$\mu = 1,78 \cdot 10^{-5}$  Па·с, скорость потока воздуха  $V = 2$  м/с, получим, что  $Re \approx 3,4 \cdot 10^2$ . Этот аэродинамический режим соответствует возникновению турбулентных возмущений в потоке, протекающем между гранулами сорбента в фильтре.

Число Струхала связывает частоту колебаний потока воздуха с диаметром образца, обтекаемого

воздухом, и ее скоростью  $Sh = d/fV$ , где  $f$  – частота

колебаний;  $d$  – диаметр цилиндрического тела (гранулы);  $V$  – скорость потока воздуха. Число  $Sh \approx 0.2$  при  $Re > 10^2$  [26], и отрыв вихрей приводит к появлению колебаний потока воздуха.

Такие механизмы генерирования акустических волн хорошо известны [27]. Они подразделяются на колебания, связанные с обтеканием воздухом тел конечных размеров (эолов тон) [28], и возбуждение волн в резонаторных объемах, существующих в исследованном случае в виде полостей между гранулами в фильтре. В первом случае характерная частота

определяется как  $f = d/V \cdot Sh$ . Во втором случае

резонансная частота равна  $V/d_{res}$ , где  $d_{res}$  – харак-

терный линейный размер свободного объема между гранулами, и ее величина близка к частоте колебаний Струхала.

Таким образом, воздушный поток в фильтре диссипирует часть своей энергии в вынужденные акустические колебания и возбуждает в фильтре стоячие волны. Колебания, возникающие вблизи различных гранул, в общем случае могут синхронизоваться [29, 30]. Отметим, что длины акустических волн на указанных частотах существенно превышают размеры излучателя. Поэтому излучение квазиточечного источника почти изотропно, и интенсивность его мала, но так как излучателями в этих условиях являются все гранулы, расположенные в фильтре, то для описания излучения необходим учет граничных условий, в которых находятся излучатели.

Как известно [25, 31], стоячие акустические волны могут при достаточной мощности звука оказывать взвешивающее воздействие в гравитационном поле даже на достаточно крупные частицы. Это явление основано на вязком увлечении пылевых частиц воздушными потоками, колеблющимися с характерной скоростью  $v$  (2). Такое увлечение существенно для частиц малых размеров. Могут также проявляться и другие пондеромоторные эффекты [25], которые обусловлены градиентами давления, и плотности кинетической энергии  $W_k \approx \rho v^2$  в волне. Возникающая сила  $F_n \sim Wk^4 d^6$ , где  $W$  – средняя плотность звуковой энергии,  $d$  – диаметр частицы, преимущественно влияет на более крупные частицы пыли. Между частицами, расположенными недалеко друг от друга в поле колебаний, могут возникнуть силы притяжения, которые будут приводить к их структурированию в более крупные комплексы. Таким образом, частицы пыли собираются в области пучности волн и, учитывая первые две нечетные гармоники, их распределение равно их сумме, на которую будет наложено влияние постоянного потока воздуха, протекающего через фильтр со скоростью  $V$ .

Вынуждающей силой, создающей поток воздуха в фильтре, является разность давлений на его концах  $\Delta P$ . Излучение генерируемых потоком воздуха акустических колебаний должно приводить к тому, что только часть  $\Delta P$  идет на поддержание потока  $I(\Delta P)$  и некоторая часть приводит к турбулентным и сопутствующим акустическим явлениям. Известно, что, например, для теплопроводности и электропроводности, где механизмы рассеяния связаны лишь с рассеянием квазичастиц на межатомном уровне, эта зависимость между вынуждающей силой и создаваемым потоком  $I$  является линейной. Также и для цилиндрической трубки диаметром  $d$ , не имеющей особенностей формы и в которой нет турбулентных возмущений потока,  $I = \sigma \Delta P / L$ , где  $\sigma = \pi d^4 / 128 \nu$  [26]. Появления нового канала рассеяния в эксперименте с фильтром приводит к зависимости  $I = \sigma S (\Delta P)^{2/3} / L$ , где  $\sigma$  – условная проводимость среды;  $S$  – площадь сечения;  $L$  – длина устройства. Такое отклонение от линейности свидетельствует о существенной роли нелинейных явлений, связанных

с неоднородностью гранулированной среды и соответствующей потерей потоком свойств ламинарного течения.

Наличие вынужденных стоячих акустических колебаний приводит к тому, что в областях пучностей волн происходят максимальное по величине периодическое изменение давления воздуха, что должно сказываться на насыщении пылевых частиц и гранул химическими элементами, находящимися в воздухе.

Отметим, что такое колебательное воздействие может приводить (см., например, [32, 33]) к существенному усилению диффузионного переноса, изменяя эффективный коэффициент диффузии на несколько порядков. Мы не можем однозначно утверждать, что этот механизм в данном случае реализуется в полной мере, но его проявление вполне возможно, учитывая, что именно в местах, где расположены пучности волн в исследованиях гамма-резонансным методом [2], отмечается максимальное накопление адсорбируемых химических элементов. Особенно сильно этот эффект должен проявляться в малых частицах, т. е. в пылевых массах, из-за их более малых размеров по сравнению с гранулами, так как характерное время заполнения таких частиц при диффузии в  $(l_{\text{гр}}/l_{\text{пыли}})^2$  раз меньше, чем гранул. Как показано в [3], удельная массовая насыщенность пылевых масс адсорбированными элементами существенно (в несколько раз) превышает насыщенность гранул, что подтверждает высказанные предположения о роли акустических колебаний.

Также необходимо учитывать в распределении пыли и адсорбированных элементов воздействие непрерывного потока воздуха, который может сказываться, приводя к смещению максимумов внутри адсорбера, а также возможность вытеснения одних адсорбированных элементов другими, имеющими отличную энергию адсорбции.

## 2. СРАВНЕНИЕ С ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМИ ДАННЫМИ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В качестве конструкционных материалов, из которых создавались фильтры, использовалась нержавеющая сталь, срок эксплуатации которой можно считать не ограниченным и которая не подвержена износу при продувке через фильтр воздушных потоков с нормированной величиной  $\sim 1500 \text{ м}^3/\text{ч}$ . В качестве функционального фильтрующего материала в йодных фильтрах АУ-1500 используется насыпной слой гранул угольного адсорбента СКТ-3, который обладает хорошими сорбционными характеристиками по отношению ко всем изотопам йода, в том числе и к  $^{131}\text{I}$  – основной примеси, поглощаемой из воздуха и имеющей период полураспада  $\sim 8,14$  сут. Гранулы представляют собой тела цилиндрической формы со средним диаметром  $d$ , близким к  $1,8 \dots 2$  мм, и средней длиной  $l \approx 3,2$  мм. Толщина насыпного слоя гранул, сквозь который фильтруется воздух, составляет  $L \sim 0,3$  м, и диаметр устройства равен  $\sim 1$  м. Внутренняя структура гранул угольного адсорбента представляет собой сложную, квазифрактальную среду, имеющую поры различного диаметра от мезоскопических до наноразмерных, соединенных каналами различного сечения. Внут-

ренная эффективная адсорбирующая поверхность такой структуры достаточно велика и составляет несколько сотен м<sup>2</sup>/грамм, что приводит к большой адсорбционной активности угольных гранул по отношению к широкому спектру химических элементов.

В нашем случае для усредненного размера гранулы и свободного объема частоты вынужденных акустических колебаний лежат в пределах от 500 до 1500 Гц и совпадают с возможными частотами первой и второй нечетных гармоник.

Ранее были отмечены особенности в работе фильтров в виде упорядоченного распределения пылевых масс [17] и сходного коррелированного распределения адсорбируемых химических элементов в виде максимумов плотности [19]. Наблюдался также ненормированный рост воздушного сопротивления и резкие выбросы радионуклидов. Все эти особенности могут быть объяснены при учете влияния стоячих звуковых волн, генерируемых в фильтре при рассеянии воздушного потока на неоднородностях гранулированной среды, на процессы переноса пыли и химических элементов.

Отметим, что вид, близкий к сумме этих колебаний, имеют распределения пылевых масс, накапливаемых фильтром [17], и распределения плотности ряда поглощенных фильтром химических элементов, измеренных методом гамма-активационного анализа [19], одно из которых представлено на рис. 2 для Sr.

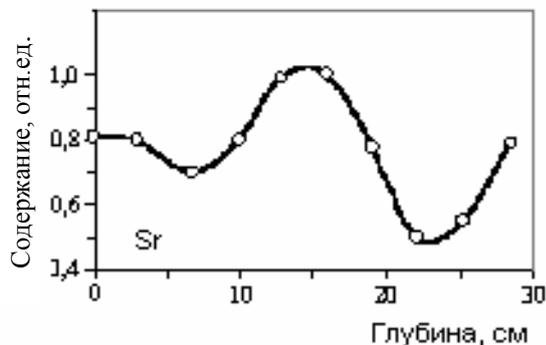


Рис. 2. Относительное распределение <sup>88</sup>Sr в глубине фильтра по данным гамма-анализа [19]

Распределения [19] хорошо коррелируют между собой, если полагать, что все три максимума появляются из-за воздействия вынужденных стоячих акустических колебаний. Силы, которые действуют на пылевые частицы, помещенные в колеблющуюся воздушную среду, могут взвешивать их в поле силы тяжести в вертикальном фильтре в областях, где расположены пучности стоячих волн. Именно это приводит к появлению максимумов в распределении пылевых масс в области пучности давления стоячих звуковых волн.

В этих же областях из-за колебаний давления воздуха осуществляется более интенсивное его проникновение и замена в объемах внутренних пор в гранулах угольного адсорбента СКТ-3. Этот же циклический процесс реализуется и в порах пылевых частиц адсорбента, структурирующихся в этих же областях в пылевые сгустки.

В настоящей работе впервые проведен анализ влияния вынужденных стоячих акустических колебаний, возбуждаемых потоком воздуха в гранулированной среде внутри адсорбера, на распределение структурируемых пылевых масс и адсорбированных химических элементов в процессе долговременной работы фильтра на АЭС. Это позволяет объяснить наблюдаемые особенности в работе фильтра и на их основе представляется возможным сделать предложения по усовершенствованию и модификации фильтрующих устройств, используемых на АЭС.

## ВЫВОДЫ

Показано, что особенности распределения пылевых частиц и адсорбированных химических элементов, накапливаемых в гранулированном воздушном фильтре в процессе интенсивного продувания через него аэрозольного потока, связаны с акустическими колебаниями воздуха. В определенных аэродинамических условиях в фильтре возможна генерация акустических колебаний и появление в воздухе стоячих волн давления (плотности), которые влияют на динамику частиц и приводят к накоплению пылевых масс и избыточному насыщению гранул адсорбируемыми химическими элементами в областях пучности волн. Проведено сравнение с экспериментальными результатами, полученными при аэродинамическом моделировании и гамма-анализе распределения адсорбированных элементов.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. E. Krugel. *The physics of interstellar dust*. IOP Publ. Ltd, 2003, 559 p.
2. R.D. Cadle. *Particles in the atmosphere and space*. Reinhold Publ. Corp, 1966, 284 p.
3. S.I. Popel. Dust ion-acoustic nonlinear wave structures under conditions of near-earth and laboratory plasmas // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика плазмы»*. 2012, №6(82), с. 72-76.
4. S.K. El-Labany, N.M. El-Siragy, W.F. El-Taibany, et al. The effect of dust size distribution on quantum dust acoustic wave // *Physics of Plasmas*. 2009, v. 16, p. 093701.
5. *Dusty and Dirty Plasmas, Noise, and Chaos in Space and in the Laboratory* / Ed. H Kikuchi. N. Y: «Plenum Press», 1994.
6. В.Н. Цытович. Плазменно-пылевые кристаллы, капли и облака // *УФН*. 1997, т. 167, с. 57-99.
7. А.П. Нефедов, О.Ф. Петров, В.Е. Фортов. Кристаллические структуры в плазме с сильным взаимодействием макрочастиц // *УФН*. 1997, т. 167, с. 1215-1226.
8. Е.В. Фортов, А.Г. Храпак, В.И. Храпак и др. Пылевая плазма // *УФН*. 2004, т. 174, №5, с. 495-544.
9. H. Green, W. Lane. *Particulate clouds: dusts, smokes and mists*. London, 1964, 427 p.
10. Л.С. Ивлев. *Химический состав и структура атмосферных аэрозолей*. Л.: Изд-во Ленинградского университета, 1982, 366 с.
11. P.C. Reist. *Aerosol Science and Technology // Second Edition, McGraw-Hill, Inc.* 1993, 379 p.
12. N.V. Brilliantov, T. Poschel. *Kinetic theory of granular gases*. Oxford Univ. Press, 2004, 329 p.

13. В. Эбелинг. Образование структур при необратимых процессах // *Введение в теорию диссипативных структур*. М: «Мир», 1979, 279 с.
14. Н.Б. Урьев. Физико-химическая динамика дисперсных систем // *Успехи химии*. 2004, т. 79, №1, с. 39-62.
15. H.M. Jaeger, S.R. Nagel, R.P. Behringer. Granular solids, liquids, and gases // *Reviews of Modern Physics*. 1996, v. 68, N4, p. 1259-1273.
16. S.A. Galindo-Torres. *Force distribution in granular media studied by an energy method based on statistical mechanics*. ArXiv:1003.5958v1.
17. О.П. Леденёв, И.М. Неклюдов, П.Я. Полтинин и др. Особенности процессов переноса и структурообразования с участием дисперсной угольной фракции в адсорбционных фильтрах систем вентиляции АЭС // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»*. 2005, №3, с. 115-121.
18. И.М. Неклюдов, О.П. Леденёв, Л.И. Фёдорова и др. Влияние фракционного состава на перенос пылевых масс в воздушных фильтрах АЭС и их характеристики // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»*. 2009, №2, с. 104-107.
19. N.P. Dikiy, A.N. Dovbnya, N.A. Skakun, et al. Use of accelerators in geology, medicine, isotopes production and atomic power energetic // *Problems of Atomic Science and Technology. Series "Nuclear Physics Investigations"*. 2001, N 1, p. 26-35.
20. О.П. Леденёв, И.М. Неклюдов, П.Я. Полтинин и др. Особенности пространственного распределения пылевых масс и адсорбированных химических элементов в фильтрах АЭС // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»*. 2006, №4, с. 164-168.
21. R. Jackson. *Transport in porous catalysts*. Elsevier, N.Y., 1977, 197 p.
22. А.В. Еленский. Сорбционные свойства углеродных наноструктур // *УФН*. 2004, т. 174, №11, p. 1191-1231.
23. Ю.С. Нечаев. О природе, кинетике и предельных значениях сорбции водорода углеродными наноструктурами // *УФН*. 2006, т. 176, №6, с. 582-610.
24. В.Е. Накоряков, Б.Г. Покусаев, И.Р. Шрейбер. *Волновая динамика газо- и парожидкостных сред*. М.: «Энергоатомиздат», 1990, 246 с.
25. *Ультразвук: Малая энциклопедия*/ Гл. ред. И.П. Голямина. М: Изд-во Советская энциклопедия, 1979, 400 с.
26. Л.Г. Лойцянский. *Механика жидкости и газа*. М.: «Наука», 1987, 840 с.
27. Д.И. Блохинцев. *Акустика неоднородной движущейся среды*. М: «Наука», 1981, 208 с.
28. Л.К. Зарембо, В.А. Красильников. *Введение в нелинейную акустику*. М: «Наука», 1966, 519 с.
29. Э.Н. Руманов. Критические явления вдали от равновесия // *УФН*. 2013, т. 183, №1, с. 103-112.
30. А.Ю. Варакин. *Турбулентные течения газа с твердыми частицами*. М.: «Физматлит», 2003, 192 с.
31. F. Alton Everest. *Master handbook of acoustics*. 4-th.ed., Mc Graw-Hill, N.Y., 2001, 615 p.
32. M. Mailman, M. Girvan, W. Losert. Arxiv: Cond-mat: 1207.0022.
33. И.Г. Марченко, И.И. Марченко // *Письма ЖЭТФ*. 2012, т. 95, в. 3, с. 153-158.

Статья поступила в редакцию 27.03.2013 г.

## **РОЗПОДІЛ ПИЛОВИХ ЧАСТОК І АДСОРБОВАНИХ ХІМІЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ У ГРАНУЛЬОВАНОМУ ПОВІТРЯНОМУ ФІЛЬТРІ АЕС В УМОВАХ ВИМУШЕНОГО АКУСТИЧНОГО РЕЗОНАНСУ**

*О.П. Леденёв, И.М. Неклюдов*

Досліджено особливості розподілу пилових часток і адсорбованих хімічних елементів, що нагромаджуються в повітряному фільтрі, який складається з гранул адсорбенту, в процесі інтенсивного продування через нього аерозольного потоку. У певних аеродинамічних умовах у фільтрі можлива генерація акустичних коливань, що приводять до появи стоячих хвиль тиску (щільності), який впливає на динаміку часток і приводить до накопичення пилових мас і до надлишкового насичення гранул адсорбованими хімічними елементами в областях пучності хвиль. Проведено порівняння з експериментальними результатами, отриманими в результаті аеродинамічного моделювання і гамма-аналізу розподілу адсорбованих елементів.

## **DISTRIBUTING OF DUSTBORNE PARTICLES AND ADSORBED CHEMICAL ELEMENTS IN GRANULAR AIR FILTER OF AES IN THE CONDITIONS OF THE FORCED ACOUSTIC RESONANCE**

*O.P. Ledenyov, I.M. Neklyudov*

The features of distributing of dustborne particles and adsorbed chemical elements, accumulated in an air filter, consisting of granules of adsorbent are investigational, in the process of the intensive blowing through it of aerosol stream. In certain aerodynamic terms the generation of acoustic vibrations, bringing to appearance of standings waves pressures (density) over, which influence on the dynamics of particles and result to in accumulation of dustborne the masses and to the surplus satiation of granules adsorbable chemical elements in the areas of anti-nodes of waves, is possible in a filter. Comparing is conducted to the experimental results, got as a result of aerodynamic design and gamma-analysis of distributing of the adsorbed elements.