

## СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ ПЫЛЕВЫХ ОСАДКОВ И АЭРОДИНАМИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ В ГРАНУЛИРОВАННЫХ СРЕДАХ

*И.М. Неклюдов, О.П. Леденёв, Л.И. Фёдорова, П.Я. Полтинин*  
*Институт физики твёрдого тела, материаловедения и технологий*  
*Национального научного центра «Харьковский физико-технический институт»,*  
*Харьков, Украина*  
*E-mail: fedorova@kipt.kharkov.ua*

Изучены процессы структурообразования пылевых осадков в гранулированных средах, образованных стеклянными сферами диаметром 2 и 3 мм. Установлено различие в распределении пылевых масс и воздушных сопротивлений по сравнению с изученными ранее фильтрами, заполненными цилиндрическими гранулами. По результатам исследований сделаны выводы о возможности использования адсорбентов различных форм и объемов в воздушных фильтрах атомных электростанций.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Пылевые массы, находящиеся как в газовой среде (аэрозоли), так и в вакууме, проявляют ряд особенностей в процессах переноса и оказываются склонными к образованию специфических структур, таких, например, как пылевые кристаллы, вихри и иные образования, возникающие при приложении как внешних электрических полей (пылевая плазма), так и под влиянием условий, влияющих на их распространение и взаимодействие с различными средами, в которых происходит процесс переноса [1, 2]. К таким средам относятся и фильтрующие устройства, образованные из гранулированных элементов различной формы и объема. Исследования особенностей формирования пылевых структур в вертикальных угольных фильтрах ранее были проведены при изучении влияния фракционного состава угольной пыли, переносимой потоком воздуха, на рост аэродинамического сопротивления йодных адсорбентов систем вентиляции АЭС [3, 4]. Фильтры, исследованные в [3, 4], как и фильтры АЭС, имели насыпную структуру, образованную цилиндрическими гранулами угольного адсорбента СКТ-3 (диаметр 1,8 мм, длина 3,2 мм), создающими сложную хаотичную систему каналов, через которые воздушным потоком продувалась воздушно-пылевая смесь. Пористость насыпного слоя гранул адсорбента (отношение суммарного объема пустот к общему объему пустот и гранул) составляла 0,23, плотность упаковки соответственно была равна  $\eta = 0,77$ . Воздушное сопротивление фильтра возрастало по мере накопления пыли, происходившего в существенной степени из-за структурообразования пылевых осадков и заполнения ими полостей и сужений, возникающих в гранулированной среде при неоднородной упаковке тел цилиндрической формы. В [3] было установлено, что в случае использования крупнопылевой угольной фракции (размер частиц менее 10 мкм) происходит преимущественное накапливание её в узком слое вблизи поверхности адсорбента и при достижении критической концентрации этот слой становится практически монолитным, непреодолимым для потока воздуха. Аэродинамическое сопротивление резко, в десятки раз, возрастало, и

фильтры выходили из рабочего состояния. В случае [4], когда фракционный состав пыли был смещен в область гораздо меньших размеров (размер частиц менее 1 мкм), характер распределения угольной пыли по длине фильтра претерпевал существенные изменения. При тех же массовых пылевых нагрузках пылевой максимум вблизи поверхности оказывался проницаемым для перемещаемых воздушно-пылевых масс. Аэродинамическое сопротивление по мере накопления пыли росло более медленно, примерно следуя линейному закону, и к концу эксперимента, когда общая массовая доля введенной пыли равнялась 9,3 %, увеличивалось всего в два раза.

Сопоставляя полученные в работах [3] и [4] результаты, можно сделать вывод, что наблюдающиеся для крупно- и мелкопылевой угольных фракций особенности в характере распределения угольной пыли по длине слоя гранул обусловлены рядом причин, среди которых важное место может иметь и соотношение между размерами угольных частиц, перемещающихся через фильтр, и размерами полостей и переходных сужений (горл), образующихся в насыпном слое.

Представлялось также интересным выяснить, как геометрическая форма и размер гранул влияют на характер распределения угольной пыли по длине насыпного слоя и, как следствие, на аэродинамическое сопротивление фильтра. При изменении формы гранул с цилиндрической на сферическую происходит изменение размера и формы полостей и горл (сужений), по которым переносится воздушно-пылевая смесь. Важным параметром является и размер гранул, при уменьшении которого, начиная с некоторого критического размера, угольная пыль вследствие сужения каналов будет интенсивно накапливаться между гранулами.

В настоящей работе были проведены модельные эксперименты на макете фильтра, в качестве гранул использованы сплошные стеклянные сферы, диаметр которых составлял 2 и 3 мм. Плотность стекла равна  $2,461 \text{ г/см}^3$ . Отметим, что эти сферы, ввиду своей монолитности, не обладали объемными сорбционными свойствами, но, так как предметом исследований были вопросы структурообразования

пылевых масс, а не процессы сорбции химических соединений, то такая замена тел, из которых формировалась гранулированная среда, представляется правомерной. Отметим, что стеклянные гранулы обладали хорошей адгезией по отношению к угольной пылевой фракции. Это проявлялось в том, что они легко покрывались слоем мелкофракционной пыли и удерживали ее на своей поверхности, как и цилиндрические гранулы СКТ-3.

С геометрической точки зрения, насыпные среды, образованные гранулами сферической формы, являются наиболее симметричными и простыми для анализа. Чередование расширений (полостей) и соединяющих их сужений (горл) присуще различным насыпным средам, но форма и размер полостей и горл в среде, состоящей из сфер, зависят лишь от плотности упаковки и размера сферических гранул, образующих пористую структуру [5].

В работе В.П. Волошина и др. [6] с помощью прямого численного компьютерного моделирования были построены модели плотных неупорядоченных упаковок одинаковых сферических гранул диаметром  $d$ . Целью структурных исследований являлось изучение строения пустого межшарового пространства. Нас интересовала более широкая область применения данного аспекта структурных исследований – проблема массопереноса в пористой среде, образованной сферическими гранулами. При плотной упаковке сферы располагаются гомогенно. В них всегда присутствует определенная доля тетраэдрических и октаэдрических конфигураций, которые, однако, в общем случае не образуют кристаллического порядка. В [6] был проведен количественный анализ структуры пространства пустот в этих моделях и изучена их структура. Плотная модель имеет значение плотности (степень заполнения пространства)  $\eta = 0,59$ , что несколько меньше, чем в моделях с цилиндрическими гранулами. Структурное моделирование позволило вычислить геометрические характеристики, такие как объём пустого межшарового пространства, радиусы узких горл (сужений) и полостей (расширений). Для узких горл радиус  $R_0$  составил  $0,081 d$ . Распределение радиусов сфер  $R$ , вписанных внутрь полостей, имеет максимумы, близкие к  $R_1 = 0,12 d$ , что приблизительно равно радиусу сферы, вписанной внутрь правильной тетраэдрической конфигурации твёрдых шаров, и  $R_2 = 0,2 d$ , что близко к радиусу сферы, вписанной внутрь правильной октаэдрической конфигурации твёрдых шаров [5, 6].

Приведенные в [6] зависимости размеров горл и полостей от диаметра сферических гранул в проведенном модельном эксперименте на макете фильтра позволяют произвести оценку соотношений между размерами угольных частиц, перемещающихся по фильтру, и размерами расширений и сужений в насыпном слое, состоящем из сферических гранул, а также выявить влияние режимов течения воздушно-пылевого потока на процессы структурообразования пылевых осадков. Отметим, что подобная, но более простая, задача изучения особенностей газопереноса в отсутствие пылевой фракции имеет важное значение для реакторов с шаровыми твэлами [7].

В этом случае для выбора оптимальных условий распространения газа в [8] исследовались варианты изменения сечения впускного и выпускного газовых коллекторов при входе и выходе газов в гранулированную среду, состоящую из шаров с  $d = 3 \dots 5$  мм.

В данной работе проведено исследование характера распределения по высоте насыпного слоя осадков продуваемой через фильтр воздушно-пылевой смеси, переносящей мелкопылевую угольную фракцию (диаметр частиц менее 1 мкм), и влияния его особенностей на аэродинамическое сопротивление фильтра при использовании в модельном эксперименте сферических гранул различных диаметров.

## 2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследования проводились на макете вертикального фильтра, диаметр которого был в 10 раз меньше диаметра реального фильтра (рис. 1). Высота заправки гранул в макете соответствовала высоте слоя в фильтре АЭС и составляла 30 см. При параметрах, подобранных таким образом, аэродинамическое сопротивление в обоих случаях было идентичным. Аэродинамическое сопротивление измерялось водяным манометром по разнице давления воздуха  $\Delta P$  на входе и выходе фильтра. В макет загружались 10 металлических контейнеров, в которых гранулы зажимались между двумя сетками, имеющими размер ячеек меньше диаметра гранул. Над фильтром располагался контейнер – источник угольной пыли, который заполнялся смесью гранул и угольной пыли (разовая загрузка была не более 1,5 % пыли от массы гранул в контейнере). Для облегчения сравнения результатов данной работы с ранее проведенными исследованиями фильтров с угольными гранулами [3, 4, 9] все данные по относительному массовому содержанию пыли пересчитаны на плотность угольных гранул. Содержимое источника возобновлялось перед каждым циклом эксперимента. При продувании воздуха через источник пыль поступала в макет, частично накапливаясь в нём, частично покидая его с потоком воздуха. Масса пыли, введённой в фильтр, рассчитывалась по разности масс контейнера-источника до и после эксперимента. Разработанная нами конструкция макета позволяла после окончания эксперимента, отсеив и взвесив угольную пыль, осевшую в контейнерах, получить данные о распределении пыли по высоте слоя гранул. Нами использованы следующие обозначения:  $M_0$  – общая масса гранул в фильтре;  $M_i$  – масса гранул в каждом из контейнеров ( $i$  – от 1 до 10);  $m_0$  – суммарная масса пыли, поступившей в фильтр после очередного эксперимента;  $m_i$  – масса пыли, осевшей в каждом из контейнеров к концу исследований;  $h$  – расстояние от поверхности фильтра. В экспериментах в качестве гранул использовались монолитные стеклянные шарики.

Было проведено два эксперимента: в первом – диаметр шариков составлял 2 мм, во втором – 3 мм. Отметим, что объём цилиндрической гранулы адсорбента СКТ-3 в [3, 4, 9] равен объёму условной сферы диаметром  $d \approx 2,5$  мм. Отличие диаметров стеклянных шариков в проводимых экспериментах

на  $\pm 0,5$  мм от этого значения представлялось достаточным, чтобы по сравнению с угольными цилиндрическими гранулами СКТ-3 оно сказалось на свойствах, определяющих структурообразование пыли и воздушное сопротивление фильтров.

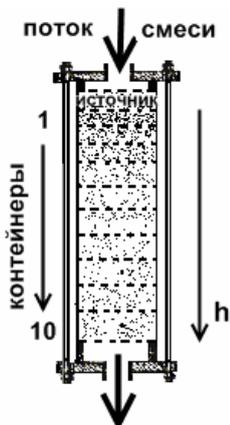


Рис. 1. Макет вертикального фильтра

Отметим, что для уплотнения слоя содержимое макета после загрузки перед экспериментом подвергалось значительной вибрационной утряске. Была также установлена пористость насыпного слоя, которая определялась как отношение межшарового объема пустот к общему объему (шары + пустоты), составившая 0,35 для шариков диаметром 2 мм и 0,38 – диаметром 3 мм. Пористость насыпного слоя цилиндрических угольных гранул в [3, 4, 9] была равна 0,23.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

#### 3.1. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МЕЛКОПЫЛЕВОЙ УГОЛЬНОЙ ФРАКЦИИ ПО ДЛИНЕ ВЕРТИКАЛЬНОГО ФИЛЬТРА

Для макета фильтра, расположенного вертикально, на графиках 1, 2 (рис. 2) приведено по  $h$  – длине насыпного слоя шариков, конечное распределение  $m_i/(M_i+m_i)$  – массовой доли мелкопылевой угольной фракции, полученное в данном эксперименте для шариков диаметром 2 и 3 мм. С целью сравнительного анализа на графиках 3, 4 (см. рис. 2,а) представлены исследованные нами ранее зависимости  $m_i/(M_i+m_i)$  от  $h$  при продувании через слой адсорбента СКТ-3 мелко- и крупнопылевой угольных фракций [3, 4]. Как видно из графиков, для фильтра, заполненного шариками диаметром 2 мм, в узком, двухсантиметровом, слое вблизи поверхности наблюдается максимум уплотнения осевшей в нём угольной пыли  $\sim 23\%$ , близкий по значению, полученному нами ранее для адсорбента СКТ-3, через который продувалась крупнопылевая угольная фракция [3].

Зафиксированное на графике 1 (см. рис. 2) резкое (в 12 раз) уменьшение массовой доли пыли от 23 до 2 % на глубине  $h = 3$  см от поверхности подобно наблюдавшимся ранее зависимостям плотности пылевых масс от  $h$  и, как показано в [9], описывается формулой:

$$C(z) = C_{z=0} [1 - \operatorname{erfc}z] = C_{z=0} \operatorname{erfc}z, \quad (1)$$

где  $\operatorname{erfc}$  – «интеграл ошибок» Гаусса,  $z = (3)^{1/2} (h-1)/2(Dt)^{1/2}$ , где  $D$  – коэффициент диффузии пылевой массы, который для рассматриваемого случая может быть определен из экспериментальной зависимости;  $h$  – расстояние от поверхности;  $t$  – время. Далее, на расстоянии  $\sim 8$  см от поверхности наблюдается небольшое уплотнение, затем следует плавное уменьшение массовой доли пыли до 0,2 % (в 100 раз) на расстоянии 13 см от поверхности.

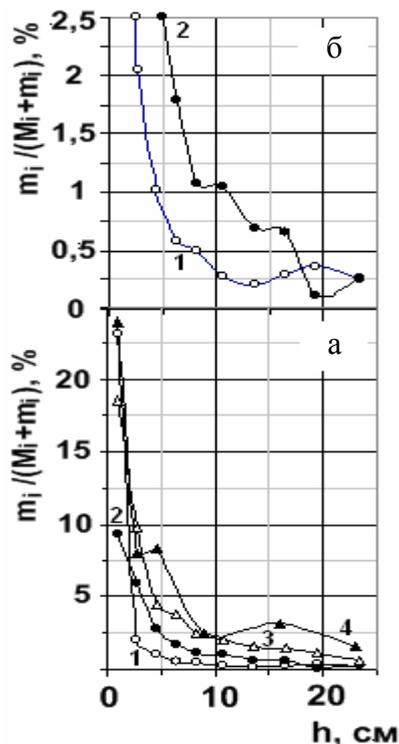


Рис. 2. Распределение массовой доли пылевой угольной фракции по длине вертикального фильтра в конце всей серии исследований;

1, 2 – фильтр заполнен стеклянными шариками диаметром 2 и 3 мм соответственно;

3, 4 – фильтр заполнен адсорбентом СКТ-3.

Размер частиц угольной пыли: 1, 2, 3 – менее 1 мкм, 4 – менее 10 мкм;  $i$  – от 1 до 10 мкм

На глубине около 20 см зафиксирован максимум массовой доли пыли до 0,4 %. Эти максимумы были описаны в [9] в виде распределения Гаусса для пылевых масс:

$$C(h) \propto (Q_0/(\pi D_i t)^{1/2}) \exp((h-h_0)^2/4D_i t). \quad (2)$$

Зависимости (1) и (2) представлены на рис. 3. График 1 соответствует плавной части распределения пылевых масс, на графике 2 наблюдаются максимумы пыли, расположенные соответственно на расстоянии 8 и 20 см от поверхности. График 3 (см. рис. 3) соответствует графику 1 (см. рис. 2).

В фильтре, заполненном трехмиллиметровыми шариками, приповерхностный слой (см. рис. 2, график 2) содержит  $\sim 10\%$  пыли. В глубине фильтра массовая доля пыли спадает в 10 раз до  $\sim 1\%$  на расстоянии от поверхности в 8 см, затем наблюдается немонотонное уменьшение  $m_i/(M_i+m_i)$  до 0,1 % на глубине 20 см с проявлением двух максимумов при  $h = 11$  и 17 см.

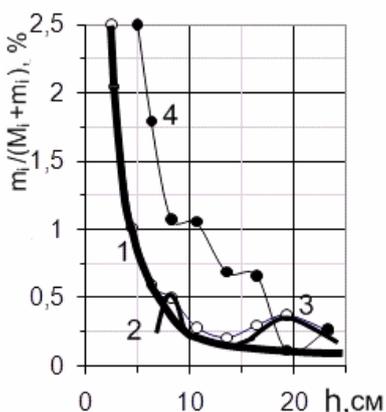


Рис. 3. Распределение массовой доли пылевой угольной фракции по длине вертикального фильтра в виде плавной зависимости (1) и двух максимумов (2, 3) для фильтра, заполненного шариками диаметром 2 мм. График (4) (зачерненные кружки) относится к фильтру с шариками диаметром 3 мм

Практически на выходе из фильтра (25 см от поверхности) зафиксирован небольшой максимум до 0,25 %.

Ход зависимости  $m_i / (M_i + m_i)$  от  $h$  на графике 2 (см. рис. 2) имеет такой же вид, как и у фильтра с двухмиллиметровыми шариками, но с другими характерными расстояниями в расположении максимумов и относительными значениями накопленной пыли (см. рис. 3, график 4).

По разности максимальной массы пыли, поступившей в фильтр к концу эксперимента, и суммарной массы пыли, осевшей в контейнерах, рассчитывалась масса пыли, вышедшая из фильтра с потоком воздуха. В фильтрах, заполненных шариками диаметром 2 и 3 мм, из общей массы введенной пыли было вынесено воздухом 20,1 и 83,5 % пыли соответственно.

Масса пыли, вынесенная потоком воздуха из угольного фильтра, заполненного гранулами СКТ-3, составила для крупнопылевой фракции 61 % от общей массы, введенной в фильтр пыли, для мелкопылевой – 44 % [3, 4, 9].

### 3.2. ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРА ГРАНУЛ НАСЫПНОГО СЛОЯ НА АЭРОДИНАМИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ФИЛЬТРА

На протяжении всего исследования для каждого из возрастающих значений  $m_o / (M_o + m_o)$  – массовой доли пыли, введенной в фильтр, исследовалась зависимость аэродинамического сопротивления  $\Delta P$  от объёмного потока воздуха  $J$ .

На рис. 4 выборочно приведены для фильтров, заполненных как шариками диаметром 2 и 3 мм, так и гранулами адсорбента СКТ-3, графики зависимости  $\Delta P$  от  $J$  при различных значениях массовой доли мелкопылевой угольной фракции, введенной в фильтр.

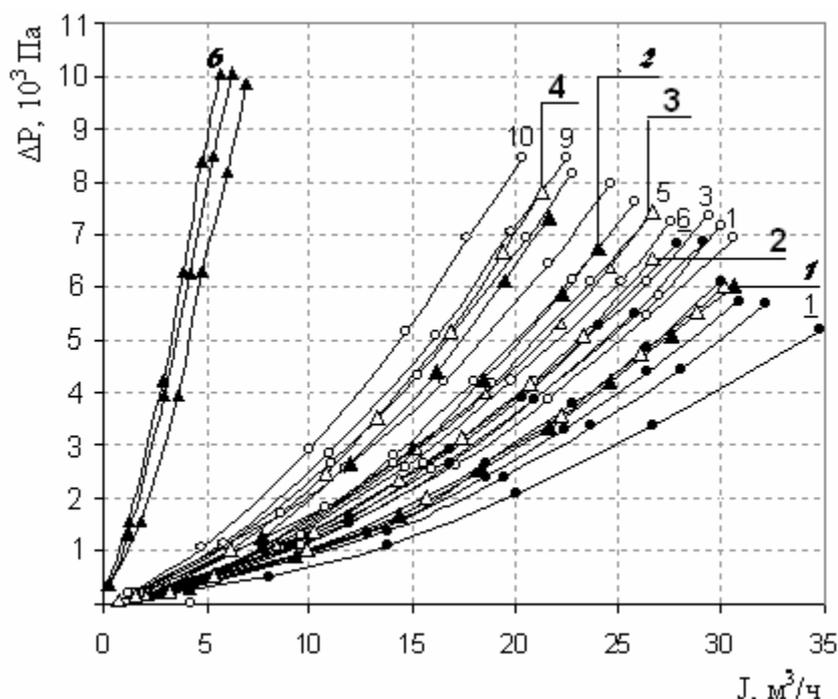


Рис. 4. Зависимость аэродинамического сопротивления вертикального адсорбера от объёмного потока воздуха для массовой доли пылевой фракции, поступившей в фильтр, %; размер частиц угольной пыли:

○ – (1–10), ● – (1–6), △ – (1–4) – менее 1 мкм; ▲ – (1–6) – менее 10 мкм.

Фильтр заполнен: 1) ○ – шариками диаметром 2 мм:

1 (0), 2 (0,4), 3 (1,0), 4 (1,7), 5 (1,95), 6 (2,2), 7 (2,4), 8 (2,8), 9 (3,0), 10 (3,1);

2) ● – шариками диаметром 3 мм: 1 (0), 2 (3,4), 3 (4,5), 4 (6,7), 5 (7,6), 6 (10,5);

3) △ – гранулами адсорбента СКТ-3: 1 (0), 2 (1,4), 3 (4,3), 4 (9,3);

4) ▲ – гранулами адсорбента СКТ-3: 1 (0), 2 (5,9), 3 (6,7), 4 (8,8), 5 (9,1), 6 (9,2)

Здесь же показаны графики для случая перемещения через слой адсорбента СКТ-3 крупнопылевой фракции пыли. По мере увеличения массы поступающей в фильтр пыли, рост сопротивления фильтра с шариками диаметром 2 мм значительно опережает как сопротивление фильтра с трехмиллиметровыми шариками (см. графики 3 и б), так и сопротивление угольного фильтра (см. графики 5 и 3, 9 и 4). Рост сопротивления фильтра с трехмиллиметровыми шариками существенно медленнее по сравнению с сопротивлением угольного фильтра (см. графики б и 2).

На графиках 1–4 (рис. 5) представлена зависимость  $\Delta P^*$  – аэродинамического сопротивления, приведенного к постоянному потоку  $J^* = 15 \text{ м}^3/\text{ч}$ , от относительной массовой доли угольной пыли, введенной в фильтр. При расчётах использованы полученная ранее эмпирическая степенная зависимость  $\Delta P$  от  $J$  [3] и графики, приведенные на рис. 4. Для случая мелкопылевой фракции пыли, продуваемой через насыпной слой: графики 1 и 2 – фильтры заполнены шариками диаметром 2 и 3 мм соответственно; график 3 – фильтр заполнен гранулами адсорбента СКТ-3; график 4 – для крупнопылевой фракции пыли, продуваемой через слой гранул СКТ-3.

Из данных рис. 5,б видно, что уже начальное (без пыли) сопротивление фильтра, заполненного шариками диаметром 2 мм, в 1,5 раза выше начального сопротивления фильтра с шариками диаметром 3 мм. Конечное сопротивление фильтра (шарики 2 мм) при массовой доле введенной пыли всего в 3 % в 1,9 раза выше максимального в данном эксперименте сопротивления фильтра (шарики 3 мм) при  $m_0/(M_0+m_0) = 10,5 \%$  и в 1,2 раза выше конечного сопротивления угольного фильтра с гранулами СКТ-3 при массовой доле угольной пыли в 9,3 %. Сопротивление фильтра с шариками диаметром 3 мм возрастает гораздо медленнее, чем сопротивление угольного фильтра. При одинаковой массовой доле введенной пыли в 9,3 % сопротивление фильтра с шариками диаметром 3 мм в 1,7 раз ниже сопротивления угольного фильтра. Максимальное для эксперимента с трехмиллиметровыми шариками сопротивление в 2850 Па, полученное при  $m_0/(M_0+m_0) = 10,5 \%$ , в фильтре с угольными гранулами достигается при массовой доле угольной пыли всего в 2,3 %.

Совместный анализ результатов (см. рис. 2 и 4) позволяет сделать следующие выводы. Как видно из графика 1 на рис. 2,а, в фильтре с шариками диаметром 2 мм угольная пыль, скопившаяся к концу исследования (~ 80 % от введенной массы), сосредоточена преимущественно в узком, двухсантиметровом, слое вблизи поверхности. На расстоянии 15 см от поверхности массовая доля пыли уменьшается в 100 раз. Аэродинамическое сопротивление при небольшом увеличении массовой доли пыли (до 3 %) резко возрастает (см. график 1 на рис. 5). Это свидетельствует о том, что вблизи поверхности угольная пылевая фракция образует монолитный, непроницаемый для аэрозоля слой.

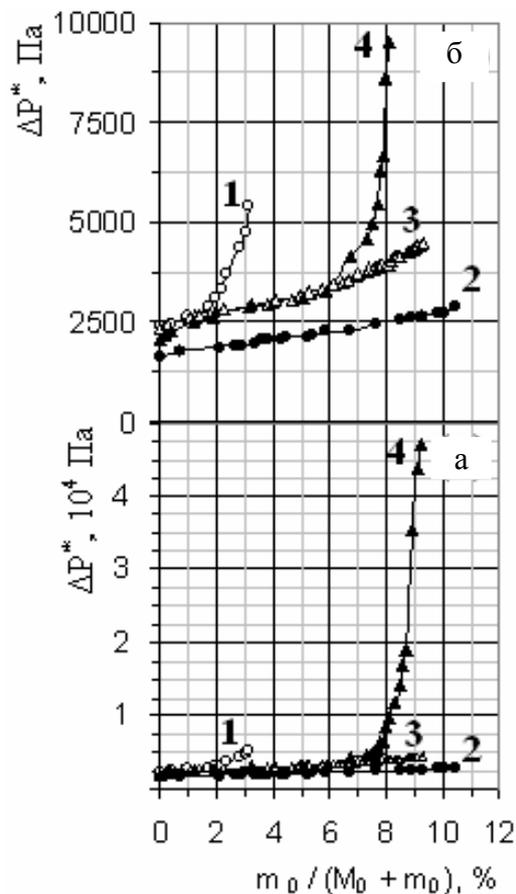


Рис. 5. Зависимость аэродинамического сопротивления, приведенного к потоку  $J^* = 15 \text{ м}^3/\text{ч}$ , от относительной массовой доли пылевой фракции, поступившей в фильтр.

Фильтр заполнен стеклянными шариками диаметром: 1 – 2 мм, 2 – 3 мм;  
3, 4 – фильтр заполнен адсорбентом СКТ-3.  
Размер частиц угольной пыли:  
1–3 – менее 1 мкм; 4 – менее 10 мкм

Следует отметить, что к концу эксперимента угольная пыль начинает накапливаться над поверхностью слоя, не проникая внутрь фильтра.

Сравнительный анализ (см. графики 2 и 3 на рис. 5) показывает, что в фильтр с шариками диаметром 3 мм необходимо ввести до 7 % массовой доли пыли, чтобы достичь начального сопротивления фильтра с угольными гранулами СКТ-3. Как показали исследования, 80 % поступившей в фильтр пыли выходит из него с потоком воздуха. Именно поэтому сопротивление фильтра с шариками диаметром 3 мм при увеличении относительной массовой доли поступившей в фильтр пыли до 10,5 % возрастает всего в 1,7 раза. Задержавшаяся в фильтре массовая доля пыли (16 %) немонотонно падает по насыпному слою (см. график 2 на рис. 2) и не может служить препятствием для перемещения пылевой фракции по слою шариков и выносу её из

фильтра. Однако и в этом случае наблюдается появление максимумов в распределении пылевой фракции вдоль фильтра (см. график 2 на рис. 2).

#### 4. ВЫВОДЫ

В результате проведенных исследований выяснено, что хотя значения пористости насыпных слоёв, полученные для шариков с двух- и трехмиллиметровыми диаметрами, отличаются всего на 8 %, однако наблюдается существенное различие в характере распределения мелкопылевой угольной фракции по высоте фильтра. Решающим фактором в таком поведении является соотношение между размером частиц пыли и размером горл и полостей в структуре пор. Согласно расчётам [6] размер полостей и сужений в слое, состоящем из шариков диаметром 2 мм, в 1,5 раза меньше, нежели в насыпном слое из трехмиллиметровых шариков. Соответственно соотношение между диаметрами полостей и горл и размером частиц угольной пыли для шариков диаметром 3 мм будет в 1,5 раза больше, чем для двухмиллиметровых шариков. Если учесть, что через структуру пустот насыпного слоя, состоящего из шариков диаметром 3 мм, угольная пыль свободно перемещается, не образуя значительных уплотнений (до 80 % пыли выходит из фильтра с потоком воздуха), и в слое адсорбента СКТ-3 (усреднённый диаметр – 2,5 мм) приповерхностный максимум не представляет серьёзного препятствия для перемещения угольной мелкопылевой фракции [4], а в слое двухмиллиметровых шариков более 80 % введенной пыли задерживается вблизи поверхности, создавая уплотнение, непроницаемое для аэрозоля, можно предположить, что механизм взаимодействия среды и переносимых пылевых потоков при равных пылевых нагрузках существенно отличается для указанных фильтров. Адсорберы же типа АУ-1500, используемые на АЭС благодаря наличию цилиндрических гранул с объемом, близким к объёму шарика диаметром 2,5 мм, оказываются устойчивыми по отношению к критическому накоплению мелкофракционных пылевых масс в приповерхностном слое. Отметим также, что уже начальное (без пыли) сопротивление фильтра с двухмиллиметровыми шариками в 1,5 раза выше начального сопротивления фильтра с шариками диаметром 3 мм. Через поровую структуру такого адсорбента пыль свободно перемещаться не сможет, и адсорбер будет неработоспособен. Поэтому в адсорберы типа АУ-1500, используемые на АЭС, не рекомендуется засыпать полностью или слоями адсорбент с гранулами  $d = 2$  мм и менее.

Проведенные исследования показали, что выбор размеров фильтрующих гранул для воздушных фильтров АЭС имеет критические ограничения и их

эффективный диаметр должен соответствовать критерию:  $2 \text{ мм} < d < 3 \text{ мм}$ . В случае диаметров, меньших 2 мм, существенно ограничен ресурс работы, при диаметрах, больших 3 мм, – сорбционная активность фильтра. Подтверждено, что и в насыпных средах, образованных из сферических гранул, возникающие распределения накапливаемых пылевых масс имеют области с максимумами плотности, которые подобны тем, что ранее наблюдались в фильтрах с цилиндрическими гранулами [3, 4, 9].

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. 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.
2. N.V. Brilliantov and T. Poschel. *Kinetic Theory of Granular Gases*. Oxford University Press, 2004, p. 329.
3. И.М. Неклюдов, Л.И. Федорова, П.Я. Полтинин, Л.В. Карнацевич. Влияние особенностей накопления пылевой угольной фракции в слое адсорбента на рост аэродинамического сопротивления угольных йодных фильтров систем вентиляции АЭС // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»*. 2003, №6, с. 65-70.
4. И.М. Неклюдов, О.П. Леденёв, Л.И. Фёдорова, П.Я. Полтинин. 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.
5. Н.Дж.А. Слоэн. Упаковка шаров // *Scientific American*. 1984, N3, с. 72-82.
6. В.П. Волошин, Н.И. Медведев, В.Б. Фенелонов, В.Н. Пармон. Исследование структуры пор в компьютерных моделях плотных и рыхлых упаковок сферических частиц // *Журнал структурной химии*. 1999, т. 40, №4, с. 681-692.
7. Р.Г. Богоявленский. *Гидродинамика и теплообмен в высокотемпературных ядерных реакторах с шаровыми твэлами*. М.: «Атомиздат», 1978.
8. А.С. Пушнов, И.И. Гальперин, А.М. Каган. Газораспределение в реакторе с шаровыми твэлами // *Атомная энергия*. 1982, т. 53, в. 5, с. 320-321.
9. О.П. Леденёв, И.М. Неклюдов, П.Я. Полтинин, Л.И. Федорова. 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.

Статья поступила в редакцию 03.02.2012 г.

## **УТВОРЕННЯ СТРУКТУРИ ПИЛОВИХ ОПАДІВ І АЕРОДИНАМІЧНИЙ ОПІР У ГРАНУЛЬОВАНИХ СЕРЕДОВИЩАХ**

*І.М. Неклюдов, О.П. Леденьов, Л.І. Федорова, П.Я. Полтінін*

Вивчені процеси утворення структури пилових опадів у гранульованих середовищах, утворених скляними сферами діаметром 2 і 3 мм. Встановлено відмінність у розподілі пилових мас і повітряних опорів у порівнянні з вивченими раніше фільтрами, заповненими циліндровими гранулами. За результатами досліджень зроблені висновки про можливість використання адсорбентів різних форм і об'ємів у повітряних фільтрах атомних електростанцій.

## **STRUCTURIZATION OF DUST PRECIPITATIONS AND AERODYNAMICAL RESISTANCE IN GRANULATED MEDIUMS**

*I.M. Neklyudov, O.P. Ledenyov, L.I. Fedorova, P.Ya. Poltinin*

The processes of structurization of dust precipitations in the granulated mediums formed by glass spheres in diameter of 2 and 3 mm are studied. Distinction in the distribution of dust masses and air resistance is found after comparison with the filters filled with cylindrical granules. Going from the obtained research results, the conclusions on the possibility of use of the various adsorbents with different geometric forms and volumetric dimensions in the granulated filtering mediums in air filters at nuclear power plants are formulated.