

ФОРМИРОВАНИЕ ПЫЛЕВЫХ МАКСИМУМОВ В АЭРОЗОЛЬНОМ ПОТОКЕ В ДИСПЕРСНОЙ СРЕДЕ

И.М. Неклюдов, О.П. Леденёв, Л.И. Федорова, П.Я. Полтинин

Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,
Харьков, Украина

Исследовано распределение мелкой пылевой угольной фракции, накопленной в процессе продувания воздушно-пылевой смеси через горизонтально расположенный воздушный фильтр, состоящий из крупных гранул сорбента. В отличие от вертикальных воздушных фильтров, используемых на АЭС, аэродинамическое сопротивление в данном случае оказывается существенно меньшим при длительных пылевых нагрузках, соответствующих многолетней эксплуатации фильтров. Показано, что этот эффект вызван тем, что сила увлечения пылевых масс воздушным потоком и сила гравитации оказываются направленными ортогонально друг к другу, и сила гравитации, эффективно смещая пылевые частицы к низу фильтра, выводит их из области прохождения основного воздушного потока.

1. ВВЕДЕНИЕ

Исследование переноса аэрозолей через дисперсную фильтрующую среду представляет актуальную задачу для атомной промышленности, в которой на АЭС в большом количестве используются угольные адсорбционные фильтры для очистки воздушных потоков. Во время эксплуатации их сопротивление прохождению воздуха имеет тенденцию к нелинейному росту при достижении критического значения концентрации угольной пыли в узком приповерхностном слое [1]. В работе методами моделирования исследованы в зависимости от пылевой нагрузки особенности изменения сопротивления горизонтально расположенного адсорбера и распределение как по длине, так и по поперечному сечению фильтра мелко дисперсной угольной пыли, осаждающейся в нём.

2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Макет горизонтального адсорбера, на котором проводились исследования, имел форму цилиндра диаметром 10 см с длиной насыпного слоя адсорбента в 30 см, что соответствовало толщине угольного гранулированного слоя фильтра АЭС (рис.1,а). Параметры макета рассчитывались таким образом, чтобы средняя скорость воздушного потока была аналогична скорости его в реальных фильтрах. При этих условиях аэродинамическое сопротивление макета и фильтра совпадало. Макет собран из десяти съёмных металлических контейнеров, слой угля в них зажат с двух сторон крупно ячеистыми сетками. Каждый контейнер параллельно длине фильтра разделен сетками на четыре разъёмных сегмента (см. рис.1,б). Сегменты с одинаковыми номерами по длине макета образуют четыре слоя адсорбента. Сегменты контейнеров заполнялись специально отобранными крупными гранулами адсорбента СКТ-3 (диаметр – 1,8 мм, длина – 3,2 мм). Непосредственно перед макетом располагался контейнер – источник угольной пыли, в который помещалась тщательно перемешанная смесь гранул с угольной пылью (не более 1,5 % пыли от массы адсорбента).

Размер частиц угольной пыли, полученной измельчением гранул в высокооборотной центробежной мельнице, не превышал 1 мкм. С целью соблюдения одинаковых стартовых условий смесь в контейнере-источнике возобновлялась перед каждым экспериментом.

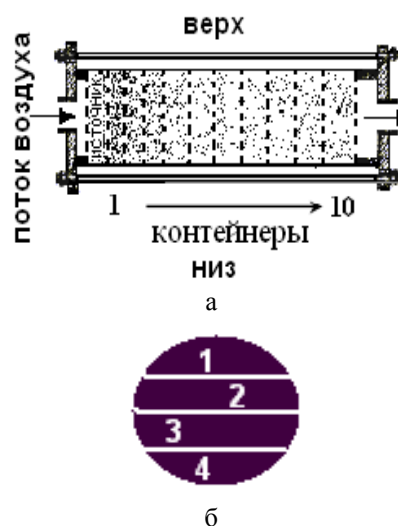


Рис. 1. Схематическое изображение макета адсорбера (а) и поперечное сечение контейнера: 1-4 - сегменты сверху вниз (б)

По разности масс контейнера-источника до и после каждого опыта определялась масса угольной пыли, поступившей в фильтр. По окончании всего цикла исследований были получены значения массовой доли пыли, осевшей в каждом из сегментов всех контейнеров.

Использованы следующие обозначения: h – длина гранулированного насыпного слоя; M_0 – масса гранул во всем фильтре; m_0 – общая масса пыли, введенной в фильтр из контейнера-источника после очередного эксперимента; M_j^i – масса адсорбента в j -м сегменте (j – от 1 до 4) контейнера № i ; m_j^i – масса пыли, накопившейся к концу эксперимента в j -м сегменте контейнера № i (i – от 1 до 10). ΔP – разность давлений на входе и выходе фильтра измерялась водяным манометром.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МАССОВОЙ ДОЛИ УГОЛЬНОЙ ПЫЛЕВОЙ ФРАКЦИИ ПО ДЛИНЕ СЛОЁВ ГРАНУЛИРОВАННОГО АДсорбЕНТА

Для всех десяти контейнеров были получены усреднённые значения $m_i^j / (M_i^j + m_i^j)$ - массовой доли пыли, осевшей к концу исследований в каждом из четырёх сегментов. Графическое изображение распределения угольной пыли по поперечному сечению контейнеров показано на рис. 2. Полученные результаты свидетельствуют о том, что уже в узком слое вблизи поверхности наблюдается смещение угольной пыли из первого (верхнего) слоя в нижние слои адсорбента. Массовая доля пыли в первом (верхнем) сегменте первого, ближайшего к источнику пыли, контейнера в два раза меньше, чем во втором его сегменте (см. крив. 1 на рис. 2).

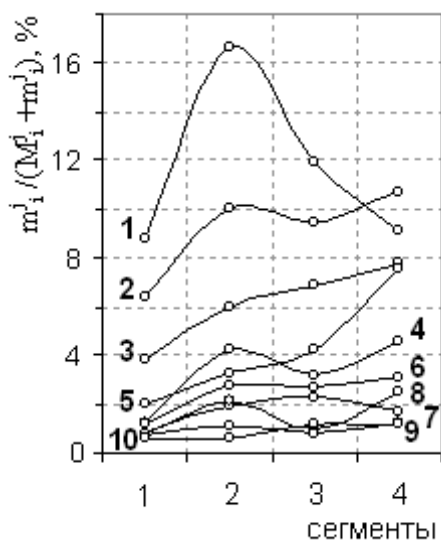


Рис. 2. Распределение массовой доли пылевой фракции по поперечным сечениям контейнеров: i - от 1 до 10; j - от 1 до 4

С использованием приведенных на рис. 2 данных построены графики распределения массовой доли угольной пыли по длине h четырёх слоёв адсорбента (рис. 3,а).

Как видно, вблизи поверхности гранулированного адсорбента во всех четырёх слоях имеются уплотнения угольной пылевой фракции с массовой долей, равной: 8,8; 16,6; 11,9, и 9,1 % для 1-4 слоёв соответственно. Затем наблюдается резкий спад: на длине около 6 см количество пыли в 1-4 слоях сокращается в 7,0; 4,0; 3,7 и 2 раза. Далее происходит плавное уменьшение массовой доли пыли во всех четырёх слоях вплоть до 0,7 % для 1-2 и 1,2 % для 3-4 слоёв на выходе из фильтра.

По всей длине фильтра значения массовой доли пыли в сегментах первого, верхнего, слоя (см. крив. 1 на рис. 3,а) меньше, чем в сегментах ниже лежащих слоёв. Начиная со второго контейнера количество пыли в сегментах самого нижнего, четвёртого, слоя (см. крив. 4 на рис. 3,а) превышает её значения в сегментах вышележащих слоёв. Анализ по-

лученных данных свидетельствует о том, что под действием силы гравитации происходит преимущественное перемещение пыли, поступающей в фильтр, в нижний слой адсорбента.

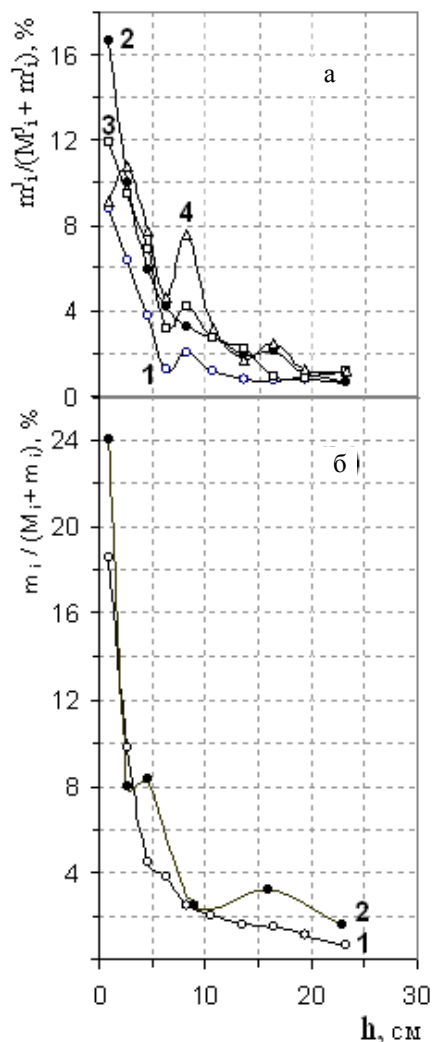


Рис. 3. Распределение массовой доли пылевой фракции по длине 1-4 слоёв адсорбента (j - от 1 до 4) горизонтального фильтра в конце всей серии исследований; размер частиц угольной пыли менее 1 мкм; i - от 1 до 10 (а). Распределение массовой доли пылевой фракции по длине слоя адсорбента вертикального фильтра в конце всей серии исследований; размер частиц угольной пыли: 1 - менее 1 мкм, 2 - менее 10 мкм; i - от 1 до 10 (б)

На рис. 3,б приведены полученные ранее зависимости распределения массовой доли угольной пыли по длине адсорбционного слоя вертикального фильтра для: 1 - мелкопылевой и 2 - крупнопылевой фракций [1-2]. Как следует из сравнительного анализа данных, представленных на рис. 3,а и 3,б, для случая мелкопылевой фракции в горизонтальном фильтре в отличие от вертикального присутствуют вдоль длины слоёв гранулированного угля явно выраженные максимумы на длине: 3 см - для 4-го слоя, 8 см - для 1-, 3- и 4-го слоёв; 16 см - для 2 и 4-го слоёв. Уплотнения подобного рода наблюдались ранее в вертикальном фильтре, через который

продувалась крупнопылевая угольная фракция (см. крив. 2 на рис. 3,б). Согласно диффузионной модели, развитой в [3], для указанных зависимостей относительной концентрации пылевой массы от расстояния x от поверхности фильтра можно ввести общее описание, в котором основной пик вблизи поверхности, возникающий из-за процессов структурообразования из пылевых частиц различных размеров, представляется в виде выражения:

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

где erfz – "интеграл ошибок" Гаусса, и для рассматриваемого случая $z = (3)^{1/2}(x-1)/2(Dt)^{1/2}$, D – общий коэффициент диффузии пыли; t – время продувания воздушно-пылевого потока ($t = 7,02 \cdot 10^4$ с). Для кривых 1 и 2 на рис. 3,а на начальном участке величина коэффициента диффузии оказалась равной $8 \cdot 10^{-8}$ см²/с.

Решение для пиков концентрации пыли, расположенных в глубине фильтра и связанных с образованием пылевых сгустков из частиц одного размера, характерного для каждого сгустка, может быть выписано в виде распределения Гаусса, которое смещается со временем в глубину фильтра [3]:

$$C(x) \propto \{Q_0 / (\pi D_i t)^{1/2}\} \exp(-(x-x_0)^2/4D_i t), \quad (2)$$

где $Q_0 = \int C(x,t)dx$ и x_0 – позиция центра пика, $x_0 \sim V_i t$, V_i – средняя скорость переноса пика; величины с индексом i относятся к пыли определенного выделенного размера, характеризуемого этим индексом.

Появление пылевых уплотнений обусловлено зависимостью скорости их перемещения от размера пылевых частиц, из которых они состоят, и тем обстоятельством, что обмен импульсами при столкновениях пылевых частиц происходит наиболее интенсивно в том случае, когда они близки между собой по массе и соответственно по размеру.

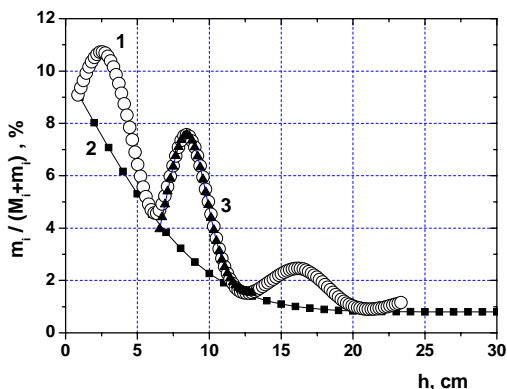


Рис. 4. Распределение массовой доли пылевой фракции по длине нижнего, 4-го, слоя адсорбера:
1 – сглаженная экспериментальная кривая;
2 – расчетная кривая для монотонной части распределения; 3 – расчетная кривая для среднего пылевого пика

В адсорбере наибольшие скорости переноса имеют самые малые частицы, и именно они образуют самые удаленные от поверхности уплотнения. Наиболее ярко все эти пики плотности пыли видны

на кривой 1 (см. рис. 4), относящейся к нижнему, четвертому, слою адсорбента (см. рис. 3, а). Кривая 2 на рис. 4 соответствует расчёту по уравнению (1) с коэффициентом диффузии $D=2,65 \cdot 10^{-8}$ см²/с. Кривая 3 получена в результате расчёта по формуле (2) с коэффициентом диффузии пыли в данном пике $D=9,72 \cdot 10^{-6}$ см²/с. Средняя скорость переноса этого пика массы равна $v = 1,17 \cdot 10^{-4}$ см/с. В нижнем сегменте сосредоточена наибольшая доза пылевых масс, осевших внизу в процессе эксперимента под действием гравитационной силы. Характерно, что в нём же сосредоточено наибольшее число пылевых максимумов (см. крив. 1, рис. 4), что может быть объяснено лишь интегральным действием гравитационной силы на пылевые частицы и результирующим смещением их в ходе эксперимента в нижний слой адсорбента в макете фильтра.

По разности суммарных масс угольной пыли, введенной в адсорбер и осевшей в сегментах, была рассчитана массовая доля угольной пыли Δm , вышедшая из фильтра с потоком воздуха. В исследуемом случае $\Delta m = 49,3$ %.

3.2. ВЛИЯНИЕ ХАРАКТЕРА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МЕЛКОПЫЛЕВОЙ УГОЛЬНОЙ ФРАКЦИИ ПО ДЛИНЕ СЛОЁВ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ФИЛЬТРА НА ЕГО АЭРОДИНАМИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ

Зависимость аэродинамического сопротивления фильтра от объёмного потока воздуха для различных значений массовой доли введенной в него угольной пыли регистрировалась на всём протяжении эксперимента (выборочные результаты приведены на кривых 1-9 рис. 5). Выборочные данные для вертикального фильтра с мелкопылевой угольной фракцией показаны на кривых 1–6 (см. рис. 5).

Совместный анализ результатов, полученных для вертикального и горизонтального фильтров, через которые продувалась угольная пыль с размером частиц менее 1 мкм, свидетельствует, что сопротивление обоих фильтров вначале, приблизительно до 2 % по величине $m_0 / (M_0 + m_0)$, растёт синхронно, затем сопротивление горизонтального фильтра при равных значениях введенной в фильтр массовой доли пыли начинает расти быстрее и превосходит сопротивление вертикального фильтра на 10...8 % (см. рис. 5, крив. 4 и 2, 5 и 3, 6 и 4, 7 и 5, 9 и 6).

На кривой 3 рис. 6 для горизонтального фильтра с мелкопылевой фракцией представлено аэродинамическое сопротивление ΔP^* , приведенное к постоянному потоку $J^*=15$ м³/ч при $\Delta P = 6000$ Па, как функция массовой доли пылевой фракции, введенной в фильтр. При расчётах ΔP^* с применением эмпирической степенной зависимости $\Delta P = k \cdot J^{1,5}$ [1] были использованы данные зависимости ΔP от J , полученные в ходе настоящего эксперимента (выборочно они изображены на кривых 1-9 рис. 5). На рис. 6 приведены также полученные ранее зависимости ΔP^* от $m_0 / (M_0 + m_0)$ для вертикального фильтра с мелкопылевой (кривая 2) и крупнопылевой (кривая 4) фракциями и для горизонтального фильтра с крупнопылевой фракцией, продуваемой через фильтр (кривая 1) [1, 2, 4].

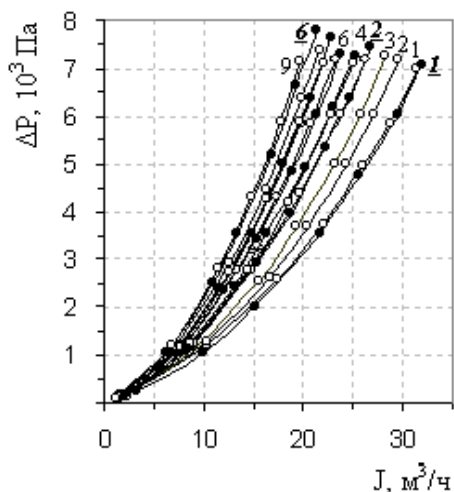


Рис. 5. Зависимость аэродинамического сопротивления адсорбера от объемного потока воздуха для массовой доли пылевой фракции, поступившей в фильтр, %; размер частиц угольной пыли: 1-9 и 1-6 - менее 1 мкм, \circ - фильтр расположен горизонтально: 1 (0), 2 (0,6), 3 (1,4), 4 (2,7), 5 (3,2), 6 (5,9), 7 (7,3), 8 (8,2), 9 (9,2); \bullet - фильтр расположен вертикально: 1 (0), 2 (4,3), 3 (5,6), 4 (6,4), 5 (7,9), 6 (9,3)

Данные на рис. 6 позволяют сопоставить результаты исследования, проведенного на фильтрах с различным фракционным составом продуваемой через гранулированный слой угольной пыли, и различным взаимным расположением сил, способствующих передвижению пылевых частиц вдоль фильтра: силы вязкого увлечения, осуществляющей перенос пыли вдоль адсорбера, и силы тяжести, перемещающей пылевые массы в его нижнюю часть. В вертикальном фильтре эти силы направлены в одну сторону – вдоль потока, в горизонтальном – под прямым углом друг к другу.

Ход 1-3 кривых на рис. 6 не отличается существенно друг от друга. Для них зависимость ΔP^* от $m_0 / (M_0 + m_0)$ близка к линейной с несколько различающимся углом наклона. Ход 4-й кривой (вертикальный фильтр с крупнопылевой фракцией) приблизительно до 7 % по $m_0 / (M_0 + m_0)$ близок к линейному, но далее происходит экспоненциальный рост сопротивления.

Особенности поведения аэродинамического сопротивления во всех четырех случаях (см. рис. 6) находят объяснение при совместном анализе их с изученным нами характером распределения угольной пыли вдоль фильтра (см. рис. 3).

В горизонтальном фильтре с крупнопылевой фракцией [4] под действием силы тяжести частицы пыли, прежде всего - крупные, смещаются к низу фильтра, исключая, таким образом, возможность возникновения вблизи поверхности запирающих пылевых структур [3]. Более мелкие частицы пыли, поступающие в фильтр на всём протяжении эксперимента, составляют часть от общей массовой доли пыли.

Таким образом, они имеют возможность достаточно свободно передвигаться вдоль фильтра и покидать его. Задерживается в нём к концу эксперимента всего 34,6 % введённой пыли ($\Delta m = 65,4$ %). Сопротивление горизонтального фильтра с крупнопылевой фракцией возрастает всего в 1,6 раза и достигает 3270 Па при массовой доле пыли в 9,2 % (см. крив. 1, рис. 6).

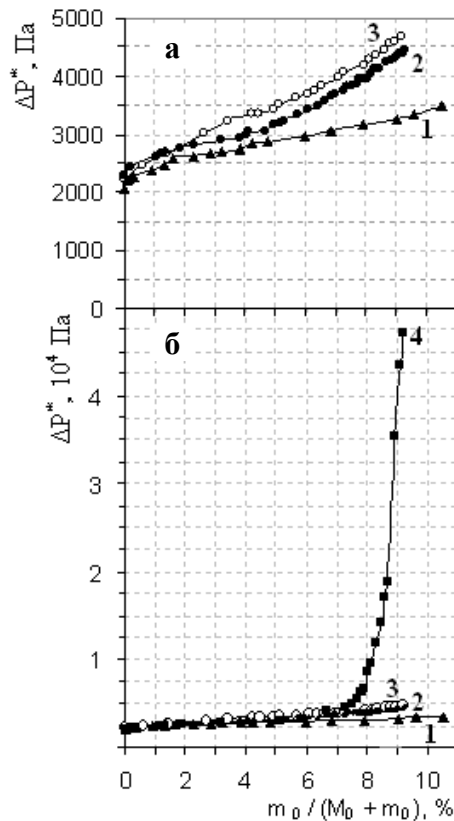


Рис. 6. Зависимость аэродинамического сопротивления ($\Delta P_{\phi} = 6000$ Па), приведенного к потоку $J^* = 15$ м³/ч, от массовой доли пылевой фракции, поступившей в фильтр: 1, 3 - фильтр расположен горизонтально; 2, 4 - фильтр расположен вертикально. Размер частиц угольной пыли: 1, 4 - менее 10 мкм; 2, 3 - менее 1 мкм

В вертикальном фильтре с мелкопылевой фракцией по его длине отсутствуют накопления пыли (см. крив. 1, рис. 3,б) [2]. Приповерхностный уплотнённый пылевой слой на протяжении всего эксперимента остаётся прозрачным для перемещения пылевых масс. Сопротивление вертикального фильтра с мелкопылевой фракцией растет немного быстрее, увеличивается в 1,9 раза к концу эксперимента и равняется 4380 Па (см. крив. 2, рис. 6), $\Delta m = 61$ %. На основании изучения вертикальных фильтров с мелко- и крупнопылевой фракцией можно сделать вывод, что использование в качестве адсорбента прочных гранул, при истирании которых образуется мелкая пылевая фракция, может служить залогом более длительного срока эксплуатации фильтров.

Как и в случае вертикального фильтра с крупнопылевой угольной фракцией, продуваемой через него [1], в исследованном случае (горизонтальный фильтр с мелкопылевой фракцией) по длине слоёв

образуются уплотнённые области угольной пыли, в которых накапливается часть поступающей пыли общей массой $\Delta m = 49,3\%$. К концу эксперимента сопротивление увеличивается в 2,1 раза и составляет 4680 Па (см. крив. 3, рис.6). В случае продувания через слой адсорбента мелкопылевой фракции в горизонтальном адсорбере осаждаются, накапливаясь в уплотнениях, в 1,3 раза больше пыли, чем в вертикальном, где пылевые максимумы отсутствуют [2]. После проведения всей серии исследований сопротивление горизонтального фильтра в 1,1 раза превышает сопротивление вертикального фильтра.

В горизонтальном фильтре с продуваемой через него мелкопылевой угольной фракцией к концу эксперимента сопротивление, согласно полученным данным, в 1,4 раза превышает сопротивление адсорбера с крупнопылевой фракцией. Перемещающаяся по горизонтальному фильтру часть пыли в виде мелкой фракции, оставшейся после выпадения внизу фильтра крупной пыли, количественно существенно меньше массовой доли мелкой пылевой фракции, введенной в горизонтальный фильтр. Поэтому в горизонтальном фильтре с мелкопылевой фракцией задерживается к концу эксперимента в 1,5 раза больше пыли, чем в адсорбере с крупнопылевой фракцией, и задерживается, как показал эксперимент, в виде пылевых уплотнений, оказывающих, как было доказано в [1], большее сопротивление перемещению аэрозольно-пылевой смеси, чем эта же пыль, но рассредоточенная по всему объему адсорбента.

В вертикальном фильтре крупнопылевая фракция [1] осаждалась преимущественно между гранулами адсорбента в узком двухсантиметровом слое вблизи поверхности, задерживая затем в этом слое частицы пыли меньших размеров, и создавая по достижении критической массовой доли (18 %) практически монолитный слой, непроницаемый для воздушно-пылевой смеси. Часть пыли, особенно в начале эксперимента, накапливалась внутри фильтра в виде пылевых уплотнений, $\Delta m = 44,2\%$. В результате сопротивление резко (в 23 раза) увеличивалось до значения 47060 Па (см. крив. 4, рис. 3).

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Проведенный системный анализ параметров горизонтальных и вертикальных фильтров, через которые продувались мелко- и крупнопылевая угольные фракции, позволяет сделать вывод, что в настоящем эксперименте, как и в трёх предыдущих исследованиях, возрастание аэродинамического сопротивления определяется особенностями распределения по длине слоя адсорбента угольной пыли, задержавшейся в фильтре. В изучаемом случае (горизонтальный фильтр) мелкопылевая фракция, хотя и накапливается вблизи поверхности адсорбента и образует уплотнения в слоях по длине фильтра, обусловленные процессами структурообразования в

пылевой фракции [5], но, как показывают исследования, не оказывает значительного влияния на рост аэродинамического сопротивления. Это свидетельствует о том, что во всех этих максимумах, в том числе и в самом большом – приповерхностном, мелкая угольная пыль не уплотняется до монолитной запирающей структуры, препятствующей свободному прохождению воздуха, как это характерно для вертикального фильтра с крупнопылевой фракцией. Конечное значение сопротивления в настоящем исследовании в 10 раз меньше сопротивления вертикального фильтра с крупнопылевой фракцией.

Результаты проведенных исследований, изложенные в данной работе, позволяют утверждать, что адсорбционные фильтры, в которых направлению действия силы тяжести ортогонально направлению сил увлечения пылевых масс воздушным потоком, как в случае крупнопылевой, так и в случае мелкопылевой угольной фракции, продуваемой через адсорбер, имеют малый рост воздушного сопротивления даже при пылевых нагрузках, соответствующих их многолетней эксплуатации на АЭС.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. 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.
3. О.П. Леденёв, И.М. Неклюдов, П.Я. Полтинин, Л.И. Фёдорова. 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.
4. И.М. Неклюдов, Л.И. Фёдорова, П.Я. Полтинин, О.П. Леденёв. Исследование особенностей динамики пылевых масс под действием разнонаправленных сил в фильтрующей среде // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»*. 2007, № 6, с. 82-88.
5. Н.Б. Урьев. Физико-химическая динамика дисперсных систем // *Успехи химии*. 2004, т. 79, №1, с.39-62.

Статья поступила в редакцию 11.03.2010 г.

ФОРМУВАННЯ ПИЛОВИХ МАКСИМУМІВ В АЕРОЗОЛЬНОМУ ПОТОЦІ В ДИСПЕРСНОМУ СЕРЕДОВИЩІ

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

Досліджено розподіл дрібної пилової вугільної фракції, накопиченої в процесі продування повітряно-пилової суміші через горизонтально розташований повітряний фільтр, що складається з великих гранул сорбенту. На відміну від вертикальних повітряних фільтрів, використовуваних на АЕС, аеродинамічний опір у цьому випадку виявляється істотно меншим при тривалих пилових навантаженнях, що відповідають багаторічній експлуатації фільтрів. Показано, що цей ефект викликаний тим, що сила захоплення пилових мас повітряним потоком і сила гравітації виявляються спрямованими ортогонально друг до друга, й сила гравітації, ефективно зміщуючи пилові частки до низу фільтра, виводить їх з області проходження основного повітряного потоку.

FORMATION OF DUST MAXIMUMS IN AEROSOL STREAM IN A DISPERSION MEDIUM

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

Spatial-temporal distribution of the fine dust coal fraction accumulated in the process of air-dust intermixture aerosol flow through the horizontally positioned air filter consisting of the big granules of absorber is researched. Aerodynamic resistance of the horizontally positioned air filters at long term dust trust happens to be significantly lower in comparison with the vertically positioned air filters in industrial applications at NPP's over the years. It is assumed that this phenomena appears, because the directions of the dust masses capture force in airflow and the gravitation force are orthogonal, hence the fine dust coal particles are dislocated by the gravitation force from the volume of main air stream localization within the filter.