

# ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕНОСА И СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ С УЧАСТИЕМ ДИСПЕРСНОЙ УГОЛЬНОЙ ФРАКЦИИ В АДсорбЦИОННЫХ ФИЛЬТРАХ СИСТЕМ ВЕНТИЛЯЦИИ АЭС

*О.П. Леденёв, И.М. Неклюдов, П.Я. Полтинин, Л.И. Фёдорова*  
*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,*  
*г. Харьков, Украина*

Проведено исследование переноса угольной воздушно-пылевой смеси в гранулярной структуре адсорбционного фильтра при поступлении её из приповерхностного слоя. Выявлены физические причины распределения масс пыли по глубине адсорбера, приводящие к аномальному росту его аэродинамического сопротивления. Получены количественные характеристики фильтрующих элементов, необходимые для эффективной очистки воздуха от высокодисперсной пыли.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В процессе работы угольных адсорбционных фильтров в системах вентиляции АЭС было установлено, что наблюдается систематический немонотонный рост воздушного сопротивления адсорберов, который приводит к снижению их эффективности на порядок величины и более. Причины этого явления выяснялись в работах [1, 2], где было обнаружено, что тонкий слой адсорбента, находящийся в поверхностной зоне перехода воздуха от течения в режиме свободного потока к протеканию по каналам структуры фильтра, может разрушаться с образованием пылевидной дисперсной фракции в результате динамических флуктуаций давления, сопровождаемых микро - и макроперемещениями структурных элементов фильтра. Эта угольная фракция в последующем участвует в двух взаимосвязанных динамических процессах: она переносится в глубь фильтра, и ее проникновение, в определенных условиях, сопровождается процессом структурообразования из пылевидного материала перемычек, которые приводят к ограничению поперечного сечения адсорбера, доступного для проникновения воздуха, и ограничивают его производительность.

В настоящей работе, основанной на модельном эксперименте [2], проводится анализ полученных результатов, и выясняются физические причины, приводящие к особенностям в обоих указанных процессах, в которых участвует пылевая фракция материала фильтров. Отметим, что высокодисперсные пылевые среды, несмотря на их многолетнее изучение, и в настоящее время являются объектами научного интереса и интенсивно исследуются [3,4]. Это связано как с их распространенностью, сложностью и разнородностью процессов, происходящих в них, которые не могут быть охарактеризованы простыми модельными представлениями, так и с тем, что существенный интерес для различных разделов физики и техники представляют системы с максимально

измельченной структурой, вплоть до нанометрового диапазона.

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ. СТРУКТУРА ФИЛЬТРА

В работе [2] приведены подробные результаты исследования динамики распределения угольной пыли по глубине адсорбционного слоя при ее поступлении в фильтр из приповерхностного слоя адсорбента. Структура фильтра представляла собой насыпную среду, состоящую из цилиндрических гранул угольного адсорбента с диаметром  $d \approx 1,8$  мм и длиной  $h \approx 3,2$  мм. Специального упорядочения структура не имеет. Распределение и взаимная ориентация гранул устанавливаются случайным образом в результате засыпания адсорбента в фильтр. Таким же случайным образом распределены и условные каналы между гранулами, по которым происходит протекание продуваемого воздуха. Средняя плотность насыпного слоя адсорбента составляет  $\approx 77$  % от весовой плотности материала гранул. Последние состоят из угольного адсорбента, внутри которого существует некоторая сложная иерархия адсорбционных поровых полостей, размеры которых существенно меньше (в  $10^3$  и более раз), чем характерные размеры условных макроскопических каналов фильтра. Проникновение воздуха и радионуклидов из каналов фильтра в эти поры вероятней всего происходит вследствие диффузионного переноса, и, видимо, не связано с протеканием потока воздуха и его скоростью в каналах фильтра. Проникающая способность гранул (величина, обратная характерному сопротивлению потоку воздуха) существенно меньше, чем таковая для самого фильтра. Это свидетельствует о том, что основной перенос воздуха осуществляется именно по каналам между гранулами, а не путем просачивания через тело гранул. Параллельное упорядочение цилиндрических тел может привести к плотной упаковке с ромбовидной элементарной ячейкой в поперечном сечении с одним цилиндрическим элементом на ячейку и дву-

мя пустотами. Пористость насыпной структуры, равная отношению объема, свободного от гранул, к объёму слоя адсорбента, близка к  $\Omega \approx 18,5\%$ . Существенно большее число допустимых конфигураций возможно при упорядочении гранул в структуру с квадратной элементарной ячейкой с одним цилиндрическим элементом на ячейку и одной пустотой. Пористость такой структуры несколько увеличивается и составляет  $\Omega \approx 21,5\%$ . В обоих случаях продувание воздуха по поперечным осям структуры оказывается невозможным, и перенос воздуха осуществляется лишь вдоль продольной оси. Квадратная структура с параллельной ориентацией элементов в общем случае неустойчива относительно перехода в более плотную, ромбическую. Однако в квадратной структуре допустим поворот верхнего слоя таким образом, что он остается параллельным нижнему горизонтальному слою, но в нем изменяется ориентация продольной оси элементов слоя. При повороте на угол  $\varphi \geq \arcsin(d/h) \approx 54^\circ$  эта структура становится устойчивой и не может самопроизвольно перейти в ромбическую. Число допустимых конфигураций, различающихся углом поворота, в указанном случае существенно больше, чем в случае примитивной квадратной ячейки. Наиболее устойчивая структура возникает при усредненном повороте на угол близкий к  $\pi/2$ . Повороты слоев не приводят к изменению пористости структуры, она остается равной пористости простой квадратной ячейки, но при этом появляется возможность протекания воздуха вдоль еще одной из осей структуры. В этой структуре возможен также поворот элементов слоев и в вертикальной плоскости, что приводит к полной проницаемости структуры по всем трем осям. Именно такая структура, видимо, и реализуется на практике (рис. 1). Некоторые дополнительные пустоты в ней возникают в местах перехода элементов от одной допустимой ориентации к другой, и это, вероятно, приводит к увеличению пористости на  $\approx 1,5\%$ , т.е. до экспериментально наблюдаемой величины, примерно равной 23%.

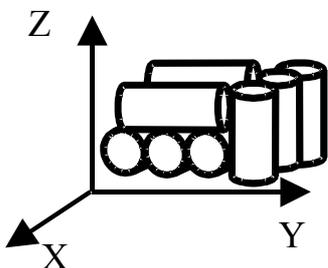


Рис. 1. Предположительная локальная структура фильтра, состоящая из цилиндрических гранул

Общая толщина слоя адсорбента составляет  $L=30$  см, и так как допустимы все ориентации элементов-гранул в трёхмерном пространстве, то наиболее вероятна условная длина пути, равная перехо-

ду по ребрам последовательно расположенных структурных кубов, таких, что  $L$  – их общая диагональ (рис. 2). Усредненная длина ребра элементарного структурного куба при этом может быть принята равной геометрическому среднему из размеров гранулы  $(d \cdot h)^{1/2}$ , и его объем будет  $V_0 = (d \cdot h)^{3/2}$ . Условное число структурных слоев равно  $n = L/(d \cdot h)^{1/2}$  и условная длина канала, по которому происходит перенос воздуха и пыли, равна  $L^* = 3^{1/2} \cdot (d \cdot h)^{1/2} \cdot n = (3)^{1/2} \cdot L$ . Среднее число каналов примерно равно  $N = S/(d \cdot h)$ , где  $S$  – площадь поперечного сечения адсорбера. Среднее сечение условного цилиндрического канала, по которому проходит воздух, можно записать в виде  $S_c = \pi \cdot R^2$ , где  $R$  – некоторый средний радиус канала. Значение радиуса определяется, исходя из равенства свободного объема пористой структуры полному объему каналов. Так как объем единичного канала равен  $S_c \cdot L^*$ , то полный их объем  $V_c = N \cdot S_c \cdot L^* = \Omega \cdot V_\phi$ , где  $V_\phi$  – объем фильтра. Тогда для радиуса получим  $R = \sqrt{\frac{\Omega dh}{\pi \sqrt{3}}}$ .

Это выражение дает возможность оценить поперечный размер канала, зная размеры гранулы и пористость насыпного слоя адсорбента.

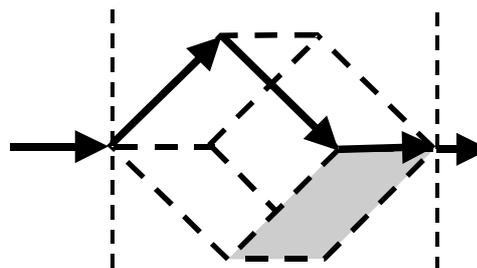


Рис. 2. Условный перенос воздуха по ребрам кубической структуры

### 3. ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕНОСА ВОЗДУХА

Характер движения воздушного потока в фильтре определяется значением числа Рейнольдса  $Re \approx 2 \cdot R \cdot V / \nu$ . Расчет показывает, что в указанных условиях эксперимента, вплоть до максимальных потоков,  $Re$  не превышало характерного критического порога возникновения турбулентного движения ( $Re_{кр} = 2300$ ), и перенос воздуха должен был осуществляться посредством ламинарного течения ( $V$  – скорость воздуха;  $\nu$  – кинематический коэффициент вязкости воздуха;  $\nu = \mu/\rho_v$ , где  $\mu$  – динамический коэффициент вязкости;  $\rho_v$  – плотность воздуха). Отметим, что распределение скорости воздуха по поперечному сечению канала не является однородным. При ламинарном течении оно соответствует известному параболическому закону, при котором на поверхности стенок (гранул) скорость равна нулю, а в центре канала достигает максимального значения  $V_m$ . Средняя скорость переноса при этом составляет  $V = V_m/2$ . При турбулентном движении

распределение продольной скорости течения по сечению канала более простое. Уже в непосредственной близости от стенки канала скорость достигает своего максимального значения и остается постоянной по всему сечению канала. В случае ламинарного течения аэродинамическое сопротивление канала фильтра, равное перепаду давления воздуха на нем, имеет следующую зависимость от  $R$  [5, 6]:

$$\Delta P = 8 \cdot J \cdot \mu \cdot L^* / (\pi \cdot R^4),$$

где  $J = \Omega \cdot S \cdot V_{\phi}$  – объемный расход воздуха в единицу времени. Из этого выражения видно, что падение давления на фильтре при ламинарном течении должно линейно зависеть от потока воздуха. Однако, как показывают результаты работы [2], для всех значений потоков воздуха, начиная с самых малых и до максимально достижимых уровней запыленности фильтра, реализуется универсальная зависимость  $\Delta P \propto J^{\kappa}$ , где  $\kappa \approx 1,5$ . Согласно теории протекания по сложным структурам, значение  $\kappa > 1$  характерно для переходной области от ламинарного к турбулентному течению, а также для условий турбулентной фильтрации [7]. Развитой турбулентный поток, как известно, хорошо описывается значением  $\kappa = 2$ , при этом показатель степени при  $R$  уменьшается до  $\approx 2,5$ . В случае, исследуемом в [2], видимо, основной вклад в рост сопротивления и его отличие от величины, характерной для ламинарного потока, вносят особенности структуры фильтра, так называемые местные добавочные сопротивления. Наличие сужений (конфузорное течение) и расширений потока (диффузорное течение), а также поворотов каналов приводит к необходимости совершения работы по деформации как самого потока, так и поля его скоростей, и неизбежно в вязкой среде связано с рассеянием энергии. Особенности структуры фильтра могут также приводить к тому, что характерными для определения числа Рейнольдса становятся размеры, связанные не только с протеканием по усредненному каналу структуры (микроразмер), но и с обтеканием воздухом некоторых макроструктур (например, граней куба на рис. 2). Это приводит к увеличению числа Рейнольдса. В этих случаях удается согласовать малую величину для  $Re$ , получаемую при расчете течения потока в условном канале, с наличием добавочных сопротивлений и изменением вида зависимости  $\Delta P(J)$  от соответствующего ламинарному течению к характерному для турбулентного.

#### 4. ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕНОСА ВОЗДУШНО-ПЫЛЕВОЙ СМЕСИ

В анализируемом случае через фильтр переносится воздушно-пылевая смесь. Как выяснилось в [2], степень заполнения угольной пылью пустот в приповерхностном слое может достигать 100% от свободного объема. При этом часть пыли оседает и структурируется, а некоторая её часть переносится дальше в глубь адсорбера.

Эксперимент в [2] проводился с возобновляемым источником угольной пыли, который находился

перед адсорбером и представлял собой контейнер 2-сантиметровой толщины, заполненный угольными гранулами с введенной в него пылью. При этом пылевой материал, который переносился потоком воздуха в адсорбер, заранее создавался разрушением угольных гранул до размеров пылинок, не превышавших 10 мкм, что соответствовало пыли, возникшей при реальной эксплуатации адсорберов. Относительно фракционного состава пыли можно сделать следующее замечание. Дробление монолитного объемного материала, как правило, приводит к логарифмически нормальному распределению размеров частиц [8]. В отличие от этого истирание гранул адсорбента СКТ-3 в пылевую фракцию, видимо, приводит к появлению некоторого дискретного набора размеров пылинок, который связан с особенностями разрушения адсорбционного материала. Поэтому полученная таким образом пыль имеет неоднородный состав по размерам пылинок. Отметим, что фракционный состав пыли отдельно не исследовался, однако распределение массы пыли по длине адсорбера после окончания эксперимента, обсуждаемое ниже, явно указывает именно на такой характер разрушения материала.

Перенос пыли воздухом является достаточно сложным процессом и регулируется соотношением нескольких сил: веса пылинок  $F_g$ ; сил увлечения, которые могут быть обусловлены как силами динамического напора  $F_p$ , так и силой вязкого трения  $F_s$ ; сил адгезии  $F_A$  частиц пыли друг к другу и к гранулам фильтра, а также центробежных сил  $F_c$ , которые определяют динамику переноса пыли в местах излома траектории. Сила динамического напора  $F_p = \Delta P \cdot S$  оказывает основное влияние на адсорбер в целом и относительно мала для отдельных частиц пыли и в дальнейшем ею можно пренебречь. Оценки показывают, что при больших  $\Delta P$  эта сила сравнима с весом материала гранул, находящихся в адсорбере. Для отдельных частиц пыли важны силы вязкого увлечения, определяемые, в основном, силой Стокса  $F_s = 3 \pi \mu \delta v$ , где  $\mu$  – динамический коэффициент вязкости;  $\delta$  – диаметр частицы;  $v = V_p - V$  – разность скоростей воздуха и частицы. При превышении силой увлечения силы тяжести  $F_s > F_g$  оказывается возможным перемещение свободной пыли воздухом. В общем случае важно, каким образом взаимно ориентированы все эти силы, что должно в общем случае приводить к усложнению зависимости отмечаемых особенностей от ориентации сил. Чтобы не усложнять рассмотрение, будем в дальнейшем полагать, что указанные силы параллельны. Это допустимо в рассматриваемом случае, так как в адсорбере поток воздуха направлен вниз и совпадает с направлением силы тяжести. Видно, что условия срыва и последующего увлечения воздухом пыли, находящейся на стенках каналов, при ламинарном потоке оказываются наиболее жесткими, так как именно вблизи стенок канала скорость течения воздуха является минимальной, и ее значение близко к нулю. Поэтому для отрыва частиц требуются достаточно большие средние скорости воздуха в ка-

нале  $V$ . В каналах же с переменным сечением, какими являются каналы рассматриваемого фильтра, в местах расширения скорость еще более падает, и реализуются условия, при которых пыль может накапливаться на стенках. Для частиц пыли с относительно большой площадью поверхности необходимо учитывать силы, связанные с разностью давления воздуха вблизи стенки канала и в его центре, которые могут способствовать отрыву частиц и включению их в движение в воздушном потоке. В ламинарном режиме на начальном этапе пылевая фракция движется, ускоряясь по прямолинейному отрезку канала, длина которого составляет около  $(d \cdot h)^{1/2}$ , и на нее, в основном, действует сила увлечения, направленная вдоль канала. Как мы отмечали, ее величина зависит от разницы скоростей воздуха и частицы, поэтому она уменьшается по мере роста скорости последней. Скорость и ускорение частицы связаны интегродифференциальными уравнениями:

$$\vec{V}(\tau) = \vec{V}_0 + A \int_0^{\tau} \vec{\alpha}(t) dt ; \quad (1)$$

$$\vec{\alpha}(t) = \frac{\vec{F}_S}{m} = \frac{18 \mu (\vec{V}_r - \vec{V}(\tau))}{4\delta^2 \rho} , \quad (2)$$

где  $V(\tau)$  – вектор скорости частицы в момент  $\tau$ ;  $A$  – некоторая константа;  $\alpha(t)$  – вектор ускорения частицы, зависящего от времени;  $m$  – масса частицы;  $\rho$  – плотность частицы;  $V_r$  – вектор скорости воздуха в точке  $r$  канала. Для упрощения этого выражения можно ввести некоторую феноменологическую длину свободного пробега частицы данного сорта  $\ell_i$ , которая будет определяться как радиусом и длиной канала, так и размером и плотностью пыли. Тогда  $\tau_i$  будет равно времени жизни частицы  $i$ -го сорта в данном состоянии, и сила  $F_S$  может быть представлена как величина, зависящая лишь от скорости воздуха в канале. Видно, что ускорение возрастает при уменьшении диаметра частицы  $\propto 1/\delta^2$ , и поэтому крупные фракции увлекаются воздухом слабее, чем мелкие, и им требуется большая длина пробега для приобретения той же скорости, что и малым частицам. Отметим, что в относительно длинном канале и при бесконечной длине свободного пробега и те и другие приобретут в конечном итоге в рамках этого подхода одну и ту же скорость, равную скорости воздуха.

Интересные выводы могут быть получены при учете того обстоятельства, что движение частиц пыли не является бесстолкновительным (видимо, этот случай уже реализуется при относительной концентрации пыли в воздухе  $> 1\%$ ). В этом случае возможна передача энергии и импульса от одной фракции частиц другой фракции, отличающейся размерами и скоростью, а также и длиной свободного пробега. Используем известное приближение, которое реализуется в смеси газов с отличающимися молекулярными массами и заключается в равномерном распределении энергии по степеням свободы частиц

с разными размерами и массами. Характерная общая температура  $T^*$  такого газа частиц будет связана с их скоростью переноса, которая возникает под действием потока воздуха. В силу турбулентного движения последнего, а также столкновений частиц со стенками каналов и между собой их движение оказывается трехмерным, и частицы термализуются, приобретая некоторую эффективную температуру. В этом случае они могут удовлетворять известному распределению Максвелла, и их эффективная температура будет определяться выражением:

$$T^* \sim m_i V_i^2 / 3k_B, \quad (3)$$

где  $V_i$  – средняя скорость частиц  $i$ -го сорта;  $k_B$  – константа Больцмана. Тогда скорость частиц оказывается равной

$$V_i \sim (k_B T^* / \pi \delta^3 \rho)^{1/2}. \quad (4)$$

Как видно, в этом случае средняя скорость частиц зависит от их размеров, и это приводит к интересному следствию, которое, видимо, должно проявляться в сепарации частиц по размерам при их переносе в исследуемом фильтре, и что, как показано ниже, действительно наблюдается в эксперименте.

Динамику частиц в области поворота канала определяет центробежная сила  $F_1 = (4/3)\pi\delta^3\rho V^2/R$ , где  $\rho$  – плотность материала, из которого состоят частицы пыли;  $V$  – скорость частицы;  $R$  – радиус канала, который можно приравнять на начальном этапе  $d/2$ . Более крупные частицы, для которых  $F_1 > F_S$ , испытывают соударение со стенками канала, что приводит к появлению поперечной скорости относительно оси канала и к серии последующих столкновений. Учитывая, что стенки канала, построенные из цилиндрических поверхностей, имеют отрицательную кривизну относительно центра канала, возникает эффект, который характерен для бильярда с такими же стенками и который вызывает существенное "запутывание" траекторий и их хаотизацию, вне зависимости от наличия турбулентного движения воздуха.

Отметим, что в общем случае наличие пыли в воздухе, как и в суспензиях, должно приводить к увеличению динамической вязкости смеси в согласии с формулой Эйнштейна [6].

$$\mu_{\text{смеси}} = \mu (1 + (5/2)\beta), \quad (5)$$

где  $\beta$  – объемная доля примеси пыли.

Кроме того, необходимо учитывать, что при наличии в смеси даже нескольких объемных процентов пыли происходит существенное изменение средней плотности смеси по сравнению с плотностью воздуха. Такая воздушно-пылевая смесь остается средой, для которой верны общие уравнения аэродинамики, что приводит к увеличению числа Рейнольдса пропорционально ее плотности  $Re \propto \rho_{\text{смеси}}$ . Это также сказывается на характере движения

воздушно-пылевых масс и приводит к определенным особенностям в их переносе.

## 5. СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ

Отметим, что в указанной геометрии расположения гранул фильтра, отрицательная кривизна проявляется не только для поперечного, но и для продольного движения. При этом в силу запутывания траекторий всем этим частицам оказываются доступными клиновидные области с близким расположением стенок гранул, где и происходит потеря импульса и начинается эффективное собственное структурообразование из пылевидной фракции. Последнее обстоятельство характерно для всех дисперсных систем. Наиболее подвержены этому процессу крупные частицы пыли, которые имеют наименьшую скорость и режим пролета их близок к молекулярному, т.е. длина их свободного пробега превышает характерные размеры канала фильтра. Это приводит к быстрому выбыванию этих частиц из процесса переноса уже на его первых стадиях, что и реализуется в начальной области фильтра. Само же структурообразование [3] обусловлено наличием большой избыточной свободной энергии в дисперсной пылевидной фазе раздробленного материала. В исследуемом случае может происходить связывание частиц путем непосредственных (атомных) или фазовых контактов (см., например, [9]), что и снижает свободную энергию системы. В определенных случаях на начальном этапе могут быть важны и электростатические силы (см., например, [4]). Не останавливаясь на особенностях этого процесса, отметим, что непосредственные контакты характеризуются силой до  $10^{-8}$  Н, фазовые контакты –  $10^{-7}$  Н на один контакт [9]. Этих сил достаточно для создания относительно прочных структур. Как отмечалось выше, первыми в процессе структурообразования начинают принимать участие самые крупные из образующих пыль частиц. На них действуют относительно малые силы, и их скорости в пылегазовой среде также оказываются самыми малыми. Структура, построенная из крупных частиц, является эффективным фильтром для частиц таких же размеров, и через нее возможен перенос воздуха с более мелкими пылевидными фракциями. При этом ввиду уменьшения характерного масштаба структуры центробежные силы оказываются существенно большими, отмеченный критерий выполняется уже для этих более мелких фракций и происходит их включение в структурообразование. По мере роста структуры происходит уменьшение радиуса канала R, по которому переносится воздушно-пылевая смесь. Это приводит к росту сопротивления протеканию воздуха. Конкретная зависимость  $\Delta P$  от R определяется ламинарным или турбулентным характером течения, который для обсуждаемой структуры, видимо, является близким к турбулентному.

## 6. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕНОСА ПЫЛИ

Перенос дисперсной фракции в указанном выше смысле на определенной стадии подобен диффузионному процессу, которому, однако, не может быть приписана зависимость от обычной температуры. Роль эффективной температуры в этом случае, как отмечалось выше, играет кинетическая энергия, деленная на постоянную Больцмана  $k_B$ . Коэффициент диффузии в этом процессе имеет некоторый расчетный смысл. Выпишем формальным образом диффузионные уравнения для зависимости концентрации пыли вблизи границы фильтра и для диффузионного потока J:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}, \quad (6)$$

$$J_i = -D_i \frac{\partial C_i}{\partial x} + C_i V_{Fi}, \quad (7)$$

где C – общая концентрация пыли, которая в общем случае возрастает со временем;  $C_i$  – концентрация пыли i-го сорта; координата x направлена внутрь фильтра; D – общий коэффициент диффузии;  $D_i$  – коэффициент диффузии частиц пыли i-го сорта;  $V_{Fi}$  – скорость переноса частиц пыли i-го сорта под действием обобщенной силы  $F_i$ . Скорость переноса может быть иметь вид (см., например, [10]):

$$V_{Fi} = F_i D_i / k_B T^*, \quad (8)$$

где  $F_i$  – сила увлечения частиц данного сорта, введенная выше. Решение первого уравнения вблизи границы фильтра может быть записано как

$$C(z) = C_{z=0} [1 - \operatorname{erfz}] = C_{z=0} \operatorname{erfcz}, \quad (9)$$

где  $\operatorname{erfcz}$  – "интеграл ошибок" Гаусса;  $z = (3)^{1/2} (x-1) / 2 (Dt)^{1/2}$  для рассматриваемого случая.

Решение второго уравнения можно записать в виде распределения Гаусса для концентрации пыли:

$$C(x) \propto \{Q_0 / (\pi D_i t)^{1/2}\} \exp(-(x-x_0)^2 / 4D_i t), \quad (10)$$

где  $Q_0 = \int C(x,t) dx$ . При этом распределение смещается с указанной скоростью в глубь фильтра, т.е.  $x_0 \sim V_{Fi} t$ .

Зависимость относительного распределения массы пыли, полученная в эксперименте в работе [2], приведена на рис. 3. Она построена по точкам измерения суммарной массы пыли, оказавшейся в контейнерах и секциях адсорбера после окончания эксперимента, с применением метода кубических сплайнов и учетом градиентов распределения массы пыли при переходе между контейнерами и секциями. Общее время продувания воздуха составило около  $3,6 \cdot 10^4$  с.

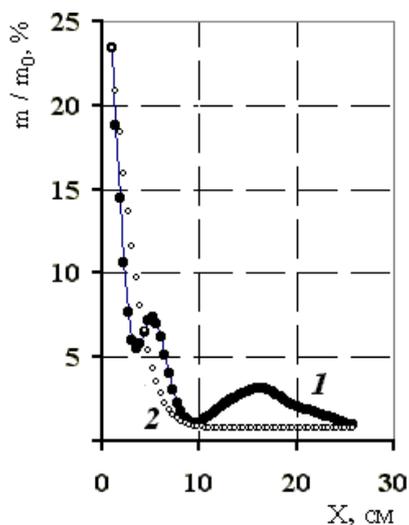


Рис. 3. Распределение относительной пылевой массы в зависимости от расстояния от поверхности адсорбера (1 - экспериментальные данные в процентах от полной массы пыли, введенной в адсорбер; 2 - расчет начального участка по уравнению (7))

Из данных (см. рис. 3) видно, что вблизи поверхности адсорбера распределение пылевой массы хорошо описывается диффузионным приближением (уравнение (7)) с некоторым общим коэффициентом диффузии  $D$ . В этой области, видимо, основной вклад в массовый состав дают частицы максимальных размеров. Они заполняют структурные пустоты фильтра, и развивающийся затем структурообразующий процесс приводит к участию в нем частиц меньших размеров и существенному уменьшению эффективного радиуса  $R$  каналов фильтра. Видимо, именно этот процесс оказывается главной причиной увеличения сопротивления потоку воздуха, который должен проявляться как в ламинарном, так и в турбулентном пределах.

Как следует из рис. 3, в глубине адсорбера имеются два дополнительных максимума масс, которые могут быть связаны с переносом определенных фракций пыли, имеющих меньшие размеры частиц, чем в начальной области. Частицы, которые имеют малые размеры и для которых  $F_1 < F_s$ , оказываются вынесенными в глубь адсорбера, и их перенос регулируется сложным соотношением относительно свободного перемещения с возможностью агрегации на поверхности гранул фильтра и с последующим повторным увлечением потоком воздуха. Такое движение в некотором смысле аналогично переносу газовых фракций с различающимися молярными массами через газовую хроматографическую колонку [11]. В этом случае легкие фракции обладают большей скоростью переноса и проходят через нее быстрее. Именно такой характер переноса и демонстрирует экспериментальный результат [2]. Эти максимумы были промоделированы гауссовыми распределениями.

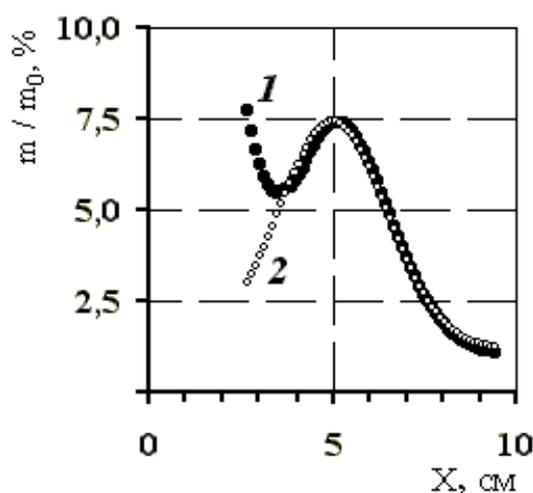


Рис. 4. Распределение массы пыли вблизи первого пика: 1 - экспериментальные данные; 2 - моделирование

На рис. 4 изображен вид первого пика относительного распределения массы пыли, полученного по экспериментальным данным, и расчетная кривая, которая хорошо аппроксимируется решением диффузионного уравнения со следующими коэффициентами:

$$C_1(x) = C_{01} + \frac{A_1}{w_1 \sqrt{\pi/2}} \exp\left(-2 \left(\frac{x-x_{01}}{w_1}\right)^2\right), \quad (11)$$

где  $C_{01} = 1,17$  %;  $A_1 = 24,12$  % см;  $x_{01} = 4,91$  см;  $w_1 = 3,0725$  см.

На рис. 5 представлен вид второго пика относительного распределения массы пыли, полученного по экспериментальным данным, и расчетная кривая, которая описывается следующим выражением:

$$C_2(x) = C_{02} + \frac{A_2}{w_2 \sqrt{\pi/2}} \exp\left(-2 \left(\frac{x-x_{02}}{w_2}\right)^2\right), \quad (12)$$

где  $C_{02} = 0,9579$  %;  $A_2 = 18,422$  % см;  $x_{02} = 16,341$  см;  $w_2 = 6,8875$  см.

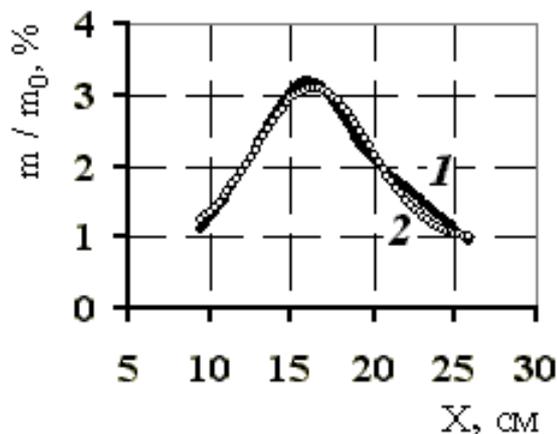


Рис. 5. Распределение массы пыли вблизи второго  
ника: 1 – экспериментальные данные;  
2 – моделирование

Распределения имеют отличающиеся скорости переноса, а также эффективные температуры и смещаются под действием сил увлечения воздухом. Из формул, приведенных в данной работе, можно найти взаимосвязь между относительными размерами частиц, формирующих первый и второй пылевые максимумы, однако при этом необходимо сделать дополнительные предположения о характере распределения скоростей и приближений для механизмов переноса, которые будут при этих оценках использованы. В рамках диффузионного приближения получены значения коэффициента диффузии для начального участка  $D \approx 3,8 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2/\text{с}$ . Для первого максимума распределения пыли коэффициент диффузии оказался равным  $D_1 \approx 3,29 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2/\text{с}$  и для второго –  $D_2 \approx 1,647 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2/\text{с}$ . Видно, что эти коэффициенты имеют значения существенно более меньшие – на 3-4 порядка, чем коэффициент диффузии атомов кислорода в воздухе при нормальных условиях, и соответствуют диффузионному процессу в воздушно-пылевой смеси.

## 7. ОБСУЖДЕНИЯ И ВЫВОДЫ

Как показано в данной работе, перенос пылевых масс в адсорбере регулируется достаточно сложными физическими процессами, которые включают в себя особенности, связанные с динамикой воздушного потока, воздушно-пылевых смесей и взаимодействий пылевых частиц между собой и с элементами структуры фильтра. Введенные в работе физические критерии оценки для характерных механизмов переноса пылевых фракций в зависимости от их размеров, скорости движения и размеров каналов, позволяют получить количественные характеристики фильтрующих элементов для эффективной очистки газов от высокодисперсной пыли определенного размера. Показаны физические механизмы, приводящие к особенностям распределения пылевой массы при ее проникновении в адсорбер.

Интересно, что в случае динамического удара воздуха возможен процесс разрушения указанной пылевой структуры, когда силы динамического напора превышают силы, определяющие ее прочность. Это еще один из критериев стабильности системы. При этом возникает увлечение в движение крупных фрагментов пылевой структуры, и они, сталкиваясь со стенками, оказывают иной, так называемый «пескоструйный», эффект, когда кинетическая энергия частиц оказывается больше работы, необходимой

для преодоления сил адгезии. Фильтр очищается от пылевых отложений, которые там накопились. В результате этот процесс может приводить к резким выбросам пыли из адсорбера. Этот вид саморазрушения структур может также ограничивать уменьшение каналов фильтра при эксплуатации в режиме постоянного потока воздуха, когда при мере сужения каналов возникает большой градиент давления воздуха и существенно вырастает его скорость. Это приводит к достижению указанного критерия стабильности системы, и дальнейшее «зарастание» каналов прекращается.

Работа выполнена в рамках Программы проведения фундаментальных исследований по атомной науке и технике ННЦ ХФТИ.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Л.И. Федорова, П.Я. Полтинин, Л.В. Карнацевич, М.А. Хажмурадов, С.О. Лысцов, В.В. Тесленко, Ю.Л. Коврижкин. Влияние усадки и механического износа адсорбента на аэродинамические параметры угольных адсорберов типа АУ-1500 систем вентиляции АЭС // *Атомная энергия*. 1999, т.82, в. 4, с. 279–283.
2. 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 (84)»*. 2003, №6, с. 65–70.
3. Н.Б. Урьев. Физико-химическая динамика дисперсных систем // *Успехи химии*. 2004, т. 79, №1, с. 39–62.
4. Е.В. Фортов, А.Г. Храпак, В.И. Храпак и др. Пылевая плазма // *УФН*. 2004, т. 174, №5, с. 495–544.
5. Л.Г. Лойцянский. *Механика жидкости и газа*. М.: «Наука», 1987, 840 с.
6. Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. *Механика сплошных сред*. М.: ГИТТЛ, 1953, 788 с.
7. Н.З. Френкель. *Гидравлика*. М.: «Госэнергоиздат», 1956, 456 с.
8. А.М. Колмогоров. О логарифмически нормальном распределении размеров частиц при дроблении // *ДАН СССР*. 1941, т. 31, №2, с. 99–101.
9. Л.А. Ребиндер. *Избранные труды. Поверхностные явления в дисперсных системах. Физико-химическая механика*. М.: «Наука», 1979, 244 с.
10. Дж.П. Старк. *Диффузия в твердых телах*. М.: «Энергия», 1980, с. 240.
11. А. Кейлеманс. *Хроматография газов*. М.: ИЛ, 1959, 320 с.

## **ОСОБЛИВОСТІ ПРОЦЕСІВ ПЕРЕНОСУ І СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ ЗА УЧАСТЮ ДИСПЕРСНОЇ ВУГІЛЬНОЇ ФРАКЦІЇ В АДСОРБЦІЙНИХ ФІЛЬТРАХ СИСТЕМ ВЕНТИЛЯЦІЇ АЕС**

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

Проведено дослідження переносу вугільної повітряно-пилової суміші в гранулярній структурі адсорбційного фільтра при надходженні її з приповерхнього шару. З'ясовано фізичні причини розподілу мас пилу по глибині адсорбера, що приводять до аномального росту його аеродинамічного опору. Отримано кількісні характеристики фільтруючих елементів, необхідні для ефективного очищення повітря від високодисперсного пилу.

## **FEATURES OF PROCESSES OF CARRY AND STRUCTURIZATION WITH PARTICIPATION OF DISPERSE COAL FRACTION IN ADSORBENT FILTERS OF NPP's VENTILATION SYSTEMS**

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

The research of carry of a coal air - dust mix in granulation to structure of adsorbent filter is carried out at receipt of a mix from a surface layer. The physical reasons of distribution of weights of a dust on depth of the adsorber, resulting to abnormal growth of his aerodynamic resistance are found out. The quantitative characteristics of filtering elements necessary for effective clearing of air from very disperse dust are received.