

# ВЛИЯНИЕ ФРАКЦИОННОГО СОСТАВА НА ПЕРЕНОС ПЫЛЕВЫХ МАСС В ВОЗДУШНЫХ ФИЛЬТРАХ АЭС И ИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ

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

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

Проведено исследование переноса угольных пылевых масс в гранулированной среде воздушного фильтра в условиях, близких по аэродинамике к существующим на АЭС. Показано, что изменение фракционного состава пыли в сторону уменьшения ее частиц существенно изменяет распределение пылевых масс в фильтре и его аэродинамические показатели. Получены количественные данные, характеризующие перенос пылевых масс и аэродинамическое сопротивление в исследованном пределе.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В проведенных ранее исследованиях на макете вертикально расположенного адсорбера, по аэродинамическим качествам аналогичного угольным адсорберам АЭС, было обнаружено резкое, более чем в 20 раз, возрастание аэродинамического сопротивления [1] при критических пылевых нагрузках, характерных для многолетней работы адсорберов на станции. Ключевая роль пыли в ухудшении аэродинамических показателей была подтверждена и при исследовании вскрытых адсорберов АЭС, в которых, как оказалось, за несколько лет эксплуатации накапливались угольные пылевые частицы различного размера, что и приводило к резкому возрастанию аэродинамического сопротивления (к выходу адсорберов из строя). В то же время оставалась неясной взаимосвязь наблюдаемого явления с фракционным составом угольной пыли, представляющей собой в основном остатки находившихся вблизи поверхности адсорбера гранул адсорбента, разрушенных в процессе истирания турбулентным потоком воздуха. Образующаяся угольная пыль захватывалась воздушным потоком и перемещалась внутрь фильтра. В эксперименте [1] пылевая смесь, вводившаяся в макет адсорбера, получалась принудительным размолотом угольных гранул адсорбента в малоскоростной цилиндрической мельнице и была, по нашей оценке, по фракционному составу аналогична той, которая возникала в приповерхностном слое фильтра при его эксплуатации на АЭС. При дальнейшем анализе экспериментальных данных в [2] был обнаружен ряд максимумов пылевой массы, располагавшихся как вблизи поверхности, так и в глубине адсорбера. Анализ образования пыли в реальных адсорберах и ее динамики, учитывающий при переносе частиц угольной пыли воздушным потоком как взаимодействие частиц с гранулами адсорбента, так и их взаимодействие друг с другом, позволил объяснить механизм появления этих пылевых максимумов [2]. Было выяснено, что вблизи поверхности пылевой сгусток создается частицами различных размеров, причём его зарождение инициируют наиболее крупные частицы. Именно они способствуют процессу структурообразования в узком приповерхностном слое плотной, практически монолитной, пылевой массы, состоящей из частиц

всех размеров, что и является причиной последующего экспоненциального возрастания аэродинамического сопротивления адсорбера. Каждый из пылевых максимумов, расположенных в глубине адсорбера, был образован частицами приблизительно одного размера. При этом фракции пыли меньших размеров образуют сгустки, расположенные на большем расстоянии от поверхности адсорбера, чем частицы больших размеров. Под действием воздушного потока эти пылевые сгустки перемещаются в глубину фильтра и с течением времени могут его покинуть. В [3] было установлено существенное изменение характера поглощения в фильтрах изотопов различных элементов, обусловленное наличием обнаруженных пылевых сгустков, приводивших к избирательному поглощению отдельных изотопов на пылевых частицах определенных размеров.

Исходя из отличия в характере переноса частиц пыли больших и малых размеров и различия, действующих на них сил, установленного в [2], мы предположили, что изменение направления действия силы тяжести по отношению к направлению распространения воздушного потока может привести к существенному изменению в распределении пылевых масс внутри фильтра и улучшению его аэродинамических характеристик. Проведенные аэродинамические испытания на макете горизонтально расположенного фильтра [4] позволили установить, что его аэродинамическое сопротивление увеличивается всего в 1,7 раза против ~ 20 раз в вертикальном фильтре при аналогичных предельных значениях массовой доли введенной пыли. Подобный эффект объясняется тем, что крупные частицы, наиболее способствующие процессу структурообразования неподвижных приповерхностных сгустков пыли, смещаются под действием силы тяжести к низу фильтра и не могут инициировать создание вблизи поверхности равномерно распределенного запирающего слоя. Полученные результаты позволяют предположить, что изменение фракционного состава пыли в область малых размеров, менее 1 мкм, должно существенно уменьшить влияние угольной пылевой фракции на аэродинамическое сопротивление вертикального фильтра. Данная работа посвящена изучению особенностей распределения мелкой (менее 1 мкм) угольной пылевой фракции по длине

вертикального адсорбера и ее влиянию на аэродинамическое сопротивление фильтра.

## 2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Вводимая в макет пыль в этом исследовании создавалась путем размола гранул угольного адсорбента СКТ-3 на высокооборотной центробежной мельнице, в результате чего распределение пылевых частиц по размерам было сдвинуто в область меньших размеров по сравнению с [1].

Макет вертикального фильтра (рис.1), в котором проводились исследования, был разделен крупноячеистыми сетками на 10 секций. Над ними расположен контейнер-источник пыли, в котором смесь пыли с адсорбентом (не более 1,5 % пыли от массы адсорбента) возобновлялась при каждом эксперименте. Секции фильтра заполнялись однородными крупными гранулами адсорбента СКТ-3 (длина  $\sim 3,2$  мм, диаметр  $\sim 1,8$  мм).

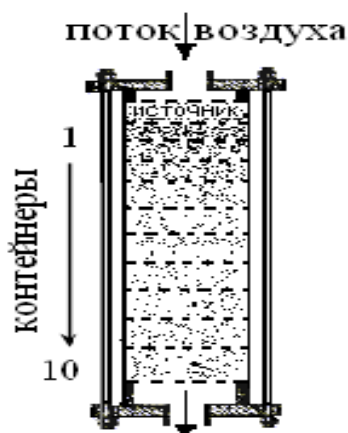


Рис.1. Схематический вид макета фильтра, на котором проводились исследования

По разности масс контейнера-источника до и после эксперимента определялась масса пыли, поступившая в фильтр. После окончания исследований проводилось измерение массы пыли, накопившейся в каждом из контейнеров. Используются следующие обозначения:  $M_0$  - масса адсорбента во всем адсорбере;  $M_i$  - масса адсорбента в каждой из секций ( $i$  - от 1 до 10);  $m_0$  - суммарная масса пыли, введенной в фильтр, после очередного эксперимента;  $m_i$  - масса пыли, осевшей в секциях к концу исследований,  $h$  - длина фильтра. Разность давлений на входе и выходе фильтра измерялась водяным манометром.

## 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

### 3.1. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПЫЛЕВОЙ ФРАКЦИИ ПО ДЛИНЕ ФИЛЬТРА

Для вертикально расположенных адсорберов на рис.2 приведены результаты настоящего исследования по распределению конечных значений массовой доли пыли по длине адсорбционного слоя (график 1) и усредненные данные из [1] (график 2).

Как видно из графиков (см. рис.2), в случае мелкодисперсной фракции (график 1) в узком 2-сантиметровом слое вблизи поверхности имеется уплотнение пылевого слоя с  $m_i/(M_i+m_i)=18,75$  %. Явные сгустки пылевых масс, характерные для слу-

чая крупнодисперсной фракции (см. график 2 на рис.2), в данном эксперименте не были обнаружены.

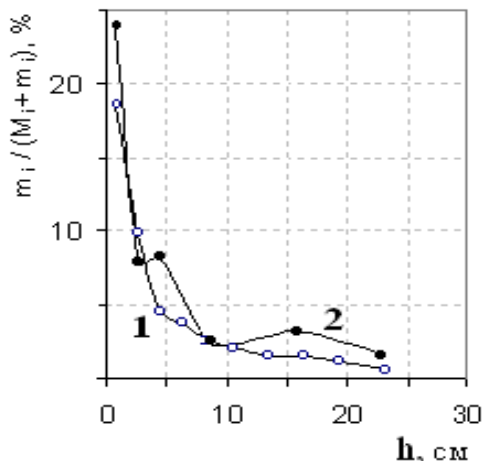


Рис.2. Распределение массовой доли пыли по длине слоя адсорбента в фильтре в конце всей серии исследований; размер частиц угольной пыли: 1 - менее 1 мкм, 2 - менее 10 мкм;  $i$  - от 1 до 10

Массовая доля пыли резко падает в глубину адсорбера и на расстоянии от поверхности около 5 см уменьшается приблизительно в 4 раза. Ход такой зависимости хорошо аппроксимируется выражением  $m_i/(M_i+m_i)=18,75 \cdot (1-\text{erfz})$ , где erfz - "интеграл ошибок" Гаусса [2];  $z = (3)^{1/2} (h-0,89286) / 2 (Dt)^{1/2}$ ;  $h$  - расстояние от поверхности фильтра в его глубину в направлении потока воздуха (график 2 на рис. 3);  $D$  - эффективный коэффициент диффузии;  $t$  - время проведения эксперимента.

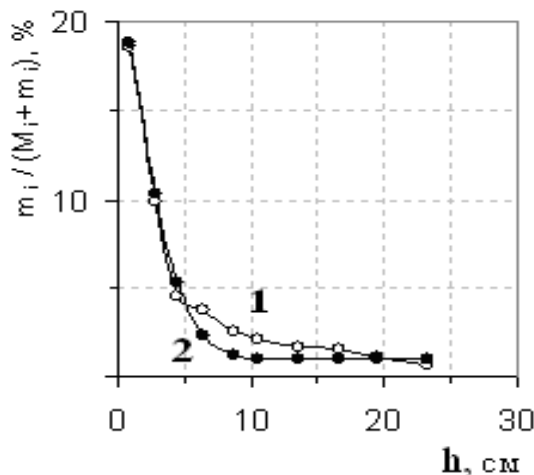


Рис.3. Распределение массовой доли пыли в фильтре по длине слоя адсорбента (1 - эксперимент, 2 - аппроксимация)

Экспериментальные данные (см. график 1 на рис.3) показывают плавное уменьшение массовой доли пыли до 0,6 % на выходе из фильтра.

Масса пыли, вышедшая из фильтра с потоком воздуха, определялась по разности предельной массы пыли, введенной в адсорбер, и суммарной массы пылевой фракции, осевшей в секциях, и составила 61 % от общей массы пыли. При эксперименте с крупнодисперсной фракцией [1] эта доля составила 44 %.

### 3.2. ВЛИЯНИЕ ФРАКЦИОННОГО СОСТАВА УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ НА АЭРОДИНАМИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ФИЛЬТРА

В эксперименте исследовалась зависимость  $\Delta P$  - аэродинамического сопротивления от  $J$ -объемного потока воздуха для возрастающих значений  $m_0/(M_0+m_0)$  - массовой доли пыли, введенной в фильтр.

На рис.4 выборочно приведены для мелко- и крупнопылевой фракции графики зависимости  $\Delta P$  от  $J$  при различных значениях массовой доли пылевой фракции. Из сравнительного анализа приведенных результатов следует, что по мере увеличения количества вводимой в фильтр пыли сопротивление обоих фильтров вначале растёт синхронно, приблизительно до 7 % по  $m_0/(M_0+m_0)$  (см. рис. 4, графики 5 и 2), затем рост сопротивления фильтра, в который вводилась мелкопылевая фракция, существенно замедляется по сравнению с сопротивлением фильтра, в который поступала крупная пыль (см. рис.4, графики 8 и 3, 9 и 6). Используя полученную ранее эмпирическую зависимость  $\Delta P$  от  $J$  [1] и графики на рис.4, для сопротивления 6000 Па были вычислены значения сопротивления -  $\Delta P^*$ , приведенные к постоянному потоку -  $J^*=15 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

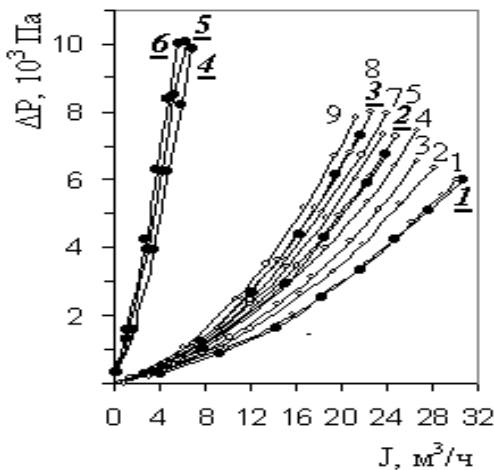


Рис.4. Зависимость аэродинамического сопротивления фильтра от объёмного потока воздуха для массовой доли пылевой фракции, введенной в фильтр, %. Размер частиц угольной пыли: 1-9 - менее 1 мкм, 1-6 - менее 10 мкм;  
 ○ - 1 (0), 2 (0,2), 3 (1,4), 4 (4,3), 5 (5,8), 6 (6,7), 7 (7,4), 8 (8,4), 9 (9,3);  
 ● - 1 (0), 2 (5,9), 3 (6,7), 4 (8,8), 5 (9,1), 6 (9,2)

На рис. 5 показана зависимость приведенного аэродинамического сопротивления  $\Delta P^*$  от массовой доли пылевой фракции, поступившей в фильтр (график 1 - для мелкопылевой, график 2 - для крупнопылевой фракций). Сравнение данных на рис.5, полученных для мелко- и крупнопылевой фракции, введенной в фильтр, показывает, что приблизительно до 7 % по  $m_0/(M_0+m_0)$  сопротивление в обоих случаях аналогично. Далее, по мере увеличения массовой доли пылевой фракции, поступающей в фильтр, сопротивление фильтра, в который вводится

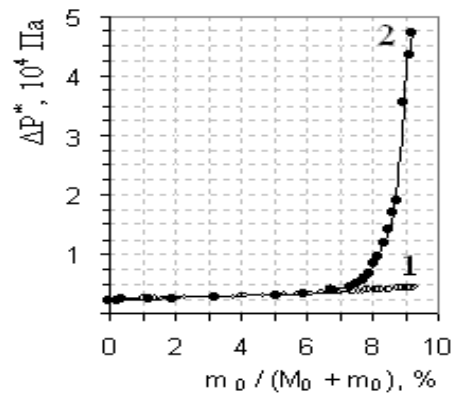


Рис.5. Зависимость аэродинамического сопротивления, приведенного к потоку  $J^*=15 \text{ м}^3/\text{ч}$ , от массовой доли угольной пыли, введенной в фильтр

крупная угольная пыль (см. график 2 на рис.5) резко возрастает более чем в 20 раз. Сопротивление фильтра, насыщаемого мелкой пылевой фракцией, продолжает возрастать линейно, достигая при массовой доле пыли 9,3 % всего 2-кратного превышения начального уровня, что составляет примерно 4500 Па. К концу эксперимента сопротивление при введении крупнопылевой фракции в 10 раз превышает сопротивление для случая мелкопылевой фракции (см. графики 1, 2 на рис.5).

Из сравнительного анализа данных, приведенных на рис.2 (зависимость 1) и рис.5 (зависимость 1), следует, что пылевой сгусток в узком слое вблизи поверхности при эксперименте с мелкой пылевой фракцией, вводимой в фильтр, не является плотной, практически не проницаемой для воздуха пылевой структурой, как для крупнопылевой фракции. Именно поэтому отсутствует экспоненциальный рост аэродинамического сопротивления, который приводит к потере пропускной способности фильтров для воздуха и выходу их из строя [1].

Отметим, что в эксперименте с мелкопылевой фракцией относительное количество пыли, вынесенной из фильтра потоком воздуха, приблизительно в 1,5 раза превышает массу пыли, прошедшей через адсорбер в исследованиях с крупнопылевой фракцией.

### 4. ВЫВОДЫ

В экспериментах с мелкопылевой угольной фракцией выяснилось, что смещение фракционного состава пыли в область малых размеров частиц устранило наблюдавшийся ранее экспоненциальный рост аэродинамического сопротивления, возникавший на стадии больших интегральных пылевых нагрузок, который приводил к выводу из строя эксплуатировавшихся на АЭС адсорберов. В исследованном случае аэродинамическое сопротивление медленно растет, следуя линейному закону. При увеличении массовой доли введенной в фильтр пыли до 9,3 % аэродинамическое сопротивление увеличилось всего в 2 раза и составило примерно 4500 Па, тогда как в случае крупнопылевого аэрозоля увеличение было более чем в 20 раз. Вид распределения накопленной в адсорбере массы пыли по

его длине имеет один максимум, расположенный вблизи поверхности адсорбента.

Полученные результаты можно объяснить, исходя из физических механизмов, влияющих на перенос пыли в адсорбере. Согласно представлениям, развитым в [2], перенос пыли - это сложный процесс, сопровождающийся кроме упругих и неупругими столкновениями частиц с гранулами адсорбента, что приводит к потере кинетической энергии, которая затем снова приобретает при последующем взаимодействии с аэрозольным потоком. Движение аэрозольного потока осуществляется по сложной системе каналов между цилиндрическими гранулами угольного адсорбента размером в несколько миллиметров. Наличие полостей между гранулами, в которые почти не проникает воздушный поток или в которых его скорость мала, приводит к реализации условий накопления в них частиц пыли самого крупного размера уже вблизи поверхности фильтра. Частицы меньших размеров частично оседают на этой новой крупнопылевой среде, связывая ее, но в основном переносятся на более удаленное расстояние в глубину фильтра, создавая предпосылки к возникновению следующего максимума пылевой массы, обязанного своим появлением тому обстоятельству, что в случае равенства масс реализуется максимум обмена энергией и импульсом между упруго сталкивающимися частицами. Частицы еще меньших размеров частично проникают через эти концентрационные максимумы пыли и затем создают свой, отстоящий от первых на некотором расстоянии. Все эти максимумы, кроме первого, перемещаются по адсорберу с малой собственной дрейфовой скоростью в направлении потока воздуха [2]. Так как в исследованном случае пыль была обогащена частицами малых размеров, то в фильтре за время эксперимента не создавалось условий, при которых вблизи его поверхности накапливался мало проницаемый для аэрозоля слой выпавших крупных пылевых частиц. Возникающий в случае переноса крупнопылевой фракции пыли плотный, слабо проницаемый для воздуха барьер, который образует в

процессе структурообразования, происходящего вблизи поверхности адсорбента, в данном случае при мелко фракционном составе пыли не достигал той плотности, которая бы полностью препятствовала прохождению воздушно-аэрозольной смеси. Это приводило к тому, что внутри адсорбера на протяжении всего эксперимента сохранялась достаточно большая скорость воздушного потока, что способствовало быстрому выносу из него пылевых частиц малых размеров. Именно поэтому максимумы частиц малых масс, наблюдавшиеся ранее, в данном случае не были обнаружены.

В результате проведенных исследований выяснено, что смещение фракционного состава пыли в область малых размеров частиц оказывает существенное влияние на характер переноса пылевых угольных масс в угольных адсорберах и на их аэродинамические характеристики, приводя к возможности их более продолжительного срока эксплуатации.

## ЛИТЕРАТУРА

1 И.М. Неклюдов, Л.И. Фёдорова, П.Я. Полтинин, Л.В. Карнацевич // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»*. 2003, № 6, с. 65-70.

2. О.П. Леденёв, И.М. Неклюдов, П.Я. Полтинин, Л.И. Федорова // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»*. 2005, № 3, с. 115-121.

3. О.П. Леденёв, И.М. Неклюдов, П.Я. Полтинин, Л.И. Фёдорова // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»*. 2006, № 4, с. 164-168.

4. И.М. Неклюдов, Л.И. Фёдорова, П.Я. Полтинин, О.П. Леденёв // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»*. 2007, № 6, с. 82-88.

*Статья поступила в редакцию 04.12.2008 г.*

## ВПЛИВ ФРАКЦІЙНОГО СКЛАДУ НА ПЕРЕНОС ПИЛОВИХ МАС У ПОВІТРЯНИХ ФІЛЬТРАХ АЕС І ЇХНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

*І.М. Неклюдов, О.П. Леденёв, Л.І. Федорова, П.Я. Полтинін*

Проведено дослідження переносу вугільних пилових мас у гранульованому середовищі повітряного фільтра в умовах, близьких по аеродинаміці до існуючих на АЕС. Показано, що зміна фракційного складу пилу в бік зменшення її часток істотно змінює розподіл пилових мас у фільтрі і його аеродинамічні показники. Отримано кількісні дані, що характеризують перенос пилових мас і аеродинамічний опір в дослідженій межі.

## INFLUENCE OF A FRACTIONAL COMPOSITION ON TRANSPORTING OF DUST MASSES IN AERIAL FILTERS NPP's AND THEIR CHARACTERISTIC

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

Research of transportation of coal dust masses in the granulated environment of the air filter in the conditions corresponding the aerodynamics existing on NPP's is executed. It is shown, that diminution of the size of particles of a coal dust, leads to essential change of allocation of dust masses in the filter and its aerodynamic parameters. The quantitative data describing transporting of dust masses and an aerodynamic resistance of the filter in the explored limit, are gained.