

УДК 621.3.035.82/311.22

## ИЗУЧЕНИЕ СОВМЕСТНОГО ВЛИЯНИЯ ОСАЖДЕНИЯ ЧАСТИЦ ПРИ ДЕЙСТВИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ И ФИЛЬТРОВАНИЯ

*Д.С. Процко, С.Ю. Панов, С.В. Лавров, А.С. Белозерцев*

Приведены результаты теоретического и экспериментального исследования перспектив применения металлических фильтровальных перфорированных перегородок для очистки отходящих газов тепловых электростанций. Особое внимание уделено совместному действию фильтрования и электрического поля. Определено влияние электростатического поля на важнейшие эксплуатационные характеристики фильтров – эффективность улавливания и гидравлическое сопротивление. Показано, что при определенных значениях напряженности электростатического поля эффективность улавливания частиц дисперсной фазы увеличивается в несколько раз по сравнению с процессом фильтрования без наложения электростатического поля. Отмечено, что электростатический эффект способствует более быстрому формированию элементарного слоя из осажденных частиц, так называемого автофильтра. По результатам экспериментальных исследований предложен способ модернизации действующих электрофильтров электростанций.

*Ключевые слова:* очистка газов; отходящие газы тепловых электростанций; перфорированная металлическая фильтровальная перегородка; фильтрация.

---

## ЭЛЕКТР ТАЛААСЫНЫН ЖАНА ЧЫПКАЛООНУН БӨЛҮКЧӨЛӨРДҮН ЧӨГҮҮСҮНӨ ТИЙГИЗГЕН БИРГЕЛЕШКЕН ТААСИРИН ИЗИЛДӨӨ

*Д.С. Процко, С.Ю. Панов, С.В. Лавров, А.С. Белозерцев*

Макалада Жылуулук электр станцияларынан чыккан газдарды тазалоо үчүн чыпкалоочу металл тешиктүү тосмолорду колдонуунун келечегине теориялык жана эксперименталдык изилдөөнүн натыйжалары келтирилген. Чыпкалоонун жана электр талаасынын биргелешкен таасирине өзгөчө көңүл бурулат. Электростатикалык талаанын чыпкаларынын эң маанилүү эксплуатациялык мүнөздөмөлөрүнө – чогултуу натыйжалуулугуна жана гидравликалык каршылыгына тийгизген таасири аныкталган. Электростатикалык талаанын чыңалуусунун белгилүү бир маанилеринде дисперстүү фазадагы бөлүкчөлөрдү кармоонун натыйжалуулугу электростатикалык талаанын салбастан чыпкалоо процессине салыштырмалуу бир нече эсе жогорулай тургандыгы көрсөтүлгөн. Электростатикалык таасир авточыпка деп аталган чөкмө бөлүкчөлөрдүн элементардык катмарынын тезирээк пайда болушуна көмөктөшөрү белгиленген. Экспирименталдык изилдөөлөрдүн натыйжалары боюнча электр станцияларынын иштеп жаткан электр чыпкаларын модернизациялоо методу сунушталууда.

*Түйүндүү сөздөр:* газ тазалоо; Жылуулук электр станцияларынан чыккан газдар; тешиктүү металл чыпкалоочу тосмо; чыпкалоо.

---

## STUDY OF THE COMBI EFFECT OF PARTICLE DEPOSITION FROM ELECTRIC PRECIPITATION AND FILTRATION

*D.S. Protsko, S.Yu. Panov, S.V. Lavrov, A.S. Belozertsev*

The results of a theoretical and experimental study of the prospects for the use of metal filter perforated partitions for cleaning waste gases of thermal power plants are presented. Special attention is paid to the joint action of filtration and electric field. The influence of the electrostatic field on the most important operational characteristics of the filters – the trapping efficiency and hydraulic resistance – has been determined. It is shown that at certain values of the electrostatic field strength, the efficiency of catching particles of the dispersed phase increases several times compared to the filtration process without applying an electrostatic field. It is noted that the electrostatic effect contributes to a faster

formation of an elementary layer of deposited particles, the so-called autofilter. Based on the results of experimental studies, a method for upgrading existing electric filters of power plants is proposed.

*Keywords:* gas cleaning; waste gases of thermal power plants; perforated metal filter; filtration.

В настоящее время значительное количество энергии из органического топлива получают его сжиганием, что приводит к поступлению продуктов горения в окружающую среду. При этом тепловые электростанции выбрасывают в атмосферу около 20 % от общего количества всех вредных отходов промышленного сектора экономики [1–3].

Особенно это актуально для хозяйственных структур, подведомственных Министерству обороны Российской Федерации, использующих, в основном, автономные установки теплоэнергетики [4].

По данным Департамента эксплуатационного содержания и обеспечения, сегодня коммунальными услугами (ДЭС и ОКУ) МО РФ используется более 1000 дизельных электростанций и примерно 850 котельных, из которых до 88 % работают на твердом топливе (каменные и бурые угли низкого качества) и жидком топливе (высоковязкие сернистые обводненные мазуты, дизельное топливо). Они существенно влияют на окружающую среду района их расположения и на состояние биосферы в целом.

Поэтому чрезвычайную актуальность приобретает проблема повышения коэффициента использования топлива, и, особенно, улучшения экологического аспекта работы котельных и дизельных электростанций за счет снижения объема вредных выбросов и, тем самым, уменьшения вредного воздействия на окружающую среду.

Одними из самых дорогостоящих газоочистных сооружений на предприятиях промышленной энергетики являются электрофильтры, зачастую работающие в высокотемпературных и агрессивных средах, способствующих быстрому износу основных рабочих частей – электродов (коронирующих, осадительных), а также систем регенерации (ударный механизм) [5].

В зависимости от особенностей работы действующих электрофильтров, возможно выполнение нескольких вариантов реконструкции [6–8]. Наиболее приемлемым является комбинированный аппарат типа электрофильтр – рукавный фильтр [9, 10]. Это может быть как полное перевооружение, когда в корпусе электрофильтра вместо электродов помещаются опорные решетки и фильтровальные элементы, а также система регенерации, чаще пневмоимпульсная. Может использоваться и комбинированный вариант (рисунок 1), связанный с использованием части из рабочих секций существующего электрофильтра в качестве предварительного осадителя и зарядника частиц, с применением для последующих секций конструктивных решений, характерных для рукавных фильтров..

Для обеспечения обеспыливания при высоких температурах был использован перспективный фильтровальный материал – перфорированные металлические фильтровальные перегородки (рисунок 2), отверстия которых получают фотоэлектрохимической обработкой тонколистового металла.

Перфорированная металлическая фильтровальная перегородка обладает гладкой поверхностью и равномерной структурой, что обеспечивает осаждение пыли на поверхности материала. Для этого вида выделения пыли, наряду с характеристиками пылегазового потока, на степень очистки в значительной степени влияют диаметр и форма отверстий, а также расстояние между отверстиями.

Равномерное распределение отверстий с фиксированными диаметрами позволяют более корректно отображать гидродинамические характеристики материала, в отличие от фетровых или тканевых фильтровальных материалов, для которых характерно выделение пыли в толще материала (глубинная фильтрация) с непрерывно меняющимся расположением и размером пор.

Данный фильтровальный материал наряду с высокой предельно допустимой тепловой нагрузкой по сравнению с другими фильтрами, имеет дополнительно ряд следующих преимуществ: низкие потери напора, простую регенерацию, лёгкость обработки и высокий срок службы.

Учитывая, что перфорированные металлические фильтровальные перегородки (МФП), несмотря на перспективность, не нашли ещё широкого применения в системах промышленного пылеулавливания, представляет интерес изучение фильтровальных свойств и условий оптимальной эксплуатации.

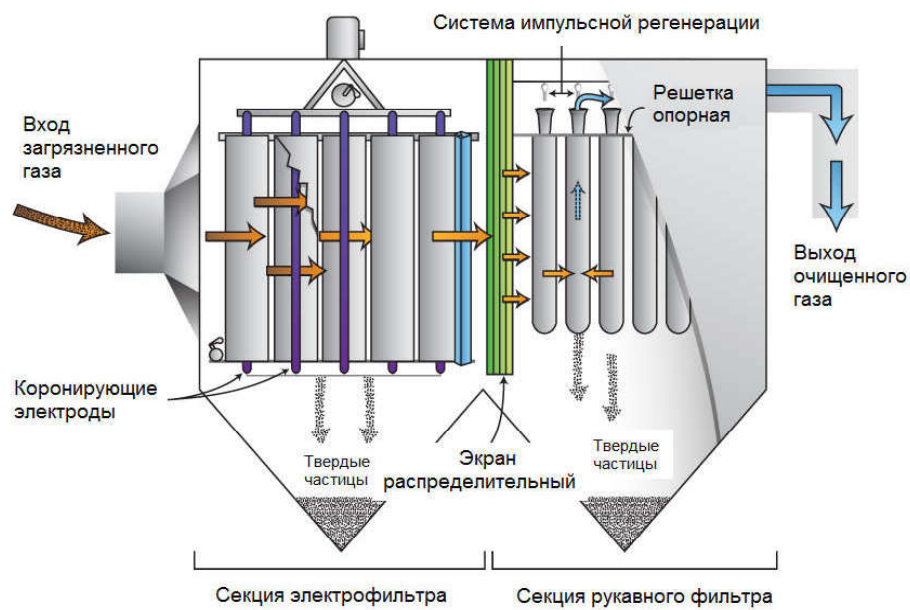


Рисунок 1 – Модернизация электрофильтра в комбинированный фильтр

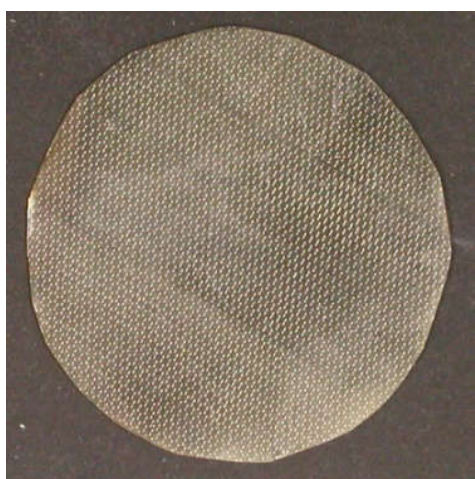


Рисунок 2 – Микрофотография поверхности перфорированной металлической фильтровальной перегородки

В частности, изучение совместного влияния осаждения частиц при действии электрического поля и фильтрации.

Для определения влияния действия электрического поля на потерю давления, фильтрационные перфорированные перегородки были подвергнуты воздействию высокого напряжения. В первом случае статическое электрическое поле создавалось подключением от генератора высокого напряжения непосредственно к фильтровальной перегородке (рисунок 3, а). Во втором случае, в качестве источника ионизации – зарядника используется электрод, помещенный в камеру загрязненного газа (рисунок 3, б).

В качестве источника электрического поля использовался генератор высокого напряжения с характеристиками: входное напряжение 220 В; выходное напряжение 50 кВ. С включением в цепь сопротивления, напряжение понижалось до значений: 35, 30, 25, 20 кВ. Для подачи постоянного напряжения служил выпрямитель.

На рисунке 4 показана зависимость, отражающая влияние статического заряда перфорированной перегородки на перепад давления при скорости фильтрации 0,0125 м/с. На графиках видно, что образование слоя осадка и, следовательно, процесс потери давления зависит от приложенного напряжения.

Если исходить из того, что после образования первичного слоя рост гидравлического сопротивления осадка становится линейным, при работе фильтра без статического заряда это происходит примерно через 6–8 минут продолжительности фильтрации. При использовании отрицательного заряда этот этап увеличивается до 10–12 мин, что показывает нестабильность образования слоя. При подаче переменного напряжения время до образования слоя автофильтра сокращается примерно до 5 мин, что указывает на уплотнение слоя пыли на фильтровальном элементе. Это уплотнение, в свою очередь, приводит к несколько более высокому уровню гидравлического сопротивления. Такой же эффект был установлен при применении постоянного напряжения положительной полярности. Разница в поведении говорит о разной ориентации заряженных частиц в слое.

На рисунке 5 показано влияние электрического поля при использовании в качестве зарядника – коронирующего электрода.

Коронирующие электроды выполнены из нихромовой проволоки диаметром 2 мм. В этом случае происходит предварительная зарядка газовых ионов с последующим осаждением заряженных ионов на поверхности частиц с передачей им своего заряда.

Эксперименты показывают, что динамика увеличения потери давления потока значительно больше, чем при индукционном заряде.

При этом, если образование слоя автофильтра без подачи напряжения на электрод происходит примерно за 4–5 мин, то при подаче на электрод напряжения 25 кВ, формирование осадка заканчивается через 15 мин, а при напряжении 28 кВ только приблизительно через 20 мин.

Увеличение напряжения до 32 кВ и в последующем до 50 кВ, приводит к изменению перепада давления практически линейно со значениями гидравлического сопротивления через 20 мин опыта для 30 кВ – 240 Па, 35 кВ – 200 Па, 50 кВ – 100 Па.

Из описанных ранее представлений известно [11, 12], что осаждение твердых частиц можно улучшить целенаправленно, влияя на первые фазы процесса фильтрации, что способствует более быстрому формированию слоя осадка – автофильтра. Это становится возможным при увеличении роли электростатического механизма осаждения с применением высокого напряжения.

На рисунке 6 показано влияние заряда, подающегося на перфорированную металлическую фильтровальную перегородку, на концентрацию твердых частиц в очищенном газе. Наиболее благоприятные результаты осаждения были достигнуты при подаче отрицательного заряда напряжением 50 кВ ( $C_k = 4 \text{ мг/м}^3$ ).

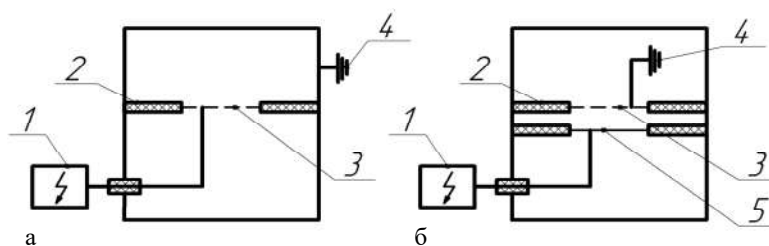


Рисунок 3 – Схемы подключения источника электрического поля:  
 1 – генератор высокого напряжения; 2 – изолятор; 3 – фильтровальная перегородка;  
 4 – заземление; 5 – электрод

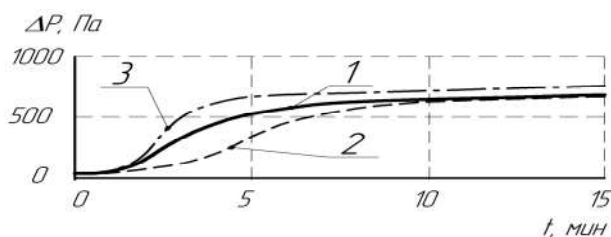


Рисунок 4 – Зависимости  $\Delta P = f(t)$  для перегородки с отверстиями  $d = 50 \mu\text{м}$ :  
 1 – без электрического заряда; 2 – с отрицательным постоянным зарядом,  $U = 50 \text{ кВ}$ ;  
 3 – зарядом переменного напряжения,  $U = 25 \text{ кВ}$

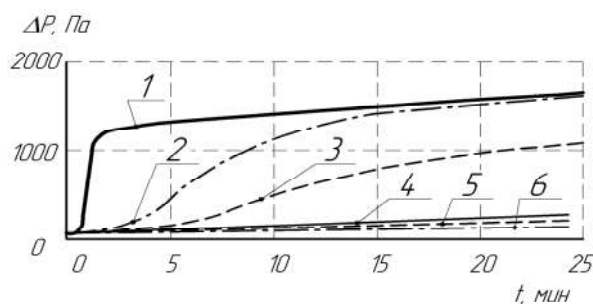


Рисунок 5 – Зависимости  $\Delta P = f(t)$  для перегородки с отверстиями  $d = 80 \mu\text{м}$ :  
 1 – без напряжения; 2 –  $U = 25 \text{ кВ}$ ; 3 –  $U = 30 \text{ кВ}$ ; 4 –  $U = 35 \text{ кВ}$ ; 5 –  $U = 50 \text{ кВ}$

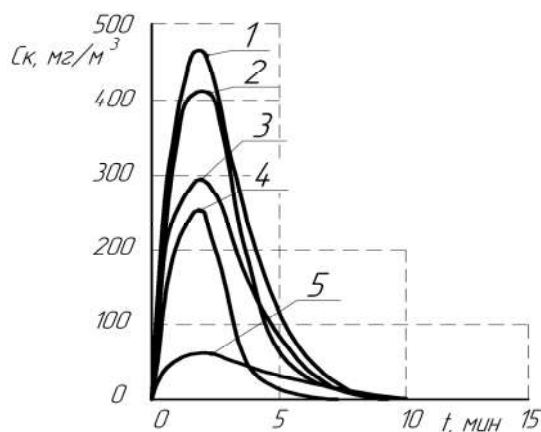


Рисунок 6 – Зависимость  $C_k = f(t)$  для перегородки с отверстиями  $d = 80 \mu\text{м}$ :  
 1 – без напряжения; 2 –  $U = 25 \text{ кВ}$ ; 3 –  $U = 30 \text{ кВ}$ ; 4 –  $U = 35 \text{ кВ}$ ; 5 –  $U = 50 \text{ кВ}$

Таким образом, можно констатировать, что наложение электрического заряда на перфорированную металлическую фильтровальную перегородку может повысить эффективность осаждения твердых частиц, особенно субмикронных. Вместе с тем, следует отметить, что использование высокого напряжения обуславливает довольно высокие дополнительные энергетические затраты. В то же время замена гладких цилиндрических осадительных электродов на фильтроэлементы их перфорированных металлических перегородок в действующих модернизируемых электрофильтрах при дальнейшем использовании стандартной системы подачи напряжения на коронирующие электроды может существенно повысить эффективность очистки дымовых газов.

#### *Литература*

1. *Вяхирева Р.И.* Экологические аспекты устойчивого развития теплоэнергетики России / Р.И. Вяхирева. М.: Ноосфера, 2000. 76 с.
2. *Беспалов В.И.* Природоохранные технологии на ТЭС / В.И. Беспалов, С.У. Беспалова, М.А. Вагнер. Томск: Томск. политехн. ун-т, 2010. 240 с.
3. *Жабо В.В.* Охрана окружающей среды на ТЭС и АЭС / В.В. Жабо. М.: Энергоатомиздат, 2012. 240 с.
4. *Александров С.В.* Разработка систем комплексной автоматизации топочных процессов твердотопливных котлоагрегатов с топками кипящего слоя / С.В. Александров, Э.В. Болбышев, А.В. Бондарев // Военный инженер. 2018. № 2 (8). С. 27–36.
5. *Санаев Ю.И.* Охрана воздушного бассейна с помощью электрофильтров / Ю.И. Санаев // Биосфера. 2011. № 4. С. 462–472.
6. *Машиностроение. Т. IV-12. Разд. IV: Машины и аппараты химических и нефтехимических производств. Расчет и конструирование машин / ред.-сост. М.Б. Генералов. М., 2004. 829 с.*
7. *Справочник по ремонту котлов и вспомогательного котельного оборудования / Г.А. Уланов, А.А. Цешковский, В.Н. Шастина и др.; под общ. ред. В.Н. Шастина. М.: Энергоиздат, 1981. 496 с.*
8. *Big stone remodels ESP into pulse jet fabric filter / Thomas Lugar // Power Magazine, March 2010. URL: [https://www.powermag.com/big-stone-remodels-esp-into-pulse-jet-fabric-filter\\_2506.html](https://www.powermag.com/big-stone-remodels-esp-into-pulse-jet-fabric-filter_2506.html) (дата обращения: 10.11.2021).*
9. *Мониторинг эффективности золоулавливания Новочеркасской ГРЭС / С.А. Бушумов, Т.Г. Короткова, С.Ю. Ксандопуло, Т.А. Устюжанинова, Н.В. Солонникова // Научный журнал КубГАУ. 2017. № 131. С. 1367–1376.*
10. *A new filter system, combining a fabric filter and electrostatic precipitator for effective pollution control behind cement kilns / R. Gebert, C. Rinschler, C. Polizzi, U. Harig, G. Pranghofer and S. J. Miller // Cement Industry Technical Conference, 2003. Conference Record. IEEE-IAS/PCA 2003, 2003. Pp. 285–294. Doi: 10.1109/CITCON.2003.1204729.*
11. *Энергосберегающее пылеулавливание при производстве керамических пигментов по “сухому способу” / В.А. Горемыкин, С.Ю. Панов, Ю.В. Красовицкий, А.В. Логинов. Воронеж: Воронежс. госуд. ун-т, 2001. 296 с.*
12. *Расчет и выбор пылеулавливающего оборудования / В.А. Горемыкин, С.Ю. Панов, М.К. Аль-Кудях, Ю.В. Красовицкий, А.М. Болдырев, Ю.Н. Шаповалов. Воронеж: Воронеж. гос. арх.-строит. акад., 2000. 326 с.*