

Вольчин И.А., докт. техн. наук, **Коломиец А.М.,** канд. техн. наук,
Ращепкин В.А., канд. техн. наук

Институт угольных энерготехнологий НАН Украины, Киев
ул. Андреевская, 19, 04070 Киев, Украина, e-mail: ceti@i.kiev.ua

Альтернативное решение для реконструкции электрофильтров угольных ТЭС

Выполнено математическое моделирование процесса очистки дымовых газов от частиц летучей золы угольных ТЭС при установке системы предварительной очистки дымовых газов в жалюзийном пылеконцентраторе и батарейном циклоне перед электростатическим фильтром с рециркуляцией дымовых газов с выхода батарейного циклона в форкамеру электрофильтра. На основе экспериментальных данных по фракционному составу летучей золы за котлами угольных ТЭС рассчитаны функции распределения частиц летучей золы по размерам на всех стадиях процесса предварительной пылеочистки и определены концентрации и результирующее распределение частиц по размерам в качестве входных данных для проектирования вариантов и объемов реконструкции существующих электрофильтров ТЭС. *Библ. 13, рис. 3.*

Ключевые слова: пылеочистка, летучая зола, жалюзийный пылеконцентратор, батарейный циклон, электростатический фильтр.

Украина как член Энергетического сообщества приняла на себя обязательства после 31.12.2017 выполнять экологические требования Директивы 2001/80/ЕС, согласно которым необходимо обеспечить выходную концентрацию частиц золы после существующих угольных котлов не выше 50 мг/нм^3 [1]. Директива 2010/75/EU о промышленных выбросах требует соблюдения порогового значения выброса пыли для существующих сжигающих установок 20 мг/нм^3 [2]. Однако это требование должно соблюдаться на дымовой трубе после всех установок газоочистки. Если за пылеочистой установкой будет размещена установка сероочистки, то допустимая выходная концентрация золы после пылеуловителей определяется требуемыми свойствами субпродукта установки десульфуризации.

Существующий парк пылеуловителей тепловых электрических станций (ТЭС) Украины представлен следующими образцами:

– мокрые скруббера Вентури, установленные в 1960-х гг. и имеющие фактическую эффективность 85–92 %;

– сухие электростатические фильтры (ЭСФ) типа ПГДС и УГ2, установленные в 1960-х гг., с высотой осадительных электродов 7,5 м и фактической эффективностью 90–96 %;

– сухие электростатические фильтры типа ЭГА, ЭГВ, ЭГЗ, УГЗ, установленные в 1970–1980 гг., с высотой осадительных электродов 12 м и фактической эффективностью 95–98,5 %.

Только на 15 энергоблоках ТЭС Украины из 90 после 2009 г. были установлены новые электрофильтры с высотой осадительных электродов 14–15 м, обеспечивающие при эффективности выше 99,5 % выходную концентрацию золы ниже 50 мг/нм^3 .

Замена существующих золоуловителей на новые электрофильтры является кардинальным, но затратным решением. Для энергоблоков 200–300 МВт удельные капитальные затраты на строительство нового ЭСФ составляют около 500 грн/кВт электрической мощности. Альтернативой полной замене существующего электрофильтра на новый аппарат может быть реконструкция основных узлов электрофильтра и установка системы предварительной очистки газопылевого потока, например, при использовании жалюзийного пылеконцентратора и батарейного циклона (или тканевого фильтра).

В таком варианте реконструкции системы пылеочистки ТЭС (рис.1) в жалюзийном пылеконцентраторе, размещенном перед газораспределительной решеткой (ГРР) электрофильтра, может быть отделено до 50 % массы пыли вместе с 10 % объемного расхода дымовых газов (ДГ). Этот поток с высокой концентрацией крупных частиц будет очищаться в отдельном пылеуловителе, например, батарейном циклоне. С выхода циклона не уловленная в нем летучая зола с потоком дымовых газов с помощью дополнительного вентилятора (дымососа) будет направляться в форкамеру электрофильтра.

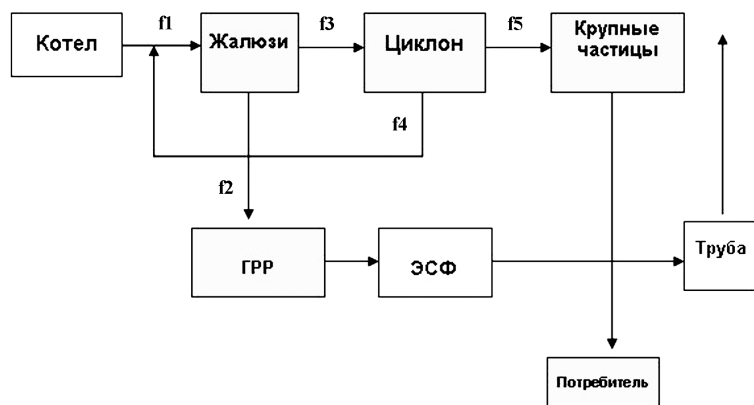


Рис.1. Схема системы пылеочистки дымовых газов с использованием жалюзийного пылеконцентратора и циклона с рециркуляцией перед ГРП ЭСФ.

Уловленная в батарейном циклоне летучая зола, в зависимости от содержания в ней углерода, может быть возвращена в котел (угольную мельницу), либо отправлена потребителю, утилизирующему этот материал (в строительной, цементной промышленности).

При сжигании высокозольных углей крупные частицы летучей золы, проходя через электростатический фильтр с достаточно высокой скоростью, являются причиной эрозии коронирующих электродов, ухудшая параметры коронного разряда и эффективность ЭСФ в целом. Кроме того, высокая запыленность потока часто приводит к запираанию коронного разряда [3], поскольку крупные частицы быстро заряжаются в первом поле ЭСФ [4] до заряда, при котором из-за уменьшения градиента электрического поля ток коронного разряда падает практически до нуля.

Другой часто встречающейся проблемой является высокое содержание углерода в частицах летучей золы из-за неполного выгорания угля в котле. Иногда содержание углерода в золе может превышать 20–25 %, и его повторная конверсия возможна при возвращении уловленных циклоном частиц в угольную мельницу.

Цель статьи — математическое моделирование процесса очистки запыленного потока дымовых газов от частиц летучей золы в инерционных аппаратах, установленных перед электростатическим фильтром.

Степень улавливания пылевых частиц в аппаратах золоулавливания сильно зависит от размеров частиц летучей золы. Знание функций распределения частиц по размерам позволяет определить концентрацию и массовый расход летучей золы на всех стадиях процесса (см. рис.1).

Установка жалюзийного пылеконцентратора за котлами угольных ТЭС приводит к модификации исходного массового распределения частиц запыленного потока дымовых газов по размерам (f_1). Результирующее распределение на выходе жалюзийного пылеконцентратора (f_3) характеризуется повышенной концентрацией инерционных (массивных) твердых частиц в дымовых газах, что смещает максимум исходной функции распределения частиц по размерам в сторону «тяжелой фазы». Такая модификация спектра исходной функции распределения частиц летучей золы по размерам за котлами в канале ДГ способствует их более эффективному улавливаю в аппаратах инерционного осаж-

дения. Разделение потоков с помощью жалюзийного пылеконцентратора на менее инерционный (f_2) и более инерционный (f_3) позволяет повысить общую эффективность улавливания пылевых частиц направлением более инерционных частиц (f_3) в золоуловители, например, в бункер батарейных циклонов с рециркуляцией ДГ с выхода батарейного циклона (f_4) в форкамеру электрофильтра. После удаления из газового потока тяжелых частиц мелкие частицы направляются на вход в аппарат более тонкой очистки (ЭСФ или тканевый фильтр). Отделенные жалюзийным пылеконцентратором и уловленные в батарейном циклоне крупные частицы летучей золы могут быть повторно направлены в угольный котел, либо отправлены потребителю (f_5).

Для того, чтобы рассчитать функции распределения частиц по размерам на каждом этапе золоулавливания (f_2 – f_5), необходимо располагать данными по эффективности фракционной золоочистки в жалюзийном пылеконцентраторе и батарейном циклоне.

Существуют разные подходы к расчету эффективности улавливания частиц летучей золы в батарейных циклонах. Классические методики [5–8] предполагают, что частицы пыли, проходящие очистку в батарейных циклонах, распределены по «нормальному закону». Такой подход, действительно, имеет свое обоснование, поскольку мелкие частицы в силу их физических свойств в большей степени пополняют фракции «уноса летучей золы» жалюзийного пылеконцентратора. За вычетом мелких частиц исходное распределение частиц летучей золы стремится к нормальному распределению. Однако опыт расчетов батарейных циклонов показывает, что более продуктивным представляется

расчет, основанный на экспериментальных измерениях эффективности батарейных циклонов. Так, теория, изложенная в [9, 10], основана на обобщении экспериментальных данных и предоставляет эмпирическую формулу для расчета эффективности единичного элемента батарейного циклона. Причем расчеты по этой формуле могут быть проведены с учетом реального распределения частиц летучей золы по размерам за топками угольных котлов тепловых электростанций.

Расчеты эффективности фракционной очистки ДГ от частиц летучей золы в единичном элементе батарейного циклона выполнены согласно эмпирической формуле, приведенной в [9]:

$$\eta_c = 1 - \exp[-M D_p^N], \quad (1)$$

где коэффициент профиля скоростей M в циклоне диаметром D_c при температуре дымовых газов T определяется по формулам:

$$n = 1 - (1 - 0,67 D_c^{0,14}) (T/283)^{0,3};$$

$$N = 1/(n + 1);$$

$$M = 2 [(K Q/D_c^3) \rho_p (n + 1)/(18 \mu)]^{N/2},$$

где K — геометрический параметр, $K = 402,9$; Q — объемный расход дымовых газов, $\text{м}^3/\text{с}$; ρ_p — плотность частиц, $\text{г}/\text{м}^3$; μ — динамическая вязкость газа, $\text{Па}\cdot\text{с}$.

В работе [6] утверждается, что теоретические расчеты дают завышенное значение эффективности улавливания пылевых частиц летучей золы в батарейных циклонах. Причем «проскок» частиц в таких инерционных системах может отличаться в 5–6 раз от теоретических значений для единичного элемента батарейного циклона, и эффективность пылеочистки в таком случае снижается от 98 % расчетных до практически наблюдаемых 83–85 %. Такое расхождение объясняется неравномерностью распределения расхода газовых потоков на различные элементы батарейного циклона. С практической точки зрения, при проектировании систем золоочистки, действительно, необходимо вводить соответствующие поправки, однако для целей модельных расчетов этой статьи мы сначала сохранили формулу (1) для определения фракционной эффективности батарейного циклона.

Данные по эффективности жалюзийных концентраторов взяты по результатам обобщения теоретических расчетов и экспериментальных данных, приведенных в работе [10]. Кривые эффективности отделения частиц в жалюзийном пылеконцентраторе и осаждения пыли в

батарейном циклоне приведены на рис.2. Кривая на рис.2,а достаточно точно аппроксимируется функцией вида:

$$\eta = 1 - \exp[-\alpha D_p],$$

где α — величина, зависящая от режимных и конструктивных параметров пылеконцентратора, м^{-1} ; D_p — диаметр пылевых частиц, м .

Важным исходным параметром при проведении расчетов эффективности системы золоулавливания является распределение частиц летучей золы по размерам за котлами ТЭС (f_1 на рис.1). Профиль функции распределения определяется динамикой выгорания коксового остатка пылеугольных частиц различных размеров, дроблением образовавшихся при их сгорании ценосфер, слипанием мелких частиц летучей золы, а в субмикронном диапазоне — образованием сажи, туманов кислот и конденсата тяжелых металлов [11]. Для последующих расчетов в этой статье были использованы усредненные

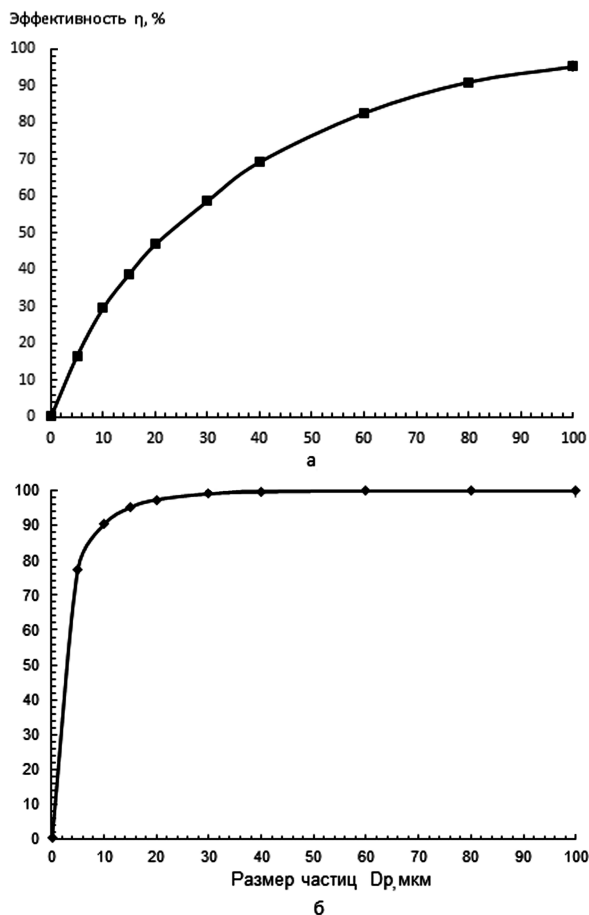


Рис.2. Зависимость фракционной эффективности $\eta_i(D_p)$ жалюзийного пылеконцентратора (а) и фракционной эффективности $\eta_c(D_p)$ батарейного циклона (б).

экспериментальные данные по фракционному составу летучей золы (в процентах от общей массы пыли в дымовых газах) за пылеугольными котлами, сжигающими антрацит [11–13].

На рис.3,а точками показаны усредненные экспериментальные данные распределения частиц по диаметрам D_p , которые достаточно точно аппроксимируются сплошной кривой такого вида: $a \cdot \text{th}(b D_p) \cdot \exp(-c D_p)$.

При значениях $a = 3,3$, $b = 0,3$, $c = 0,03$ расхождение с экспериментальными данными составляет около 0,2 % (мас.). Аналогичные результаты могут быть получены для аппроксимации экспериментальных данных по фракционному составу частиц летучей золы при сжигании в котлах ТЭС и других марок углей по данным [11].

Рассмотрим сначала, каким образом модифицируется исходное распределение $f_1(D_p)$ частиц по размерам при установке жалюзийного пылеконцентратора и батарейного циклона. С помощью зависимостей эффективности жалюзийного пылеконцентратора $\eta_l(D_p)$ и эффективности батарейного циклона $\eta_c(D_p)$ от размера частиц, приведенных на рис.2, были рассчитаны функции распределения частиц летучей золы в потоке дымовых газов за жалюзий-

ным пылеконцентратором на батарейный циклон (f_3) и на газораспределительную решетку электрофильтра (f_2), функция распределения частиц пыли за батарейным циклоном (f_4), в бункере циклона (f_5) и суммарная функция распределения частиц пыли при рециркуляции ДГ с выхода батарейного циклона в форкамеру электрофильтра ($f_1 + f_4$). Так, например, функции распределения за жалюзийным пылеконцентратором определяются по формулам:

$$f_2(D_p) = f_1(D_p) (1 - \eta_l(D_p));$$

$$f_3(D_p) = f_1(D_p) \eta_l(D_p).$$

Аналогично рассчитываются функции распределения частиц летучей золы по размерам и на остальных стадиях процесса. Результаты этих расчетов приведены на рис.3.

Из анализа кривых, приведенных на рис.3,в, г, очевидно, что установка жалюзийного пылеконцентратора и батарейного циклона приводит к удалению из потока дымовых газов значительной доли частиц летучей золы размером более 30 мкм ($f_3 > f_4$), на которые приходится около половины массы частиц запыленного потока (f_5). Однако видно, что при рециркуляции частиц летучей золы в форкамеру ЭСФ концентрация мелких частиц летучей золы в дымовых газах возрастает (рис.3,г).

Полученные функции распределения частиц летучей золы дают возможность рассчитать эффективность устройств инерционного осаждения частиц. Результаты расчетов показали, что при исходной запыленности дымовых газов за котлами ТЭС 40 г/нм^3 применение жалюзийного пылеконцентратора и батарейного циклона позволяет добиться более низкой концентрации пыли по массе на входе в ЭСФ — около 22 г/нм^3 .

Оценка влияния рециркуляции ДГ с выхода батарейного циклона в форкамеру ЭСФ на изменение функции распределения частиц летучей золы по размерам перед

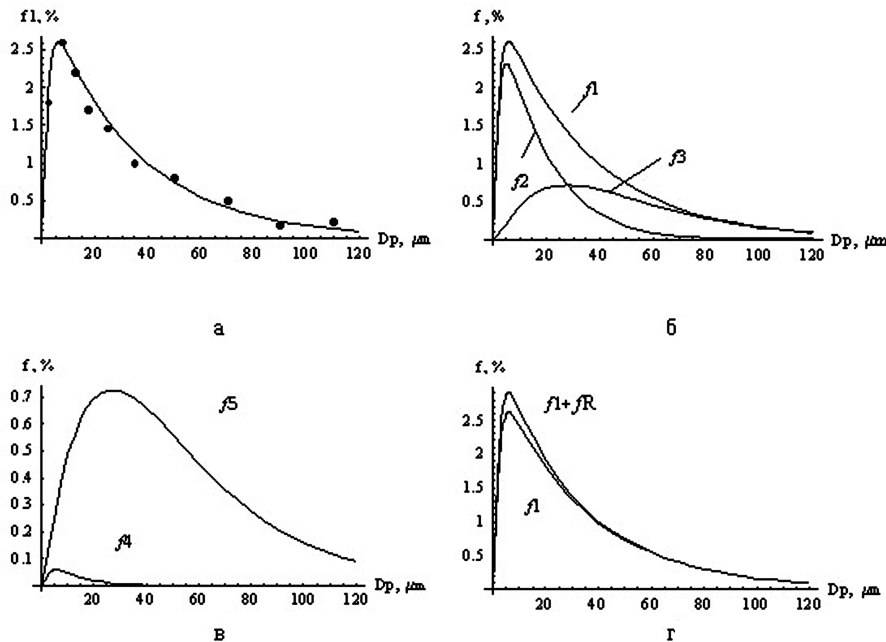


Рис.3. Распределение частиц летучей золы по размерам (% общей массы) за пылеугольными котлами ТЭС на разных стадиях процесса золоулавливания по схеме на рис.1: а — в потоке дымовых газов за воздухоподогревателем пылеугольных котлов ТЭС, сжигающих антрацит; аппроксимация экспериментальных данных [11] функцией $a \cdot \text{th}(b D_p) \cdot \exp(-c D_p)$, функция f_1 ; б — то же за жалюзийным пылеконцентратором на батарейный циклон (f_3) и на газораспределительную решетку электрофильтра (f_2); в — частиц пыли в бункере циклона (f_5) и в потоке ДГ за батарейным циклоном (f_4); г — летучей золы в потоке дымовых газов $f_1 + f_R$ после рециркуляции ДГ в форкамеру ЭСФ.

ГРП электрофильтра и на запыленность газового потока показывает увеличение доли мелкой фракции.

Пусть массовая концентрация летучей золы в потоке дымовых газов за воздухоподогревателем составляет m_p . При рециркуляции дымовых газов с выхода батарейного циклона в форкамеру ЭСФ массовая концентрация частиц летучей золы перед жалюзийным пылеконцентратором рассчитывается по формуле:

$$y_n(D_p) = m_p \int_0^{D_p} [f_1(D_p)/100 \{1 + \sum_{m=1}^n [\eta_l(D_p)/100] [1 - \eta_c(D_p)/100] \}^m] dD_p,$$

где n – кратность рециркуляции ДГ в форкамеру ЭСФ.

Расчеты показывают, что уже при $n = 4$ (и $D_p \rightarrow \infty$) массовая концентрация частиц стремится к постоянному значению ($y_n \rightarrow \text{const}$), которое с учетом поправки [7] на «проскок» частиц в батарейном циклоне отличается для выбранной функции плотности распределения частиц летучей золы по размерам $f_1(D_p)$ от начальной массовой концентрации на $\sim 5\%$ (функция $(f_1 + f_R) = 100 m_p^{-1} y_4'(D_p)$ на рис.3,г); при этом входная (перед ГРП электрофильтра) концентрация мелких частиц летучей золы после установления стационарного значения запыленности потока при многократной рециркуляции дымовых газов в форкамеру ЭСФ оказывается большей, чем в случае без применения жалюзийного пылеконцентратора и батарейного циклона. Причем мелкие частицы медленно заряжаются и плохо улавливаются, что отрицательно сказывается на эффективности электрофильтра.

Однако следует учесть, что этот недостаток в некоторой степени компенсируется удалением из потока дымовых газов крупных частиц, вызывающих эрозию коронирующих электродов и способствующих запираанию коронного разряда первого поля ЭСФ, а также улучшением качества летучей золы в бункерах электрофильтра с меньшим содержанием в них углерода, который удаляется с крупными частицами летучей золы в бункер батарейного циклона.

Увеличение концентрации мелких частиц на входе в электрофильтр при рециркуляции ДГ с выхода батарейного циклона требует выполнения мероприятий по повышению эффективности электрофильтра. Относительно малозатратными могут оказаться мероприятия по увеличению высоты электродов ЭСФ, что ведет к увеличению поверхности осаждения летучей золы, снижению скорости потока дымовых га-

зов в электрофильтре и увеличению времени зарядки частиц пыли. В некоторых случаях возможно установить дополнительное поле электрофильтра, что также увеличит эффективность улавливания частиц пыли.

Результаты расчетов показали, что для того, чтобы обеспечить требуемую Директивой 2001/80/ЕС концентрацию частиц пыли ниже 50 мг/нм^3 , электрофильтр должен после реконструкции иметь эффективность не менее $99,77\%$. Если система сероочистки, устанавливаемая за ЭСФ, допускает концентрацию пыли 250 мг/нм^3 , то его эффективность должна после реконструкции составлять $98,86\%$.

Выбор дымососа в тракте рециркуляции дымовых газов после батарейного циклона в форкамеру электрофильтра определяется, исходя из объемного расхода дымовых газов (около 10%) за жалюзийным пылеконцентратором, его гидродинамическим сопротивлением и сопротивлением батарейного циклона.

Предлагаемая схема реконструкции системы пылеочистки ТЭС совместно с мероприятиями по реконструкции электростатического фильтра, например, с увеличением количества полей и высоты электродов модификацией системы питания коронирующих электродов позволяет приблизиться к уровням выбросов пыли, соответствующим разрешенным предельным пороговым значениям, определяемым Директивами ЕС, либо к концентрациям, допускаемым на входе в аппараты сероочистки дымовых газов ТЭС, в случае их установки за электрофильтром.

Выводы

Альтернативой дорогостоящей замене электростатического фильтра на новый может стать реконструкция системы золоулавливания угольных ТЭС с применением предварительной очистки дымовых газов от частиц летучей золы в жалюзийном пылеконцентраторе и батарейном циклоне с рециркуляцией дымовых газов в форкамеру электростатического фильтра.

Выведение крупных частиц летучей золы из потока дымовых газов перед электрофильтром позволяет снизить эрозионный износ коронирующих электродов первого поля ЭСФ и тем самым повысить эффективность работы коронирующих электродов, предотвратить частичное запираание коронного разряда в сильно запыленных газовых потоках, а также снизить для антрацитовых котлов содержание количества углерода в летучей золе и тем самым повысить качество сопутствующего продукта пылеочистки, делая его более ликвидным, а реконструкцию экономически более эффективной.

При исходной запыленности дымовых газов 40 г/нм^3 за котлами ТЭС применение жалюзийного пылеконцентратора и батарейного циклона позволяет после рециркуляции дымовых газов в форкамеру электрофильтра добиться снижения концентрации пыли на входе в ЭСФ приблизительно до 22 г/нм^3 . При этом из-за рециркуляции пыли из циклона возрастает доля мелкой фракции.

Для соблюдения требований Директивы 2001/80/ЕС по пороговой концентрации частиц пыли на выходе ЭСФ (50 мг/нм^3) электрофильтр должен после реконструкции иметь эффективность не менее 99,77 %. Если требования к чистоте газового потока на входе в системы очистки дымовых газов от диоксида серы, устанавливаемой за электрофильтром, допускает концентрацию пыли 250 мг/нм^3 , то эффективность электрофильтра должна после реконструкции составлять 98,86 %.

Список литературы

1. Directive 2001/80/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2001 on the limitation of emissions of certain pollutants into the air from large combustion plants. Official Journal of the European Communities, L 309/1, 27.11.2001.
2. Directive 2010/75/EU of the European Parliament and of the Council of 24 November 2010 on industrial emissions (integrated pollution prevention and control). OJ L 334, 17.12.2010.
3. Белоусов В.В. Теоретические основы процессов газоочистки. — М. : Металлургия, 1988. — 256 с.
4. Корчевой Ю.П., Вольчин И.А., Ращепкин В.А. и др. Оценка повышения эффективности электростатических фильтров при предварительной зарядке твердых частиц // Экологические технологии и ресурсосбережение. — 1999. — № 5. — С. 62–67.
5. Козлова С.А., Шалаев И.М., Раева О.В., Киселев А.В. Оборудование для очистки газов промышленных печей. — Красноярск : Теплофизика, 2007. — 156 с.
6. Ветошкин А.Г. Процессы и аппараты газоочистки : Учеб. пособие. — Пенза : Изд-во Пензен. гос. ун-та, 2006. — 201 с.
7. Справочник по пыле- и золоулавливанию / Под ред. А.А.Русанова. — М. : Энергоиздат, 1993. — 312 с.
8. Швыдкий В.С., Ладыгичев М.Г. Очистка газов : Справ. — М. : Теплоэнергетик, 2002. — 640 с.
9. Flagan R.C., Seinfeld J.H. Fundamentals of Air Pollution Engineering. — California : Institute of Technology. PRENTICE HALL, 1988. — 542 p.
10. Зиганшин М.Г., Колесник А.А., Посохин В.Н. Проектирование аппаратов пылегазоочистки. — М. : Экспресс-3М, 1998. — 505 с.
11. Кропш А.И., Акбрут Л.И. Золоуловители с трубами Вентури на тепловых электростанциях. — М. : Энергия, 1977. — 460 с.
12. Вольчин И.А., Ращепкин В.А. Оценка затухания акустических волн в газодисперсных потоках в котлах тепловых электростанций // Энерготехнологии и ресурсосбережение. — 2016. — № 3. — С. 37–45.
13. Jinder Jow. Resource Utilization and Management of Fly Ash // Cornerstone. — 2016. — Vol. 4, Iss. 3. — P. 61–66.

Поступила в редакцию 19.05.17

Вольчин И.А., докт. техн. наук, **Коломієць О.М.,** канд. техн. наук,
Ращепкин В.А., канд. техн. наук
Институт вугільних енерготехнологій НАН України, Київ
вул. Андріївська, 19, 04070 Київ, Україна, e-mail: ceti@i.kiev.ua

Альтернативне рішення для реконструкції електрофільтрів вугільних ТЕС

Проведено математичне моделювання процесу очищення димових газів від частинок легкої золи вугільних ТЕС при установці системи попереднього очищення димових газів з використанням жалюзийного пилоконцентратора та батарейного циклону та рециркуляцією димових газів з виходу батарейного циклону в форкамеру електростатичного фільтра. На основі експериментальних даних по фракційному складу легкої золи за котлами вугільних ТЕС розраховано функції розподілу частинок легкої золи за розміром на всіх стадіях процесу попереднього пилоочищення та визначено концентрації та результуючий розподіл частинок за розміром як вхідних даних для проектування варіантів та обсягів реконструкції існуючих електрофільтрів ТЕС. *Бібл. 13, рис. 3.*

Ключові слова: пилоочищення, легка зола, жалюзийний пилоконцентратор, батарейний циклон, електростатичний фільтр.

Volchyn I.A., Doctor of Technical Sciences,
Kolomiets O.M., Candidate of Technical Sciences,
Raschepkin V.A., Candidate of Technical Sciences

Coal Energy Technology Institute of National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev
 19, Andriivska Str., 04070 Kiev, Ukraine, e-mail: ceti@i.kiev.ua

An Alternative Solution to ESP Reconstruction for the Coal Firing Thermal Power Plants

The mathematical modeling is performed of the efficiency of flue gas cleaning from fly ash particles of coal-fired thermal power plants, upon installation of a preliminary flue gas cleaning system that consists of a louvered dust concentrator and a battery cyclone, with the recirculation of flue gas from the battery cyclone outlet to the electrostatic precipitator pre-chamber. Based on the available experimental data for the fractional composition of fly ash downstream the boilers of coal-fired TPPs, the size distribution functions were calculated, of fly ash particles at each stage of the preliminary dust-cleaning process, as well as concentrations and modified particle size distributions, to be further used as the input data for designing options and scope of the reconstruction of existing electrostatic precipitators. *Bibl. 13, Fig. 3.*

Key words: dedusting, fly ash, louvered dust concentrator, battery cyclone, electrostatic precipitator.

References

1. Directive 2001/80/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2001 on the limitation of emissions of certain pollutants into the air from large combustion plants. *Official Journal of the European Communities*, L 309/1, 27.11.2001.
2. Directive 2010/75/EU of the European Parliament and of the Council of 24 November 2010 on industrial emissions (integrated pollution prevention and control). OJ L 334, 17.12.2010.
3. Belousov V.V. Theoretical bases of gas cleaning processes, Moscow : Metallurgy, 1988, 256 p. (Rus.)
4. Korchevyy Yu.P., Volchyn I.A., Raschepkin V.A., Domanskiy S.G., Husar N.G. [Estimation of precharging of solid particles to improve efficiency of electrostatic precipitators], *Ekotekhnologii i Resursosberezhenie [Ecotechnologies and Resource Saving]*, 1999, (5), pp. 62–67. (Rus.)
5. Kozlova S.A., Shalaev I.M., Raeva O.V., Kiselev A.V. [Equipment for cleaning gases from industrial furnaces] Siberian Federal University, Institute of Non-Ferrous Metals and Gold, Department of Engineering, Krasnoyarsk : Teplofizika, 2007, 156 p. (Rus.)
6. Vetoshkin A.G. [Processes and apparatuses of gas cleaning], Penza : Publishing house of the Penzenskiy gosudarstvenny univertitet, 2006, 201 p. (Rus.)
7. [Reference book on dust and ash collecting], Ed. A.A.Rusanov, Moscow : Energoizdat, 1993, 312 p. (Rus.)
8. Shvydky V.S., Ladygichev M.G. [Gas cleaning : Reference work], Moscow : Teploenergetik, 2002, 640 p. (Rus.)
9. Flagan R.C., Seinfeld J.H. Fundamentals of Air Pollution Engineering, California : Institute of Technology. PRENTICE HALL, 1988, 542 p.
10. Ziganshin M.G., Kolesnik A.A., Posokhin V.N. [Design of dust and flue gas devices], Moscow : Exress-3M, 1998, 505 p. (Rus.)
11. Kropp A.I., Akbrut L.I. [Ash collectors with Venturi tubes in thermal power plants], Moscow : Energia, 1977, 460 p. (Rus.)
12. Volchyn I.A., Raschepkin V.A. [Assessment of Acoustic Waves Attenuation in the Dusted Flows in the Boilers of Thermal Power Plants], *Energotekhnologii i Resursosberezhenie [Energy Technologies and Resource Saving]*, 2016 (3), pp. 37–45. (Rus.)
13. Jinder Jow. Resource Utilization and Management of Fly Ash, *Cornerstone*, 2016 (4), Iss. 3, pp. 61–66.

Received May, 19, 2017