

УДК 504

С. П. Высоцкий<sup>1</sup>, д-р техн. наук, А. Г. Подолянюк<sup>2</sup>

1 – ГОУВПО Донбасская национальная академия строительства архитектуры,  
г. Макеевка, 2 – Автомобильно-дорожный институт ГОУВПО «Донецкий  
национальный технический университет», г. Горловка

### СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СЕПАРАЦИИ ПЫЛЕВЫХ ЧАСТИЦ В ЦИКЛОНАХ И ЭЛЕКТРОФИЛЬТРАХ

*Рассмотрены основные виды отходов металлургических предприятий. Произведен мониторинг степени влияния различных факторов на эффективность улавливания пылевых частиц и получены аналитические зависимости улавливания. Проведен сравнительный анализ эффективности работы циклонов и электрофильтров.*

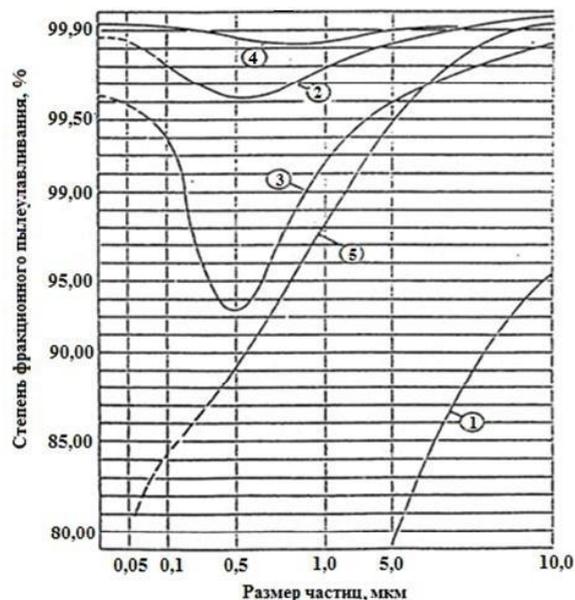
**Ключевые слова:** эффективность улавливания частиц, циклоны, электрофильтры, пылевые частицы

#### Введение

Металлургические предприятия являются одним из основных источников пылевых и шламовых выбросов в атмосферу. На их долю приходится около 40 % валовых выбросов: 34 % газообразных веществ и 6 % твердых отходов. Состав, размер частиц, твердость отходов – пыли зависит от сырья, которое на предприятии перерабатывают. Исследование дисперсного и компонентного состава выбросов при производстве чугуна, стали и цветных металлов указывает на высокую степень дисперсности пылевых частиц, в среднем размеры колеблются от 0,1 до 100 мкм. По результатам исследования дисперсного состава в выбросах предприятий доля частиц размером до 1,4 мкм составляет около 88 %.

На данный момент существует множество разнообразных устройств для очистки газовых выбросов от пыли, принципы работы которых существенно отличаются друг от друга.

На рисунке 1 показана эффективность применения различных устройств.



1 – циклонный отделитель; 2 – фильтрующий отделитель;  
3 – электрический отделитель (сухой); 4 – электрический отделитель (мокрый);  
5 – скруббер Вентури

Рисунок 1 – Эффективность применения различных устройств  
для очистки газовых выбросов от пыли

Как видно из приведенных данных, эффективность пылеулавливания существенно зависит от размеров удаляемых частиц. Наиболее широкое применение, особенно в отечественной практике, нашли циклоны (циклонные сепараторы) и электрофильтры. Теоретический и практический интерес представляет область применения, достоинства и недостатки методов очистки газовых выбросов.

### *Анализ предыдущих публикаций и достижений*

В мировой практике для отчистки газовых выбросов от пыли наиболее широко применяются три технологических решения: циклоны и мультициклоны, рукавные фильтры и электрофильтры [1, 2].

Аппараты для отчистки выбросов существенно отличаются по своей эффективности. Как правило, при уменьшении размеров частиц пыли снижается эффективность их удаления. Наименее затратной с точки зрения капиталовложений является очистка запыленных потоков в циклонных сепараторах.

Для повышения эффективности очистки используются технологические и конструктивные мероприятия. К технологическим мероприятиям относятся методы коагуляции взвешенных в газовом потоке частиц за счет применения химических присадок, а также за счет электростатического укрупнения и увлажнения газового потока. Эти технологические решения связаны с доработкой циклонной сепарации установками рециклирования очищенного газового потока после циклонов [3]. Однако эффект рециклирования срабатывает только в случае укрупнения высокодисперсных частиц в очищенном потоке. Укрупнение может достигаться несколькими методами: электростатическим, флокуляционным и увлажнением газового потока с присадкой смачивающих агентов [4, 5]. При использовании электрофильтров отсутствуют теоретические предпосылки по оценке напряжения, подаваемого на электроды, влияющего на эффективность сепарации частиц [6]. Это затрудняет выбор оптимального режима очистки газовых потоков и наиболее предпочтительного для данных условий оборудования.

### *Цель исследования*

Целью исследования является изучение природы основной массы загрязнителей, образующихся на различных стадиях технологического процесса в металлургическом комплексе, влияние дисперсности частиц на степень их улавливания в циклонах и электрофильтрах.

### *Изложение основного материала исследований*

Для того, чтобы повысить качество очистки промышленных газов с учетом их опасности для окружающей среды, найти наиболее эффективные способы очистки или оптимальное их сочетание, нужно определить удельную запыленность отходящих газов, химический состав пыли, степень ее дисперсности и форму частиц. По морфологическим признакам частицы имеют неправильную угловатую или округлую форму.

Характеристика пылевых выбросов металлургического производства представлена в таблицах 1 и 2.

В результате анализа нами установлено, что графитовая пыль составляет 30 % от общего количества графитсодержащей пыли, а магнитная фракция составляет более 70 % по массе. Металлические брызги сосредоточены в мелких фракциях и составляют менее 70 мкм, при этом частицы графитной пыли сосредоточены в крупных фракциях.

Большая часть включений представлена соединениями железа. Меньшая часть частиц пыли состоит в основном из кремния и марганца, имеет сферическую форму с поверхностью, покрытой извилинами.

Таблица 1 – Характеристика пылевых выбросов металлургического производства

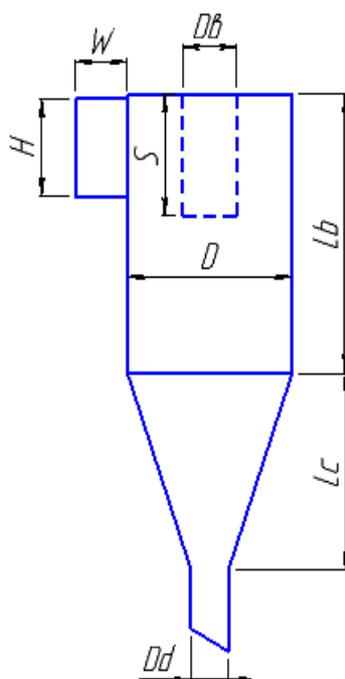
Вид производства	Запыленность отходящих газов, г	Химический состав пыли, % (по массе)		Размер частиц (мкм), % содержания
Агломерационная фабрика	10–18	40–50		0–5 (11 %) 5–10 (7,3 %) 10–20 (8,4 %) 20–30 (9 %) 30–40 (64 %)
		9–15	Si	
		7–12	CaO	
		6–8	C	
		1–1,5	MgO	
		2,8	Глинозем	
Коксохимический цех	3–10	Угольная пыль		
Доменный цех	50–100	20–30		От 0,06 (76 %) До 0,5 (0,1 %)
		14–15	Si	
		4–5		
		4–5	MgO	
		11–12	CaO	
		1–2	S	
Конверторный цех	130–150	60–70		0–3 (60 %) 30–60 (15 %) 60–250 (15 %) 250 (10 %)
		5–17	Известь	
		1–30	Si	
Мартеновский цех	15–25	86,4		От 1 (43 %) До 9–10 (1 %)
		9,3		
		1,65	CaO	
		0,9	MgO	
Котельные агрегаты ТЭЦ металлургического завода	20–1400 (в зависимости от сорта угля и мощности)	Алюмосиликат, оксиды железа, оксиды кальция, оксиды магния		0–10 (32 %) 10–50 (50 %) 50–100 (18 %)

Таблица 2 – Дисперсный состав выбросов технологических операций предприятий металлургического комплекса

Производственные участки пылеобразования	$PM_{10}$ (%)	$PM_{2,5}$ (%)	Медианный размер частиц, мкм
	Объемный % фракций от общего объема частиц		
Электросталеплавильная печь	3,225	16,712	20
Выпуск чугуна (литейный двор)	38,3412	78,5311	1
Выпуск шлака (литейный двор)	53,98	17,562	8,5
Продувка чугуна в конверторе	10,791	1,220	20
Рубка стали	29,444	12,791	20
Загрузка колошниковой шихты грейфером	24,773	5,400	40
Загрузка металлургического шлака	55,528	44,466	4
Смешение шихты	31,14	11,401	30
Спекание агломерата	8,431	2,930	200
Выгрузка агломерата (после спекания)	15,412	5,240	200
Мешалка (приготовление смеси для укладки форм)	13,672	1,650	20

Наиболее широкое применение для очистки от пыли газовых выбросов в металлургии и других отраслях промышленности находят циклонные сепараторы или циклоны.

Общий вид циклона приведен на рисунке 2.



$D$  – диаметр корпуса;  $H$  – высота входного патрубка;  $W$  – ширина входного патрубка;  
 $L_c$  – длина конической части циклона;  $L_b$  – длина цилиндрической части циклона;  
 $S$  – длина погружения выходного патрубка;  $D_g$  – диаметр патрубка выходящего газа;  
 $D_d$  – диаметр патрубка выхода сепарата

Рисунок 2 – Общий вид циклона

Основные характеристики циклонов приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Типы циклонов и их характеристики

Основные характеристики	Высокоэффективные циклоны	Обычные циклоны	Циклоны с большой пропускной способностью
Диаметр корпуса, $D$	1,0	1,0	1,0
Высота входного патрубка, $H$	0,5	0,5	0,8
Ширина входного патрубка, $W$	0,2	0,25	0,35
Диаметр патрубка выходящего газа, $D_g$	0,5	0,5	0,75
Диаметр погружения выходного патрубка, $S$	0,5	0,6	0,85
Длина цилиндрической части циклона, $L_b$	1,5	2,0	1,7
Длина конической части циклона, $L_c$	2,5	2,0	2,5
Длина патрубка выхода сепарата, $D_d$	0,375	0,25	0,4

Достоинствами циклонов являются:

- низкие капитальные затраты;
- возможность очистки (сепарации) газовых потоков при высоких температурах.

Недостатками циклонов являются:

- низкая эффективность улавливания частиц малых размеров;
- повышенные эксплуатационные затраты, в том числе затраты на преодоление перепада давления в циклонах.

Степень очистки газа в циклонах зависит от значения фактора разделения  $K_p = \frac{w^2}{rg}$ , ее

можно повысить увеличением скорости  $w$  газа, или уменьшением радиуса  $r$  вращения потока запыленного газа. Но увеличение скорости газа  $w$  приводит к возрастанию гидравлического сопротивления циклона и увеличивает турбулентность потока газа. В то же время уменьшение радиуса  $r$  циклона приводит к снижению его производительности.

Эффективность улавливания частиц пыли от их размера описывается математическим уравнением.

Математическое описание имеет следующий вид:

$$\eta = \frac{1}{1 + e^{-b(a-d)}}, \quad (1)$$

где  $b$  – коэффициент, показывающий угол наклона кривой;

$a$  – константа половинного значения (при  $a = d$ ,  $\eta = 0,5$ ).

Путем несложных преобразований получаем:

$$\frac{\eta}{1-\eta} = e^{b(d-a)}, \quad (2)$$

$$\ln\left(\frac{\eta}{1-\eta}\right) = b(d-a). \quad (3)$$

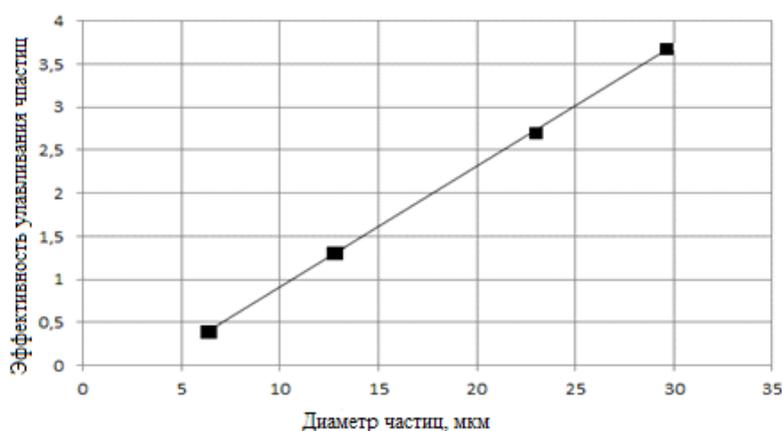


Рисунок 3 – Эффективность улавливания частиц пыли в зависимости от их диаметра в циклонах

На рисунке 3 приведены данные, которые показывают, что эффективность пылеулавливания в циклонах с высокой степенью надежности ( $R^2 = 0,99$ ) описывается следующей зависимостью:

$$\eta = \frac{0,509[\exp(0,147d)]}{l + 0,509[\exp(0,147d)]}. \quad (4)$$

При загрязненности газового потока высокодисперсными частицами и при больших расходах очищаемых газов для очистки от пыли газовых выбросов на различных предприятиях применяют электрофильтры.

Достоинствами электрофильтров являются:

- универсальность прибора;
- высокая эффективность сепарации частиц, которая составляет 99,9 %;
- возможность применения в средах, которые могут привести к коррозии;
- возможность улавливать частицы размерами меньше 1 мкм;
- использование при высоких температурах (450 °С);
- расход электроэнергии на очистку газового потока на порядок ниже, чем при применении газоочистных аппаратов других типов.

Недостатки электрофильтров:

- высокая стоимость устройства;
- невозможность проведения очистных работ с взрывоопасными газами;
- быстрый износ конструкций.

Основным параметром, влияющим на удаление частиц пыли в электрофильтрах, является коронный разряд, обеспечивающий возникновение «ионного ветра». Под его воздействием происходит движение заряженных частиц пыли к осадительным электродам. В соответствии с модифицированным уравнением Таунсенда (Townsend), ток коронного разряда пропорционален квадрату разности напряжения ( $u - u_0$ ):

$$i = k(u - u_0)^2, \quad (5)$$

где  $u$  – напряжение, поданное на электроды, кВ.

Константы  $k$  и  $u_0$  по Таунсенду равны:  $k = 7,5 \cdot 10^{-3} \text{ A} / \text{y}^2$  и  $u_0 = 6 \text{ kV}$ .

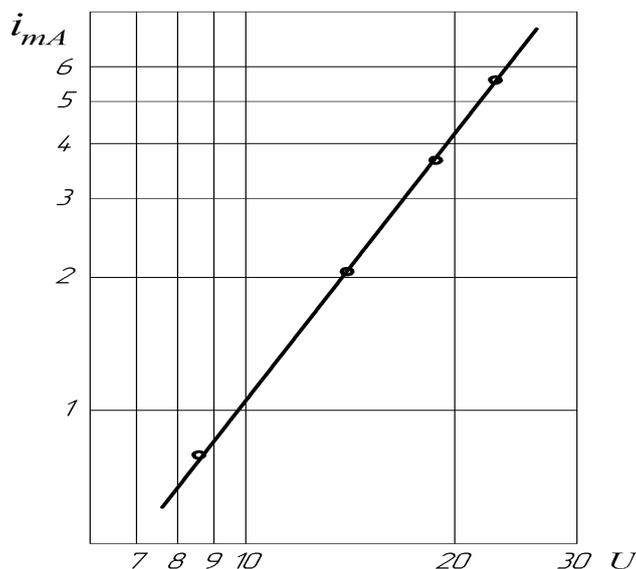
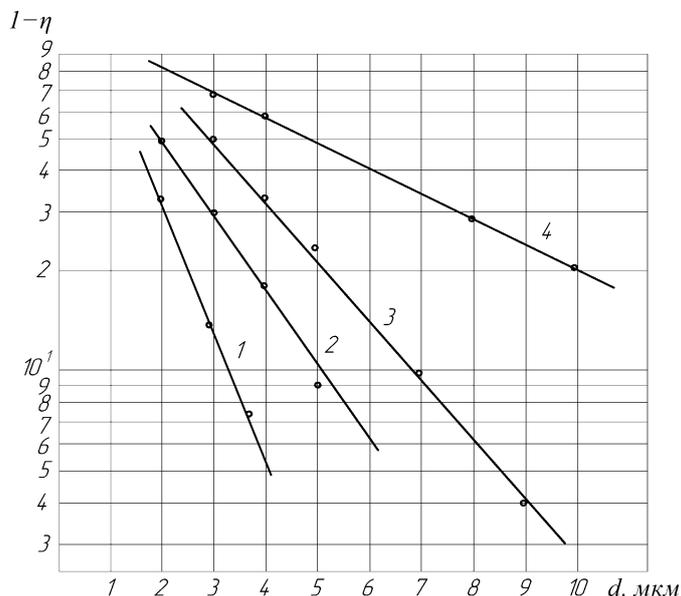


Рисунок 4 – Зависимость тока коронного разряда от приложенного к электродам напряжения в электрофильтрах

Обработав данные, приведенные на рисунке 4, получили зависимость, которая несколько отличается от данных Таунсенда и имеет следующий вид:

$$i = 1,08 \cdot 10^{-2} (u - u_0), \text{ mA}. \quad (6)$$

Величина поданного на электроды напряжения оказывает основное влияние на эффективность удаления частиц пыли. Зависимость доли неотсепарированной пыли от размеров частиц пыли при различных напряжениях на электродах показана на рисунке 5.



1 –  $u = 15kV$ ; 2 –  $u = 20kV$ ; 3 –  $u = 25kV$ ; 4 –  $u = 30kV$

Рисунок 5 – Зависимость эффективности удаления частиц пыли от их диаметра при разных напряжениях электродов электрофильтров

Как видно из приведенных данных, эффективность сепарации частиц является экспоненциальной функцией их диаметра. При этом при увеличении напряжения доля неудаленных частиц уменьшается, а также возрастает эффективность удаления мелких фракций пыли. Аналитическое выражение зависимостей для различных значений напряжения имеет вид:

1. Для  $u = 15kV$

$$1 - \eta = \frac{0,42}{d^{0,875}} = 0,42 \cdot d^{-0,875}.$$

2. Для  $u = 20kV$

$$1 - \eta = \frac{0,6}{d^{0,097}} = 0,6 \cdot d^{-0,097}.$$

3. Для  $u = 25kV$

$$1 - \eta = \frac{0,42}{d^{1,629}} = 0,42 \cdot d^{-1,629}.$$

4. Для  $u = 30kV$

$$1 - \eta = \frac{0,44}{d^{2,184}} = 0,44 \cdot d^{-2,184}.$$

### Выводы

1. Установлено, что масса загрязнений в металлургическом процессе представлена частицами пыли; определен их химический состав и степень дисперсности.

2. Получены аналитические зависимости степени удаления частиц пыли различной дисперсности в циклонах и электрофильтрах.

3. Выполнен анализ дисперсности частиц пыли и их физико-химических свойств.

4. Определена степень влияния различных факторов на эффективность сепарации частиц пыли в электрофильтрах.

5. Показано, что степень улавливания частиц пыли в электрофильтрах существенно превышает этот показатель в циклонах. Поэтому циклонные сепараторы могут использоваться только в качестве первой ступени пылеулавливания.

### **Список литературы**

1. Nikas, K. S. P. Numerical Simulation of the Flow and the Collection Mechanism inside a Laboratory Scale Electrostatic Precipitator [Электронный ресурс] / K. S. P. Nikas, A. A. Varonos, G. S. Bergeles. – 2005. – Vol. 63. – P. 423–443. – Режим доступа : <http://E:/6%20%D0%BA%D1%83%D1%80%D1%81/%D0%9D%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D1%8F%20%D0%BF%D0%BA%D0%B0/0863-0873.pdf>.
2. Aerosols in Fixed-Bed Biomass Combustion – Formation, Growth, Chemical Composition, Deposition, Precipitation and Separation from Flue Gas : Final Report [Электронный ресурс] / Gaz University of Technology. – 2003. – Режим доступа : <http://www.bios-bioenergy.at/uploads/media/Report-Bioaerosols-2004-03-28.pdf>.
3. Intra, P. Particulate Emission Reduction from Biomass Burning in Small Combustion Systems with a Multiple Tubular Electrostatic Precipitator [Электронный ресурс] / P. Intra; P. Limueadphai, P. Tippayawong // Particulate Science and Technology. – 2010. – 28 (6). – P. 547–565. – Режим доступа : <http://dx.doi.org/10.1080/02726351003758444>.
4. Influence of Operating Parameters on the Collection Efficiency and Size Distribution of Street Dust during Street Scrubbing [Электронный ресурс] / Chung-Shin Yuan, Su-Wen Cheng, Chung-Hsuang Hang, Tai-Yi Yu Yuan // Aerosol and Quality Research. – 2003. – Vol. 3, № 1. – P. 75–86. – Режим доступа : [http://aaqr.org/files/article/50/8\\_AAQR-03-06-OA-0008\\_75-86.pdf](http://aaqr.org/files/article/50/8_AAQR-03-06-OA-0008_75-86.pdf).
5. Taiwo, Muhammad I. Design and Analysis of Cyclone Dust Separator [Электронный ресурс] / Mohammed A. Namadi, James, B. Mokwa. – 2016. – Vol. 5. – P. 130–134. – Режим доступа : [http://www.ajer.org/papers/v5\(04\)/O050401300134.pdf](http://www.ajer.org/papers/v5(04)/O050401300134.pdf).
6. Sakura, G. B. Experimental Study of Particle Collection Efficiency of Cylindrical Intel Type Cyclone Separator [Электронный ресурс] / G. B. Sakura, Andrew Y. T. Leung. – 2015. – March. – Vol. 6, № 3. – Режим доступа : <https://pdfs.semanticscholar.org/ee56/99671dccab746ba92309dfc2eeaca40fe1b9.pdf>.

*С. П. Высоцкий<sup>1</sup>, А. Г. Подолянюк<sup>2</sup>*

*1 – ГОУВПО Донбасская национальная академия строительства архитектуры, г. Макеевка,*

*2 – Автомобильно-дорожный институт ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет», г. Горловка*

### **Сравнение эффективности сепарации пылевых частиц в циклонах и электрофильтрах**

Рассмотрены основные виды отходов металлургических предприятий. Определена удельная запыленность отходящих газов, химический состав пыли и степень ее дисперсности. Произведен мониторинг влияния разных факторов на эффективность улавливания пылевых частиц. Описаны основные типы, достоинства и недостатки циклонов и электрофильтров. Проведен сравнительный анализ эффективности работы циклонов и электрофильтров. Приведены графики и зависимости по эффективности улавливания частиц пыли в циклонных сепараторах. Обработаны данные по эффективности улавливания пыли в электрофильтрах. Приведена зависимость величины тока коронного разряда от приложенного к электродам напряжения и зависимость эффективности удаления частиц пыли от их диаметра при разных напряжениях электродов. Установлено, что степень улавливания частиц пыли в электрофильтрах существенно превышает показатель улавливания в циклонах, поэтому циклонные сепараторы могут быть использованы только в качестве первой ступени пылеулавливания.

**ЭФФЕКТИВНОСТЬ УЛАВЛИВАНИЯ ЧАСТИЦ, ЦИКЛОНЫ, ЭЛЕКТРОФИЛЬТРЫ, ПЫЛЕВЫЕ ЧАСТИЦЫ**

*S. P. Vysotskii<sup>1</sup>, A. G. Podolianiuk<sup>2</sup>*

*1 – Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, Makeyevka,*

*2 – Automobile and Highway Institute of Donetsk National Technical University, Gorlovka*

### **Efficiency Comparison of Dust Particles Separation in Cyclones and Electric Precipitators**

The basic types of wastes of metallurgical enterprises are considered. The specific dustiness of waste gases, chemical composition of dust and degree of its dispersion are determined. The monitoring of various factors impact on the efficiency of dust particles collection is carried out. The basic types, merits and drawbacks of cyclones and electric precipitators are described. The comparative analysis of the operating efficiency of cyclones and electric precipitators is carried out. Graphics and dependencies on the efficiency of cyclones and electric precipitators operation are given. Data on the efficiency of the dust collection in electric precipitators are processed. The dependence of the current amount of the corona discharge on the voltage applied to the electrodes and the dependence of the efficiency of the dust particles removal on their diameter at various voltages of electrodes are given. It is established that dispersion degree of dust particles in electric precipitators exceeds sufficiently the degree of dispersion in cyclones therefore cyclone separators can be used only as the first degree of dust collection.

EFFICIENCY OF DUST COLLECTION, CYCLONES, ELECTRIC PRECIPITATORS, DUST PARTICLES

#### **Сведения об авторах:**

##### **С. П. Высоцкий**

SPIN-код: 7497-0100  
Scopus Author ID: 7004891012  
ORCID ID: 0000-0002-2988-7245  
Телефон: +38 (071) 391-35-97  
Эл. почта: sp.vysotsky@gmail.com

##### **А. Г. Подолянюк**

Телефон: +38 (071) 314-30-88  
Эл. почта: anastaiisha1@mail.ru

*Статья поступила 02.03.2018*

*© С. П. Высоцкий, А. Г. Подолянюк, 2018*

*Рецензент: А. П. Карпинец, канд. хим. наук, доц., АДИ ГОУВПО «ДонНТУ»*