

**Выводы**

Предложен инженерный метод расчета процессов тепло- и массообмена в механических скрубберах, использование которого позволяет по известным начальным параметрам и расходам взаимодействующих сред рассчитывать конечные параметры газа.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. *Нестеренко А.В.* Основы термодинамических расчетов вентиляции и кондиционирования воздуха. — М.: Высшая школа, 1971. — 460 с.
2. *Приемов С.И., Дубчак М.З.* Расчетная модель эффективности теплообмена в скруббере Вентури при охлаждении ненасыщенного парама воздуха //Строительные материалы, изделия и санитарная техника. — К.: Будівельник. — 1981. — Вып. 4. — С.80–84.
3. *Бондарь А.Г., Статюха Г.А.* Планирование эксперимента в химической технологии. — К.: Вища школа, 1976. — 184 с.

4. *Дубинская Ф.Е.* Некоторые вопросы теплообмена в скрубберах Вентури при охлаждении ненасыщенных парама газов// Промышленная и санитарная очистка газов. НТРС. — 1975. — № 2. — С. 2–8.

5. *Вальдберг А.Ю., Исянов Л.М., Тарат Е.Я.* Технология пылеулавливания. — М.: Машиностроение, 1985. — 192 с.

6. *Савицкая Н.М., Вальдберг А.Ю., Ларина Т.В.* Приближенный расчет температуры мокрого термометра //Промышленная и санитарная очистка газов. НТРС. — 1980. — № 2. — С. 6.

7. *Андреев Е.И.* Расчет тепло- и массообмена в контактных аппаратах. — Л.: Энергоатомиздат, 1985. — 192 с.

8. *Таньковский Р.Ю.* Разработка способа улавливания пыли кормовых дрожжей с целью снижения потерь при сушке распылением и защиты окружающей среды. Дисс. ... канд.техн.наук: — К., 1984, — 166 с.

*Получено 30.03.2009 г.*

УДК621.928.9

**СЕРЕБРЯНСКИЙ Д.А.<sup>1</sup>, НОВАКОВСКИЙ Е.В.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Институт технической теплофизики НАН Украины*

<sup>2</sup>*Национальный технический университет Украины “Киевский политехнический институт”*

## ОЧИСТКА ГАЗОВ ОТ ПЫЛИ В ЦЕНТРОБЕЖНЫХ ФИЛЬТРАХ

У статті наведено результати випробувань відцентрових фільтрів при вловлюванні графітового та коксового пилу. Ефективність очищення газів від пилу у відцентрових фільтрах на порядок більша, ніж у циклонах.

В статье приведены результаты испытаний центробежных фильтров при улавливании графитовой и коксовой пыли. Эффективность очистки газов от пыли в центробежных фильтрах на порядок больше, чем в циклонах.

The results of tests of centrifugal filters in catching graphite and coke dust are presented. The efficiency of cleaning of gases from dust in centrifugal filters is by an order of magnitude than higher in cyclones.

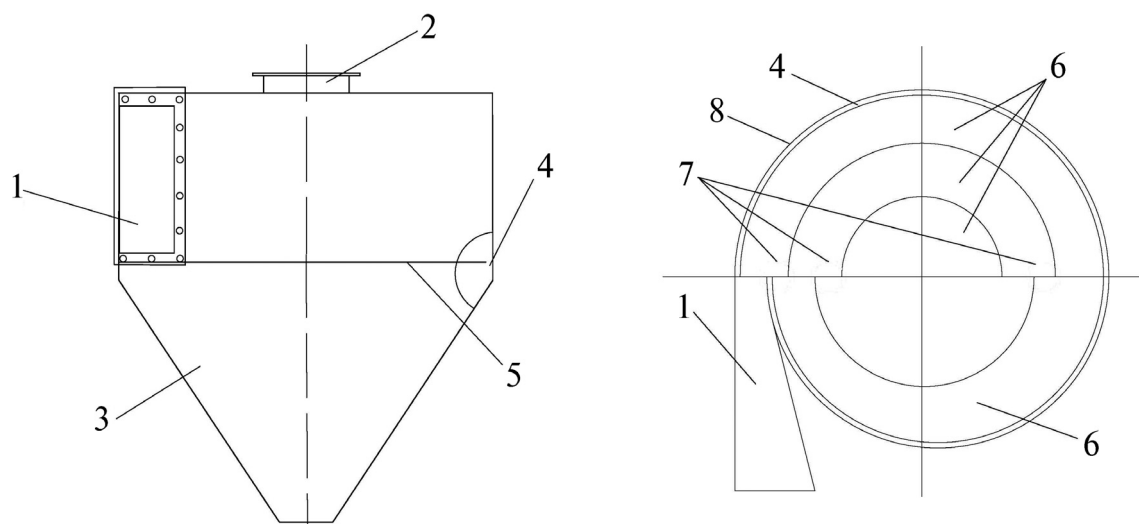
$d_q$  — диаметр частицы;

$n$  — количество каналов в центробежном фильтре;

$t$  — температура газа;

$\varepsilon$  — коэффициент уноса;

$\eta$  — коэффициент улавливания.



**Рис. 1. Центробежный фильтр в четырёхканальном исполнении:**

**1 – входной патрубок; 2 – выходной патрубок; 3 – конический бункер; 4 – кольцевая щель; 5 – днище головки; 6 – криволинейные каналы; 7 – рециркуляционные щели; 8 – сепарационная камера.**

Центробежные фильтры разделяют фазы гетерогенных газовых потоков [1]. Они могут использоваться в качестве пылеулавливающих аппаратов в различных отраслях промышленности. В основе конструкции центробежных фильтров лежит система последовательно соединённых криволинейных каналов с одинаковыми углами поворота  $\varphi = \pi$  и равными площадями поперечных сечений (рис. 1) [2]. Каналы образуются двумя плоскими стенками и цилиндрическими полуобечайками разной кривизны. Замкнутый контур возникает в двух соседних каналах при наличии эксцентриситета между осями вращения нечётных и чётных полуобечайек (рис. 1).

Центробежный фильтр работает следующим образом: запыленный газовый поток по тангенциальному входному патрубку 1 поступает в сепарационную камеру 8. Вследствие движения по криволинейной траектории твердые частицы концентрируются на периферии каждого из каналов 6 и выводятся из них через зазоры 7 в предыдущий по ходу движения потока канал. Из первого и второго по ходу потока каналов 6 пыль вместе с частью газа поступает через кольцевую щель 4 в цилиндрический бункер – пылесборник 3, где большая масса частиц оседает, а продолжающие витать наиболее легкие (мелкие) фракции возвращаются через щели 7 в зону активной сепарации (каналы) и снова сепарируются. В ре-

зультате организации внутренних (циркулирующих) потоков в системе каналов образуется динамический газопылевой слой, который и является фильтром для вновь поступающих на очистку газа частиц.

Эффективность улавливания и гидравлическое сопротивление центробежного фильтра на расход газов до  $300 \text{ м}^3/\text{ч}$  полидисперсной пыли расчётным методом определялись при помощи компьютерного моделирования. Исходные данные для расчёта следующие: температура воздуха –  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ; плотность воздуха –  $1,293 \text{ кг}/\text{м}^3$ ; объёмный расход газов –  $300 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Расчётная область составляла 817 тыс. ячеек, из которых 300 тыс. расчётных ячеек заняты текучей средой (воздухом).

Аэродинамический расчёт позволил определить поля скоростей и давлений в системе каналов центробежного фильтра. Гидравлическое сопротивление по результатам расчётов составило  $686 \text{ Па}$ .

После получения результатов аэродинамических расчётов рассчитывалась эффективность осаждения пыли различных фракций по каналам центробежного фильтра. Задавалось равномерное распределение частиц пыли по сечению входного патрубка. Плотность пыли –  $1930 \text{ кг}/\text{м}^3$ . Результаты расчёта приведены на рис. 2.

Из приведенных рисунков видно, например, что частицы пыли диаметром около  $20 \text{ мкм}$

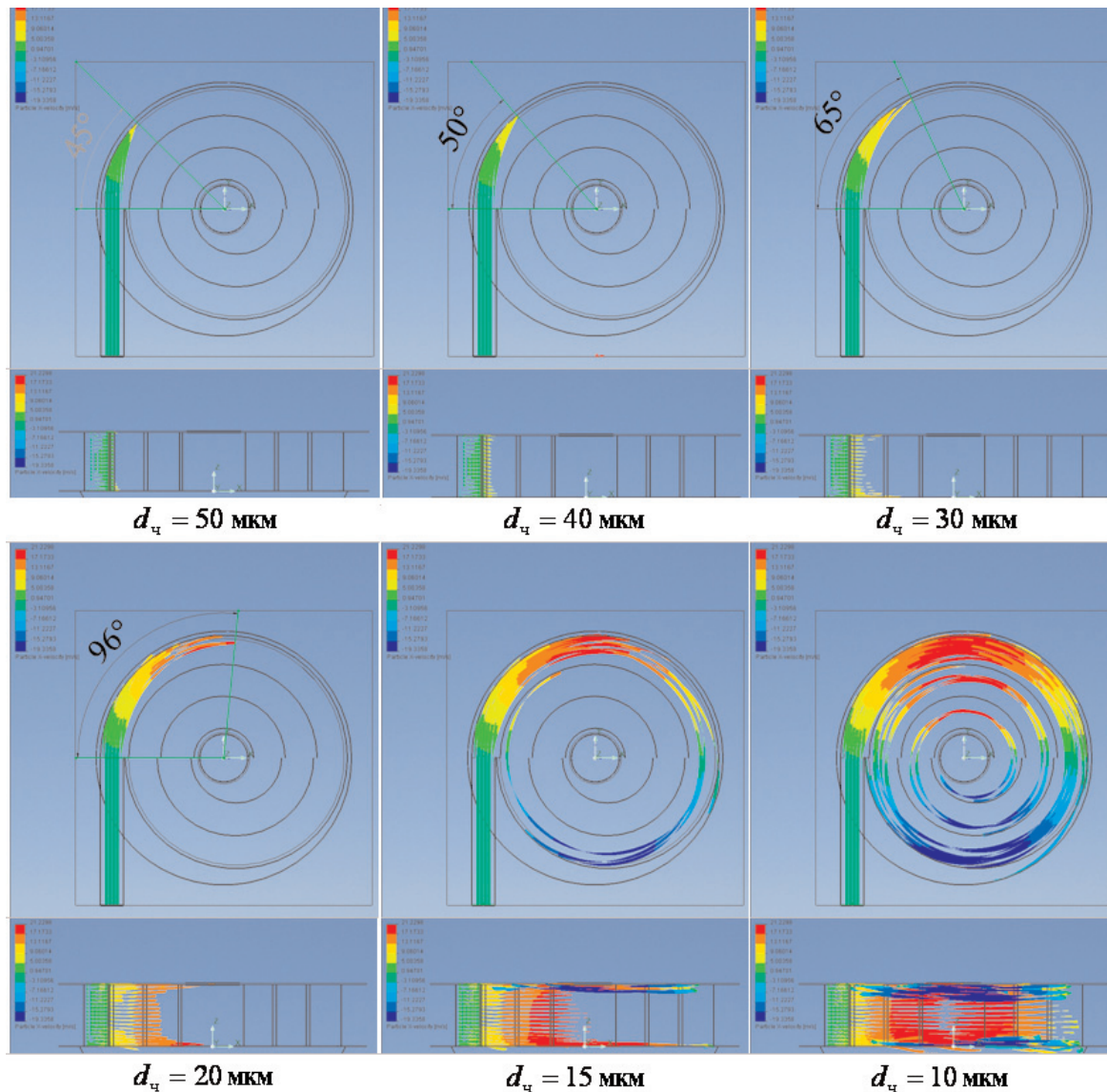


Рис. 2. Зависимость осаждения пыли в центробежном фильтре от угла поворота.

осаждаются преимущественно в первом канале, “проходя” угол, равный 96°; частицы диаметром 15 мкм преодолевают два канала и поворачиваются на угол, равный примерно 400°. Частицы диаметром 10 мкм относительно равномерно распределяются по всему сечению первого канала и начинают концентрироваться у стенок второго и последующих каналов, образуя циркулирующий возвратный поток через щели в предыдущие по ходу движения газа каналы.

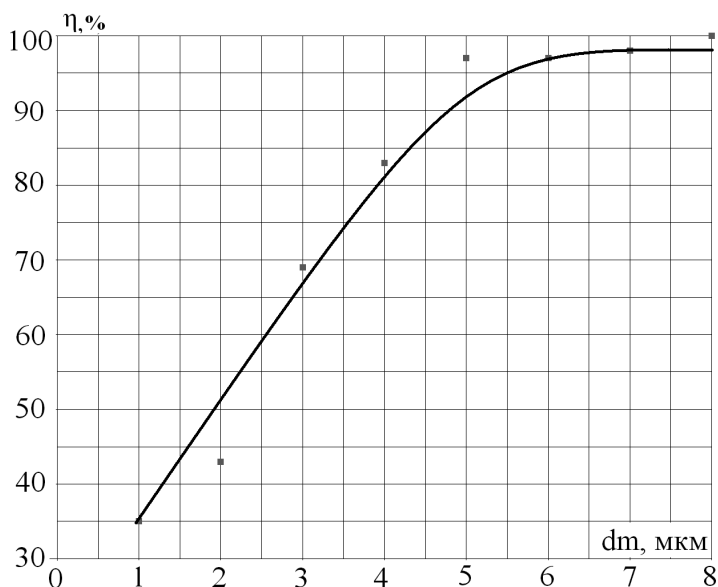
Результаты расчётов коэффициента улавливания в зависимости от диаметра улавливаемой пыли приведены на рис. 3.

Из приведенного рисунка можно сделать вывод о незначительной зависимости коэффициента улавливания в шестиканальном фильтре от диаметра частиц, начиная с 5...6 мкм.

Таким образом, получено удовлетворительное согласование с расчётной зависимостью, предложенной в [3], в которой коэффициент улавливания зависит лишь от числа каналов в аппарате:

$$\varepsilon = \frac{1}{1 + 2^{n-1}}.$$

Так, в соответствии с этой расчётной зависимостью унос пыли из шестиканального центробеж-



**Рис. 3.** Зависимость коэффициента улавливания в шестиканальном центробежном фильтре от диаметра частиц.

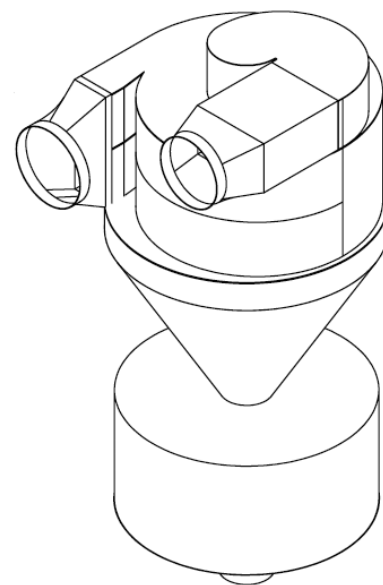
ного фильтра должен составлять 97% (при условии оседания 50% частиц в первом канале фильтра, а при условии оседания 60% частиц в первом канале эффективность улавливания — 98%).

Центробежные фильтры находят в последнее время широкое применение в различных отраслях промышленности. Их высокая эксплуатационная надёжность подтверждена более чем 7-ми летним опытом безотказной работы в системе газоочистки барабанной сушилки на Молдавском металлургическом заводе в условиях, в которых ранее установленные циклоны ЦН-15 истирались каждые полгода [3–4].

К недостатку, ограничивающему широкое распространение центробежного фильтра, можно отнести несколько повышенные габаритные размеры. Так, например, шестиканальный центробежный фильтр производительностью по очищаемому газу до 10 тыс. м<sup>3</sup>/ч имеет диаметр — 2,6 м, высоту — примерно 3500 мм (без бункера пылесборника).

Снижения габаритных размеров центробежного фильтра можно достичь двухуровневой компоновкой системы каналов в сепарационной головке аппарата [5].

При двухуровневой компоновке системы каналов появляется возможность регулировки производительности путём установки во входных



**Рис. 4.** Двухуровневый шестиканальный центробежный фильтр производительностью до 600 м<sup>3</sup>/ч (ЦФ 2-6-06).

патрубках шиберов. Регулировка производительности имеет позиционный характер — работает либо один, либо два уровня для сохранения оптимальных значений скоростей в криволинейных каналах центробежного фильтра (т.е. 50 и 100% производительности по очищаемому газу). Шиберы служат также для проведения периодических продувок внутренних поверхностей от пыли при повышенных скоростях газового потока.

Для экспериментальной проверки работоспособности такого аппарата был спроектирован и изготовлен двухуровневый центробежный фильтр на расход газов до 600 м<sup>3</sup>/ч (ЦФ 2-6-06) (рис. 4).

Сравнительные промышленные испытания двухуровневого центробежного фильтра ЦФ 2-6-06 и циклона ЦН-15 Ø 400 мм были проведены на Побужском ферроникелевом заводе в системе аспирации станка обработки графита в 2008 году. Испытания проводились по методике МВВ-081/12-0161-05.

Результаты испытаний приведены в табл. 1.

В результате проведенных испытаний было установлено, что при оптимальном режиме работы ЦФ 2-6-06 (его проектная производительность 600 м<sup>3</sup>/ч) достигается эффективность очистки 98,9%. Получено удовлетворительное согласование проведенного расчёта (при помощи компью-

Табл. 1. Сравнительные испытания циклона ЦН15 и центробежного фильтра ЦФ 2-6-06

Параметр:	Циклон ЦН-15 Ø 400 мм	Центробежный фильтр ЦФ 2-6-06
Расход газов, м <sup>3</sup> /ч	1062	603
Температура газов, °С	30	
Медианный диаметр пыли, мкм	19	
Скорость во входном патрубке, м/с	8,4	18
Скорость по сечению аппарата, м/с	2,3	1,15
Гидравлическое сопротивление, Па	570	703
Концентрация на входе, г/м <sup>3</sup>	8	6,18
Концентрация на выходе, г/м <sup>3</sup>	1,6	0,068
Коэффициент улавливания, %	80	98,9
Коэффициент уноса пыли, %	20	1,1

терного моделирования) с реальными значениями гидравлического сопротивления центробеж-



*Рис. 5. Двухуровневый шестиканальный центробежный фильтр производительностью до 8000 м<sup>3</sup>/ч (ЦФ 2-6-8).*

ного фильтра ЦФ 2-6-06. Расчётное значение эффективности очистки – 98%, а полученное в ходе испытаний составило 98,9%.

Промышленный образец двухуровневого шестиканального центробежного фильтра ЦФ 2-6-8 на производительность по очищаемому газу до 8000 м<sup>3</sup>/ч был спроектирован, изготовлен и смонтирован для системы газоочистки прокаточной печи коксовой шихты Запорожского титаномагниевого завода (рис. 5). Фильтр имел следующие размеры: диаметр – 1550 мм; высота – 2490 мм (без бункера пылесборника).

Центробежный фильтр заменил на установке циклон СИОТ № 9. Результаты сравнительных испытаний приведены в табл. 2. Испытания проводились по методике МВВ-081/12-0161-05.

Табл. 2. Сравнительные испытания циклона СИОТ №9 и центробежного фильтра ЦФ 2-6-8

Параметр	Циклон СИОТ № 9	Центробежный фильтр ЦФ 2-6-8
Расход газов, м <sup>3</sup> /ч	7481	7206
Температура, °С	110	125
Медианный диаметр пыли, мкм	11	7,2
Скорость во входном патрубке, м/с	–	14,3
Скорость по сечению аппарата, м/с	–	1,13
Гидравлическое сопротивление, Па	210	890
Концентрация на входе, мг/м <sup>3</sup>	5787	7300
Концентрация на выходе, мг/м <sup>3</sup>	1793	160
Коэффициент улавливания, %	69	97,8
Коэффициент уноса пыли, %	31	2,2

Табл. 3. Дисперсионный анализ в газоходе (вход в ЦФ 2-6-8)

№ ступени	Масса ступеней импактора, г		Привес, г	Константы ступеней		Весовое содержание пыли по ступеням (вес. %)	Интеграл. содерж. частиц (вес. %)
	Чистой	Запыленной		При условии калибров.	В условиях испытаний		
1	9,951	9,9612	0,0102	15	12,659	4,99	99,66
2	10,3184	10,3672	0,0488	15	12,659	28,89	94,66
3	9,7503	9,781	0,0307	12	10,127	43,92	70,77
4	8,0068	8,0813	0,0745	9	7,596	51,12	55,73
5	9,8147	9,8294	0,0147	5,5	4,642	56,21	19,25
6	8,8824	8,8928	0,0104	4	3,376	59,20	12,05
7	9,8232	9,8293	0,0061	3,2	2,701	60,38	6,96
8	8,856	8,8584	0,0024	2,4	2,025	61,12	3,97
9	9,8811	9,8826	0,0015	1,8	1,519	61,65	2,79
10	10,5367	10,5378	0,0011	1,5	1,266	63,52	2,06
11	13,9805	13,9843	0,0038	1,5	1,266	65,38	1,520

Табл. 4. Эффективность улавливание коксовой пыли типовыми циклонами и в центробежном фильтре (ЦФ 2-6-8) при гидравлическом сопротивлении порядка 1000 Па

№ п.п.	Тип циклона	Скорость в сечении циклона, м/с	Сопротивление циклона, Па	Коэффициент улавливания, %	Коэффициент уноса, %
1	ЦН-11- 700×2УП	2,9	889	60,0	40,0
2	ЦН-15- 600×2УП	3,9	1026	62,0	38,0
3	СКЦН-33-900-2 шт	1,75	1267	68,4	31,6
4	СКЦН-34-1000-2шт	1,41	1377	63,3	36,7
5	СКЦН-34-1600	1,1	838,5	50,8	49,2
6	СЦН-40-1000-2шт	1,3	1115	76	24
7	<b>ЦФ 2-6-8</b>	<b>1,13</b>	<b>890</b>	<b>97,8</b>	<b>2,2</b>

Дисперсионный анализ пыли на входе в двухуровневый центробежный фильтр, проведенный при помощи 11-ти ступенчатого импактора НИИюГАЗа показал, что средний медианный диаметр пыли составляет 7,2 мкм при величине стандартного отклонения  $\sigma = 2,1$  (табл. 3).

Приведем сравнительный расчёт улавливания пыли при гидравлическом сопротивлении порядка 1000 Па в типовых циклонах по методике [6], работающих в условиях, аналогичных приведенным в табл. 2.

Исходные данные для расчёта следующие: расход газов — 8000 м<sup>3</sup>/ч;  $t = 125$  °С; медианный диаметр пыли — 7,2 мкм;  $\sigma_{\Pi} = 2,1$ ; вязкость газа —

$22 \cdot 10^{-6}$  Па·с; плотность пыли — 1450 кг/м<sup>3</sup>. Результаты приведены в табл. 4.

Из таблицы видно, что унос пыли из центробежного фильтра (ЦФ 2-6-8) более чем на порядок ниже, чем в типовых циклонах при тех же уровнях энергозатрат.

### Выводы

1. Унос пыли из центробежного фильтра более чем на порядок ниже, чем в типовых циклонах при сравнимых гидравлических сопротивлениях.

2. Разработанная двухуровневая компоновка системы каналов в центробежном фильтре поз-

волила вдвое уменьшить диаметр центробежных фильтров. Эффективность работы и гидравлическое сопротивление такой конструкции проверены в промышленных условиях на аппаратах производительностью 600 и 8000 м<sup>3</sup>/ч.

3. Получено удовлетворительное согласование расчётов эффективности улавливания пыли в центробежном фильтре при помощи компьютерного моделирования и расчётной зависимости, учитывающей лишь количество каналов в аппарате.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Серебрянский Д.А.* Повышение эффективности газоочистки тепловых энергетических установок. Дис. канд. техн. наук: — Одесса, 2004, — 148 с.

2. *Буров А.И.* Гидравлика стратифицированных криволинейных течений в аппаратах с об-

ратными связями. Дис. д-ра. техн. наук: — Одесса, 1991, — 278 с.

3. *Балан С.А., Буров А.И., Буров А.А., Серебрянский Д.А.* Аппарат с замкнутыми контурами / Сб. научных статей „Экология и здоровье человека. Охрана водного и воздушного бассейнов. Утилизация отходов”. — Харьков, 2002.

4. *Буров А.А., Серебрянский Д.А., Лепихин А.П., Деревянченко И.В.* Использование пылеуловителей новой конструкции вместо циклонов // *Металлург.* — 2004. — № 5 — С. 23–27.

5. Заявка на патент Украины № а 2007 14002 от 10.01.2008.

6. *Приёмов С.И.* К расчету эффективности золоулавливания и гидравлического сопротивления циклонных аппаратов // *Пром. теплотехника.* — 2004. — Т. 26, № 4 — С. 47– 52.

*Получено 20.03.2009 г.*