

УДК 66.074.2

ОБ ОДНОМ СПОСОБЕ ОЧИСТКИ ГАЗА ОТ МЕХАНИЧЕСКИХ ПРИМЕСЕЙ

А. В. СНЕЖКО¹, В. А. СНЕЖКО²

¹ avsnzk@rambler.ru, ² vszh1@rambler.ru

¹ Азово-Черноморский инженерный институт

² ФГБОУ ВО «Донской государственный аграрный университет (ДонГАУ)

Поступила в редакцию 10.09.2019

Аннотация. Приводится описание и теоретическое обоснование способа очистки газов от механических пылевых примесей с использованием фильтрующей кассеты, совершающей поступательное движение по круговой траектории. Решается задача об относительном движении частиц в каналах кассеты. Оцениваются сепарационные возможности данного устройства с точки зрения тонкости и полноты очистки в зависимости от режима его движения и геометрических параметров. Проводится сравнительный анализ эффективности работы фильтрующей кассеты при различных формах сечений ее проточных каналов. Оценивается рациональность и технологические возможности секционирования фильтрующей кассеты каналами. Предлагается конструктивная схема устройства, использующего рассмотренный способ очистки.

Ключевые слова: очистка газа; пылеулавливание; пылевая частица; относительное движение частицы; винтовая траектория; коэффициент сепарации.

ВВЕДЕНИЕ

Очистка газов от механических частиц – одна из наиболее востребованных технологических операций, используемых в современной человеческой деятельности. Ее применение действительно повсеместно: от решения локальных бытовых задач в масштабах каждого дома до глобальных проблем промышленных выбросов в атмосферу. Многообразие задач газоочистки привело к появлению и развитию многочисленных способов и средств их решения. Непрерывное совершенствование этих средств является подтверждением того, что в любой сфере их применения в настоящее время не существует идеальных газоочистителей, в полной мере удовлетворяющих всему комплексу предъявляемых к ним требований, зачастую противоречащих друг другу (тонкость, полнота очистки, ресурс, себестоимость и т.д.). Особо остро эти проблемы проявляются при необходимости быстрой и качественной очистки больших объемов га-

зов, например, промышленных выбросов в теплоэнергетике, металлургии, химической, горнорудной и других отраслях производства, а также при очистке воздуха в газотурбинных двигателях летательных аппаратов, наземных машин, газоперекачивающих компрессорных станций.

Поэтому идеи и исследования, направленные на совершенствование методов газоочистки, по-прежнему являются актуальными.

ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ОЧИСТИТЕЛЯ

Принцип действия предлагаемого очистителя основан на известном физическом явлении. Если замкнутому объему, содержащему вязкую среду с взвешенными в ней частицами, сообщить поступательное движение по круговой траектории в плоскости, то через некоторое время частицы начнут описывать окружности определенных радиусов относительно границ этого объема.

Таким образом, предлагаемый способ очистки состоит в пропуске загрязненного

газа (воздуха) через фильтрующую кассету, совершающую поступательное движение по круговой траектории [1]. В этом случае частицы механических примесей внутри каналов кассеты будут совершать движения по винтовым линиям и в результате могут оседать на стенках этих каналов. Диаметр и шаг винтовой траектории, очевидно, зависят от физических свойств пылегазовой системы, а также параметров движения кассеты и газа.

УРАВНЕНИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ ЧАСТИЦЫ

Рассмотрим движение частицы пыли в канале кассеты, совершающей поступательное круговое движение в горизонтальной плоскости, при пропуске через нее снизу вверх запыленного газа (рис. 1).

Дифференциальное уравнение движения частицы относительно канала кассеты имеет вид:

$$m \frac{d\bar{v}}{dt} = \bar{F}_a + \bar{F}^e + m\bar{g},$$

где $\bar{F}_a = \bar{F}_{xy}^a + \bar{F}_z^a$ – аэродинамическая сила сопротивления, Н, подчиняющаяся закону Стокса (т.е. пропорциональная скорости движения частицы относительно газовой среды) и ее горизонтальная и вертикальная векторные составляющие, причем:

$$\bar{F}_{xy}^a = -3\pi \cdot \delta \cdot \mu \cdot \bar{v}_{xy},$$

$$\bar{F}_z^a = 3\pi \cdot \delta \cdot \mu \cdot (\bar{w} - \bar{v}_z),$$

где m – масса частицы, кг; δ – диаметр частицы, м; μ – динамическая вязкость газа, Па/с; \bar{w} , \bar{v}_{xy} , \bar{v}_z – соответственно скорость потока газа, горизонтальная и вертикальная составляющие скорости частицы, м/с; $\bar{F}^e = m \cdot \omega^2 \bar{\rho}$ – переносная сила инерции, Н, направленная противоположно переносному нормальному ускорению: $\bar{a}_n^e = -\omega^2 \bar{\rho}$, м/с²; ω – угловая скорость кривошипа привода кассеты, с⁻¹; $\bar{\rho}$ – радиус переносной круговой траектории (т.е. радиус кривошипа), м; $m\bar{g}$ – сила тяжести частицы, Н.

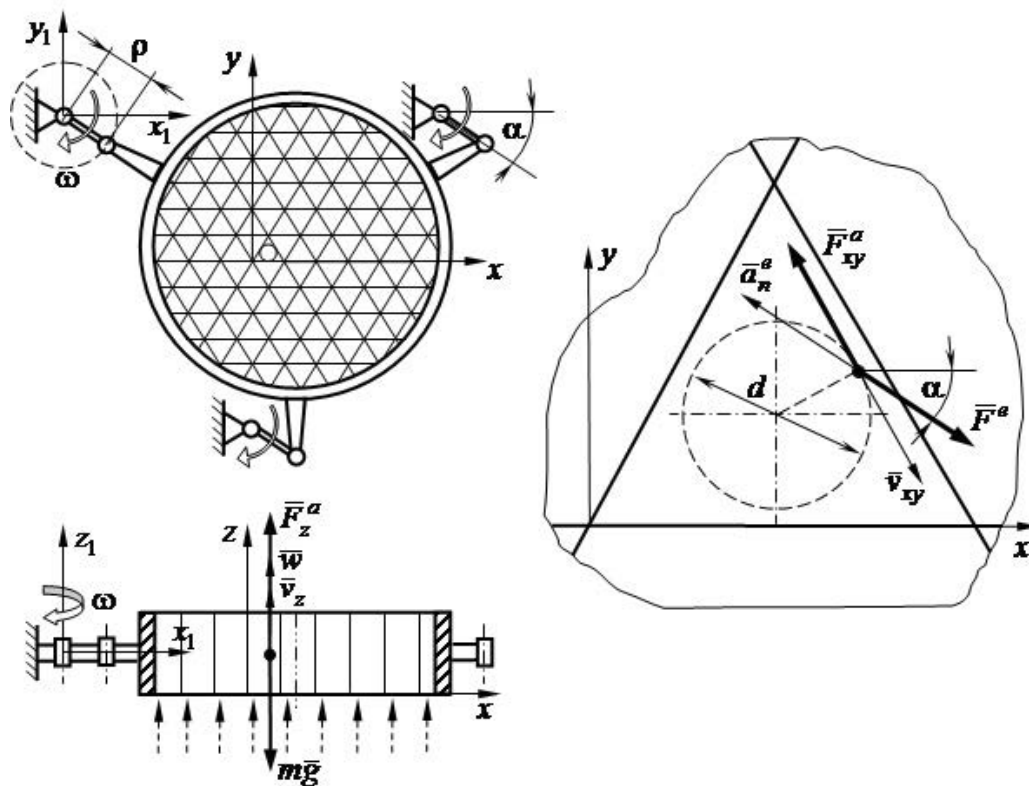


Рис. 1. Схема сил, действующих на частицу в канале кассеты, совершающей поступательное движение по круговой траектории в горизонтальной плоскости

Проецируя это векторное уравнение на координатные оси x - y - z , неизменно связанные с кассетой, получим:

$$m \cdot \ddot{x} = -3\pi \cdot \delta \cdot \mu \cdot \dot{x} + m \cdot \omega^2 \rho \cdot \cos \alpha;$$

$$m \cdot \ddot{y} = -3\pi \cdot \delta \cdot \mu \cdot \dot{y} - m \cdot \omega^2 \rho \cdot \sin \alpha;$$

$$m \cdot \ddot{z} = 3\pi \cdot \delta \cdot \mu \cdot w - 3\pi \cdot \delta \cdot \mu \cdot \dot{z} - m \cdot g.$$

Решим эти уравнения при следующих начальных условиях: при $t = 0$, $x_0 = 0$, $y_0 = 0$, $z_0 = 0$, $\dot{x}_0 = 0$, $\dot{y}_0 = 0$, $\dot{z}_0 = w$.

В результате получим уравнения движения частицы относительно канала кассеты:

$$x = (e^{-At} - 1) \frac{r}{A} \sin \beta - r \cos \beta - r \cos(\omega t + \beta);$$

$$y = (e^{-At} - 1) \frac{r}{A} \cos \beta - r \sin \beta + r \sin(\omega t + \beta);$$

$$z = \frac{g}{A^2} (1 - e^{-At}) + \left(w - \frac{g}{A} \right) \cdot t.$$

Здесь введены следующие обозначения: $\alpha = \omega \cdot t$ — угол поворота кривошипа, $A = \frac{3\pi \cdot \delta \cdot \mu}{m} = \frac{18\mu}{\delta^2 \cdot \rho_q}$ (где ρ_q — плотность

пылевой частицы, кг/м^3), $r = \frac{\omega \cdot \rho}{\sqrt{A^2 + \omega^2}}$,

$$\beta = \arctg \frac{A}{\omega}.$$

Полученные уравнения можно существенно упростить, так как коэффициент A для малых частиц загрязнений принимает довольно большое значение. Например, для движения кварцевой пыли (при плотности $\rho_q = 2650 \text{ кг/м}^3$) в воздухе (при $\mu = 18,1 \cdot 10^{-6} \text{ Па/с}$) получим

$$A = \frac{3\pi \cdot \delta \cdot \mu}{m} = \frac{18\mu}{\delta^2 \cdot \rho_q} = \frac{122943}{\delta_{\text{МКМ}}^2},$$

где $\delta_{\text{МКМ}}$ — диаметр пылевых частиц, измеряемый для удобства оценки в микронах, мкм .

Тогда для частиц кварца размером $\delta_{\text{МКМ}} \leq 20 \text{ мкм}$ и времени их движения в канале $t \geq 0,02 \text{ с}$ имеем $e^{-At} - 1 \approx -1$, а также

$\frac{g}{A^2} \approx 0$. В этом случае уравнения движения примут простой вид:

$$x = -r \cdot \cos(\omega t + \beta) - X_0;$$

$$y = r \cdot \sin(\omega t + \beta) - Y_0;$$

$$z = \left(w - \frac{g}{A} \right) \cdot t.$$

Здесь параметры X_0 и Y_0 , если ввести обозначение $\frac{1}{A} = \tan \gamma$, будут равны

$$X_0 = \frac{r}{\cos \gamma} \cos(\beta - \gamma);$$

$$Y_0 = \frac{r}{\cos \gamma} \sin(\beta + \gamma).$$

Для пылевых частиц малого размера (при $\delta_{\text{МКМ}} \leq 20 \text{ мкм}$) имеем $\gamma \approx 0$. Тогда

$$X_0 = r \cdot \cos \beta; \quad Y_0 = r \cdot \sin \beta.$$

Кроме того, для частиц кварца размером $\delta_{\text{МКМ}} \leq 100 \text{ мкм}$ можно принять $w - \frac{g}{A} \approx w$, поскольку уже при величине $\delta_{\text{МКМ}} = 100 \text{ мкм}$ получим $\frac{g}{A} = 0,08 \text{ м/с}$ (т.е. $\frac{g}{A} \ll w$).

Таким образом, с учетом сделанных допущений уравнения относительного движения малых пылевых частиц кварца в воздушной среде каналов кассеты будут иметь вид

$$x = -r \cdot \cos(\omega t + \beta) - r \cdot \cos \beta;$$

$$y = r \cdot \sin(\omega t + \beta) - r \cdot \sin \beta;$$

$$z = w \cdot t.$$

Эти уравнения описывают винтовую линию постоянного диаметра и шага в параметрической форме. Ее диаметр равен $d = \frac{2\omega \cdot \rho}{\sqrt{A^2 + \omega^2}}$, м ; шаг H соответствует перемещению частицы по вертикали за время одного витка: $T = 2\pi/\omega$, с ; т.е.

$H = w \cdot T = 2\pi \frac{w}{\omega}$, м. Ось винтовой линии смещена относительно начального положения частицы на входе в канал кассеты (при $x_0 = 0, y_0 = 0$) в точку с координатами $x_1 = r \cdot \cos \beta, y_1 = r \cdot \sin \beta$, м.

ОЦЕНКА СЕПАРАЦИОННОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОЧИСТИТЕЛЯ

Исходя из описанного характера движения частиц в каналах кассеты, оценим ее возможность пылеулавливания. При этом будем считать, что частица задержана, как только она коснется стенки канала.

Определим предельный (минимальный) размер гарантированно улавливаемых частиц $\delta_{пр}$ при условии равенства диаметров их винтовой траектории и окружности, вписанной в сечение канала: $d = d_{вп}$. Используя формулы для диаметра винтовой линии d и коэффициента A , приведенные выше, получим

$$\delta_{пр} = \sqrt{\frac{18\mu}{\rho_ч \cdot \omega \cdot \sqrt{(2\rho/d_{вп})^2 - 1}}}$$

Как следует из этого выражения, предельный диаметр $\delta_{пр}$ гарантированно задерживаемых частиц зависит:

- от физических свойств газодисперсной среды (в частности вязкости газа μ и плотности частиц $\rho_ч$);

- от параметров движения каналов кассеты (угловой скорости кривошипа ее привода ω);

- от соотношения между радиусом траектории кругового движения канала (т.е. кривошипа) и диаметром винтовой траектории относительного движения частицы, равным диаметру вписанной в канал окружности – $\rho/d_{вп} = K$.

На рис. 2 представлены графики зависимостей $\delta_{пр} = f(\omega, K)$, просчитанных для воздушной среды ($\mu = 18,1 \cdot 10^{-6}$ Па/с) и кварцевых пылевых частиц ($\rho_ч = 2650$ кг/м³).

Частицы пыли размерами меньше предельного $\delta_{пр}$ будут задержаны в каналах лишь частично.

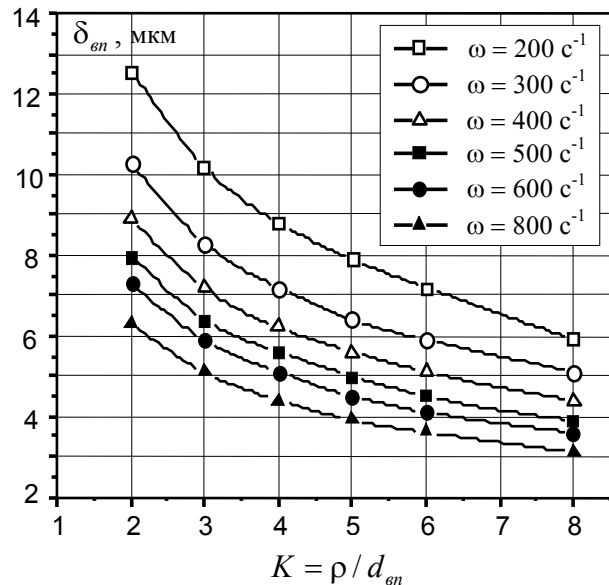


Рис. 2. Графики зависимости предельного диаметра $\delta_{пр}$ задерживаемых частиц от угловой скорости кривошипа ω и соотношения $K = \rho/d_{вп}$

ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНОЙ ФОРМЫ СЕЧЕНИЙ КАНАЛОВ ОЧИСТИТЕЛЯ

На рис. 3 представлены три типа сечений каналов – прямоугольные (щелевые), треугольные и квадратные.

Наиболее металлоемкими являются кассеты с квадратными каналами. Можно показать, что по этому показателю они почти в два раза превосходят щелевые. Каналы треугольного сечения занимают промежуточное положение.

С другой стороны, щелевые каналы уступают двум другим в эффективности очистки. Так, коэффициент сепарации (улавливания) частиц с диаметром относительной винтовой траектории меньшим, чем диаметр вписанной в ячейку окружности:

$$d_1 < d_{вп}, \text{ определяемый как } \varphi_{d1} = \frac{d_1}{d_{вп}}, \text{ здесь}$$

будет минимальным.

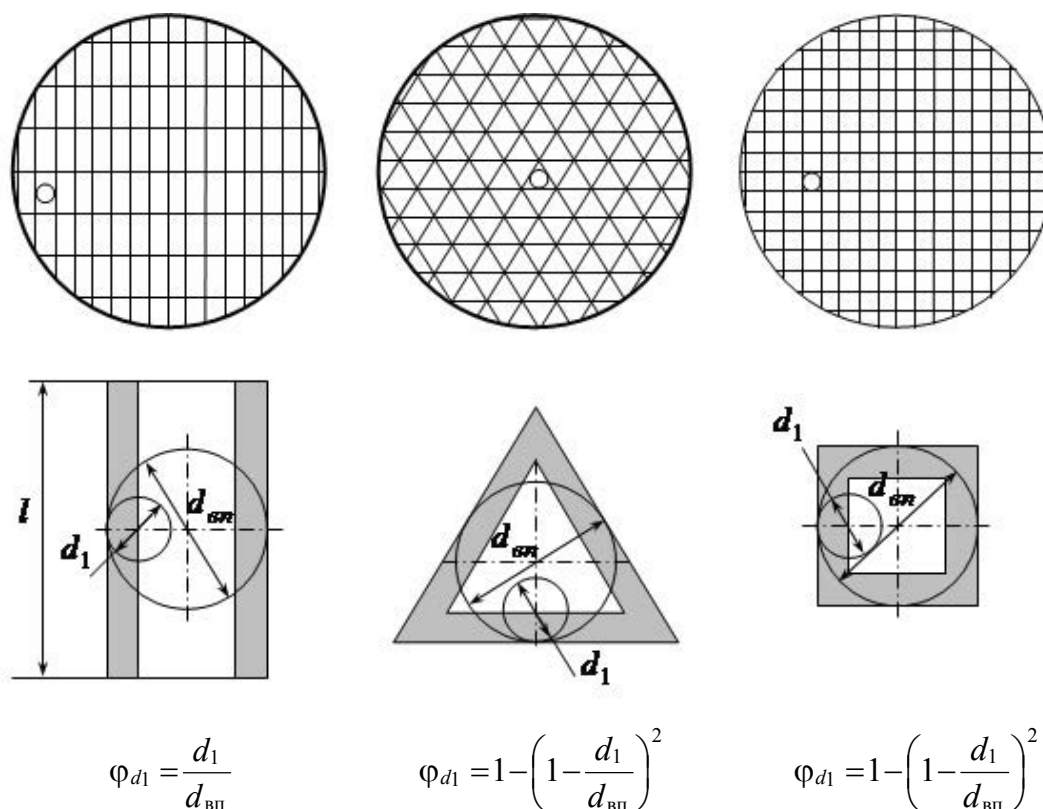


Рис. 3. Типы сечений каналов и коэффициент сепарации в них частиц φ_d , для которых диаметр винтовой траектории меньше вписанного в сечение, $d_1 < d_{\text{вп}}$

Этот коэффициент будем определять как отношение площади сечения канала, при нахождении в которой данные частицы гарантированно достигнут его стенок (на рис. 3 эти зоны затемнены), ко всей площади канала.

Поскольку диаметрам траекторий частиц d_1 и вписанных в ячейку окружностей $d_{\text{вп}}$ соответствуют определенные размеры этих частиц \square_1 и $\square_{\text{пр}}$, то это позволяет коэффициент улавливания φ_{d_1} соотнести с этими размерами.

На рис. 4 графически представлено расчетное процентное количество частиц, диаметром менее предельного $\square_{\text{пр}}$, улавливаемых кассетой с квадратными и треугольными каналами. Как видно из графиков, больше половины частиц, размер которых в два раза меньше, чем предельный, улавливаются в этих каналах.

Далее оценим сепарационные возможности пылеочистителей рассматриваемого

типа, исходя из технологических возможностей секционирования кассеты каналами.

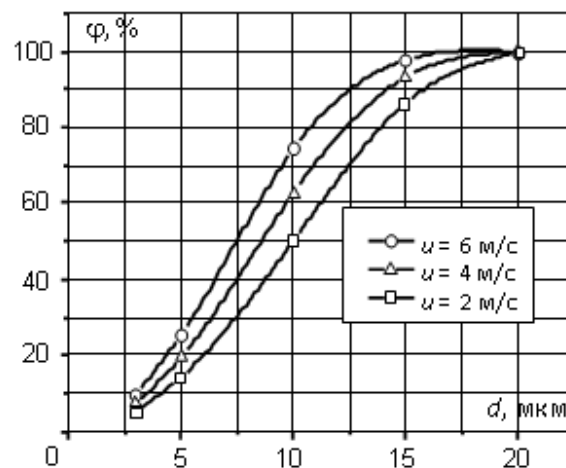


Рис. 4. Коэффициент сепарации φ частиц диаметром, менее предельного $\square_{\text{пр}}$ при различных окружных скоростях u движения кассеты

В табл. 1 представлены расчетные значения диаметров винтовой траектории частиц в зависимости от радиуса кривошипа привода ρ и окружной скорости каналов кассеты $u = \omega \cdot \rho$.

Таблица 1

Расчетные диаметры винтовой траектории частиц d в зависимости от окружной скорости канала u , радиуса кривошипа ρ и размера частиц δ

Диаметр винтовой траектории частицы d , мм										
Окружная скорость u , м/с		4			5			6		
Радиус кривошипа ρ , мм		10	15	20	10	15	20	10	15	20
Диаметр частицы δ , мкм	1	0,065	0,065	0,065	0,081	0,081	0,081	0,098	0,098	0,098
	3	0,585	0,586	0,586	0,732	0,732	0,732	0,878	0,878	0,878
	5	1,62	1,62	1,62	2,0	2,0	2,0	2,42	2,43	2,44
	10	6,2	6,4	6,4	7,5	7,8	8,0	8,8	9,3	9,5
	15	11,8	13,2	13,7	13,5	15,6	16,6	14,9	17,7	19,2
	20	15,9	19,7	21,8	17,0	22,1	25,2	17,8	23,8	27,9

Как видно из таблицы, секционирование кассеты с целью улавливания частиц размером менее 5 мкм весьма проблематично.

В этом случае диаметры ячеек при приемлемых конструктивных параметрах привода кассеты (ρ) и режимах ее движения (u) оказываются равными десятым долям миллиметра.

Вместе с тем кассета может представлять грубый объемный фильтр с диаметром пор 80–100 мкм и при этом задерживать частицы до 1 мкм и даже ниже.

Радиус кривошипа может быть в пределах 10–20 мм, тем самым рычажный механизм привода упрощается до эксцентрикового (рис. 5).

Возможной проблемой в пылеочистителях рассматриваемого типа может быть периодическое удаление из кассеты задержанных частиц, особенно при высокой запыленности воздуха.

На рис. 5 представлена конструктивная схема пылеочистителя с периодической продувкой кассеты сжатым воздухом. В отдельных технологических процессах, очевидно, возможна промывка кассеты водой [1].

Главным недостатком рассмотренного способа очистки пылегазовых систем в сравнении с традиционными инерционными решетками, циклонами, фильтрами и др. является усложнение конструкции из-за наличия приводного механизма.

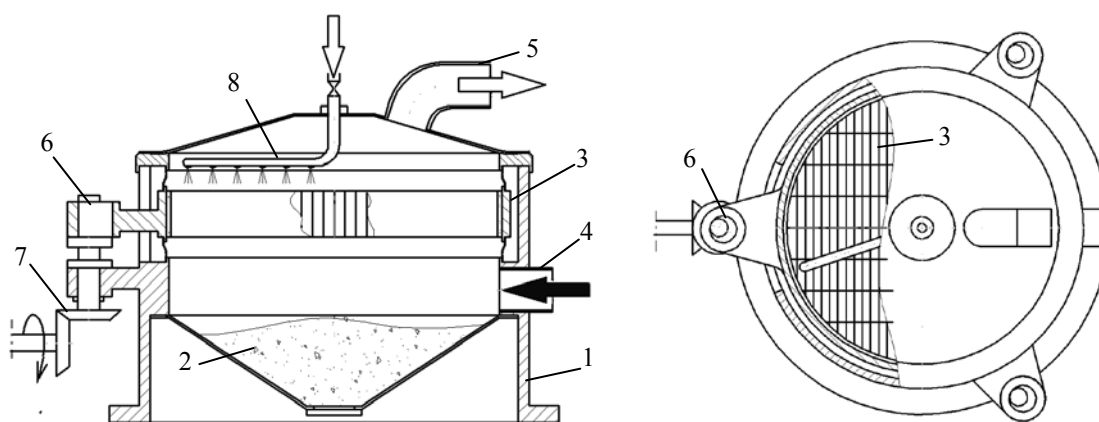


Рис. 5. Конструктивная схема пылеочистителя: 1 – корпус; 2 – бункер-пылесборник; 3 – сепарирующая кассета; 4, 5 – входной и выходной патрубки; 6 – эксцентриковые механизмы; 7 – редуктор привода; 8 – устройство продувки кассеты

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основное преимущество предлагаемого способа очистки газов от механических примесей – его высокая сепарационная эффективность при большом расходе запыленной среды. Поэтому подобные устройства могут быть эффективно использованы для очистки промышленных газов больших объемов, а также в качестве воздухоочистителей газотурбинных двигателей газоперекачивающих компрессорных станций, вертолетов, наземных мобильных машин.

Кроме того, применяя такой способ, можно повысить сепарационную эффективность фильтров грубой очистки, обеспечив им при возможности восстановления неограниченный срок службы.

Настоящая работа представляет собою теоретическое обоснование оригинального способа очистки пылегазовых систем: его концепции и потенциальной эффективности. Отсутствие на данный момент экспериментальных исследований не дает возможности провести реальное количественное сравнение основных его характеристик, таких как тонкость очистки, производительность, грязеемкость и др. с традиционными методами. Вместе с тем приведенное в статье теоретическое обоснование позволяет, на наш взгляд, надеяться на успешное внедрение такого способа очистки после соответствующей экспериментальной проверки и доработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А. с. SU 923577, В 01 D 47/06. Пылеулавливающее устройство / Снежко В.А. – Заявка: 2942366/23–26; 18.06.80; Опубл. 30.04.82. Бюл. № 16.

ОБ АВТОРАХ

СНЕЖКО Андрей Владимирович, доц. каф. технической механики и физики Азово-Черноморского инженерного института ДонГАУ. Дипл. инж.-мех. с/х (АЧИМСХ, 1989). Канд. техн. наук по экпл. восст. и ремонту с/х машин и орудий (АЧГАА, 2000). Иссл. в обл. центробежной очистки техн. масел.

СНЕЖКО Владимир Андреевич, доц. Дипл. инж.-мех. с/х (АЧИМСХ, 1959). Канд. техн. наук по мех. с.х. производства (ХИМЭСХ, 1972). Иссл. в обл. центробежной очистки воздуха и жидкостей.

METADATA

Title: About one method of gas purification from particles.

Authors: A. V. Snezhko¹, V. A. Snezhko²

Affiliation:

¹ Azov-Black sea Engineering Institute

² Don State Agrarian University (DGAU), Russia.

Email: ¹ avsnzk@rambler.ru, ² vszh1@rambler.ru

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 23, no. 4 (86), pp. 108-114, 2019. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: Discloses a method and theoretically proved gas purification from dust fractions by filtration cassette which makes reciprocating movement along a circular path. It solved the problem of relative movement of the particles in the cartridge channels. Defined separation capabilities of this device: namely the fineness and completeness of purification, depending on their mode of motion and the geometric parameters of the device. A comparative analysis of the efficiency of the filter cartridge in various forms of cross-sections of its flow channels. Determined by the technological possibilities of partitioning the filter channels tapes. Proposed design of the device using the method discussed purification.

Key words: cleaning gas; dust particles; relative motion of the particles; helical trajectory; separation factor.

About authors:

SNEZHKO, Andrey Vladimirovich, Assoc. Prof., Dept. of Technical Mechanics and Physics. Cand. Of Tech. Sci. (Azov-Black Sea State Academy of Agricultural Engineering, 2000).

SNEZHKO, Vladimir Andreyich, Assoc. Prof., Cand. Of Tech. Sci. (Kharkov Institute of mechanization and electrification of agriculture, 1972).