

УДК 621.928.93

## АЭРОДИНАМИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ВИНТОВОГО КАНАЛА В ЦИКЛОНЕ-СЕПАРАТОРЕ

**В.Л. Злочевский\*, К.А. Мухопад**

ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический  
университет им. И.И. Ползунова»,  
656038, Россия, Алтайский край, г. Барнаул, пр. Ленина, 46

\*e-mail: zlvl@mail.ru

Дата поступления в редакцию: 26.06.2017

Дата принятия в печать: 04.09.2017

**Аннотация.** Для очистки от пыли технологического воздуха в настоящее время используется большое количество пылеуловителей, отличающихся своими конструктивными (геометрическими) параметрами. Для обеспыливания воздуха в системах пневмотранспорта и аспирации зерноперерабатывающих предприятий, предприятий пищевой промышленности и сельского хозяйства широкое распространение получили центробежные пылеуловители – циклоны, такие как УЦ-38, УЦМ-38, 4БЦШ, ОТИ, ЦН и др. На практике эффективность очистки газов, достижимая в перечисленных аппаратах, часто оказывается недостаточной. Поэтому многие из аппаратов центробежной очистки газов применяются главным образом в качестве первой ступени перед более эффективными пыле- и золоуловителями. Аэровинтовой циклон-сепаратор, конструкция которого защищена патентами [1, 2] и основана на винтовой вставке, помещенной между конической обечайкой и цилиндрической выхлопной трубой, позволяет достигать степени очистки технологического воздуха до 99,9 % на продуктах зернопереработки. Высокая эффективность аэровинтового циклона обусловлена созданием внутри аппарата закрученного винтового аэродисперсного потока с возрастающим центробежным эффектом за счет переменной геометрии ограничивающих поток стенок. Для внедрения аэровинтового циклона на предприятиях зернопереработки, угольной промышленности, энергетики и др. необходимо обеспечить приемлемые энергетические показатели при работе данного аппарата. Основным элементом, определяющим аэродинамическое сопротивление всей конструкции циклона, является винтовой канал. Предложена модель расчета аэродинамического сопротивления винтового канала в аэровинтовом циклоне, проанализировано влияние геометрических параметров циклона, кинематических и динамических характеристик аэропотока.

**Ключевые слова.** Аэровинтовой циклон, центробежная очистка, аэродинамическое сопротивление, аэродисперсный поток, винтовой канал

## AERODYNAMIC DRAG OF THE SCREW CHANNEL IN THE CYCLONE-SEPARATOR

**V.L. Zlochevskiy\*, K.A. Mukhopad**

Polzunov Altai State Technical University,  
46, Lenina Ave., Barnaul, 656038, Russia

e-mail: zlvl@mail.ru

Received: 26.06.2017

Accepted: 04.09.2017

**Abstract.** A large number of dust collectors differing in their design (geometric) parameters are currently used for purifying process air from dust. Centrifugal dust collectors – cyclones, such as U-38, UCM-38, 4BTSH, OTI, CN, etc., have been widely used for air dedusting in pneumatic transport systems and aspiration systems at grain processing enterprises and at the enterprises of food industry and agriculture. The efficiency of gas purification achievable in these apparatuses is often insignificant in practice. Therefore, a lot of centrifugal gas purification apparatuses are mainly used as the first stage before using more efficient dust and ash collectors. The aero-screw cyclone – separator, whose construction is protected by the patents (1, 2) and based on the screw insert placed between a conic shell and a cylindrical exhaust pipe, enables to achieve the purification degree of process air up to 99.9% on the grain processing products. High efficiency of the aero-screw cyclone is caused by the creation of the swirled helical aero-dispersed flow inside the apparatus with an increasing centrifugal effect due to the variable geometry of the flow-restricting walls. To introduce the aero-screw cyclone at grain processing enterprises, coal industry, power engineering, etc., it is necessary to provide acceptable energy indices during the operation of the given apparatus. The main element which determines the aerodynamic drag of the entire cyclone design is a screw channel. A model is proposed for calculating the aerodynamic drag of the screw channel in the aero-screw cyclone; the influence of the geometric cyclone parameters and of the kinematic and dynamic characteristics of the air flow is analyzed.

**Keywords.** Aero-screw cyclone, centrifugal cleaning, aerodynamic drag, aero-dispersed flow, screw channel

## Введение

Обеспыливание воздуха в системах пневмотранспорта и аспирации зерноперерабатывающих предприятий, предприятий пищевой промышленности и сельского хозяйства является важной задачей. Для решения этой задачи широкое распространение получили аппараты, использующие центробежный способ пылеочистки, – циклоны. Анализ используемых в отечественной и зарубежной промышленности циклонов был проведен, например, в работах [3, 4]. Практически в каждой модели центробежных циклонов присутствуют два элемента – цилиндрическая часть, где формируется поток, содержащий удаляемые частицы твердого материала, и происходит его закрутка, и коническая часть, где происходит формирование двух антинаправленных потоков и отделение твердых частиц из потока.

Широкое распространение циклонных пылеуловителей на производстве обусловлено следующими достоинствами перед другими аппаратами аналогичного назначения [3, 5]:

- 1) простота конструкции и сравнительно небольшая стоимость;
- 2) возможность функционирования в условиях высоких температур и давлений без каких-либо принципиальных изменений в конструкциях;
- 3) возможность улавливания и классификации абразивных включений при защите внутренних поверхностей циклонов специальными покрытиями;
- 4) высокая производительность и сохранение требуемого уровня фракционной эффективности очистки с ростом массовой концентрации твердой фазы;
- 5) возможность сухого осаждения продукта.

## Объекты и методы исследования

В любом случае объединяющим фактором для всех моделей циклонов является принцип центробежного отделения твердых частиц из переносимого их потока. Соответственно, чем лучше реализуется этот принцип в конструкции циклона, тем выше его эффективность. Во многих работах [5–7] указывается, что эффективность отделения твердых частиц зависит как от физических свойств частиц, например, плотности, формы поверхности, дисперсного состава, так и от геометрических размеров и формы циклонов, а также от скорости движения запыленного потока. Эффективность центробежных циклонов напрямую связана с критерием Фруда, который определяется как отношение силы инерции к силе тяжести частицы по формуле

$$Fr = \frac{v_{\phi}^2}{g \cdot R}, \quad (1)$$

где  $v_{\phi}$  – тангенциальная составляющая скорости дисперсной частицы;  $g$  – ускорение свободного падения;  $R$  – радиус окружности, по которой в данный момент перемещается частица.

Если ориентироваться только на величину критерия Фруда, то большего эффекта отделения частиц

можно добиться, увеличивая скорость твердых частиц, а значит и скорость дисперсного потока, и, уменьшая радиус  $R$ , т.е. габариты циклонного аппарата. Однако, некоторые данные говорят о том, что уменьшение габаритных размеров циклонов не всегда приводит к повышению их эффективности, а увеличение входной скорости выше оптимальной наоборот снижает эффективность циклонов. На практике же эффективность очистки газов, достижимая в центробежных аппаратах, оказывается недостаточной. Особенно низкую эффективность центробежные циклоны проявляют на твердых частицах диаметром менее 10 мкм. Объясняется это следующими причинами. По мере движения воздушного потока вместе с частицами внутри циклонного аппарата происходит изменение всех трех составляющих вектора скорости – тангенциальной  $v_{\phi}$ , радиальной  $v_r$  и осевой  $v_z$ . Например, в работе [7] представлены профили составляющих скорости потока в циклоне, так называемые диаграммы Тер-Линдена.

Можно отметить, что максимальное значение тангенциальной скорости  $v_{\phi}$  достигается совсем не на стенках конической части циклона, а практически в ядре восходящего противотока. Увеличение тангенциальной скорости  $v_{\phi}$  в 2–2,5 раза происходит ближе к выпускному отверстию внизу конуса, но до этого момента частицы пыли уже должны быть вынесены на периферию. Профили радиальной скорости наглядно показывают, что движение частиц пыли к стенкам циклона происходит очень медленно. Многочисленные исследования подтверждают тот факт, что мелкодисперсная пыль вообще выносится через выхлопную трубу, практически не попадая в коническую часть циклона. Профили осевых скоростей фактически позволяют констатировать, что большая часть объема циклона занята восходящим вихревым противотоком, причем его осевая скорость значительно больше той скорости, с которой происходит транспорт частиц по стенкам конической части циклона.

Стоит отметить, что в противоточных циклонах даже те частицы, которые были выделены из потока к стенкам конической части, подвержены выносу в выхлопную трубу. Здесь можно отметить два фактора. Первый фактор – вихревой шнур, формирующийся вдоль вертикальной оси циклона, может «гулять» или прецессировать относительно оси, а, значит, захватывать уже отсепарированные частицы. Устойчивость этого вихревого шнура обусловлена многими факторами, в том числе геометрией циклона и кинематикой процесса, но такого рода прецессирование подтверждается многими исследованиями как экспериментально, так и при проведении численного гидродинамического моделирования.

Второй фактор, определяющий вынос частиц в выхлопную трубу, заключается в том, что крупные частицы могут зависать в потоке, не дойдя до выпускного отверстия. Такое происходит по причине увеличенной парусности крупных частиц и образования агломератов. Например, в работе [8] выполнен

обзор ряда исследований CFD-моделирования работы циклонов и рассмотрено влияние обратных внутренних (восходящих) потоков газа, которые снижают степень сепарации пыли внутри циклонов.

Для устранения недостатков, присущих классическим центробежным циклонам, предлагается для очистки технологического воздуха использовать аэровинтовой циклон (рис. 1), конструкция которого защищена патентами [1, 2]. Основным элементом данного циклона является коническая винтовая вставка, позволяющая создавать ограниченное пространство в форме винтового канала с уменьшающейся площадью поперечного сечения. При этом выхлопная труба ограничивает взаимодействие основного потока, содержащего частицы пыли, и противотока – очищенного воздуха. Конструкция аэровинтового циклона также позволяет использовать его в качестве классификатора, отделяя дисперсные частицы в соответствии с их аэродинамическими свойствами на различных высотных отметках.

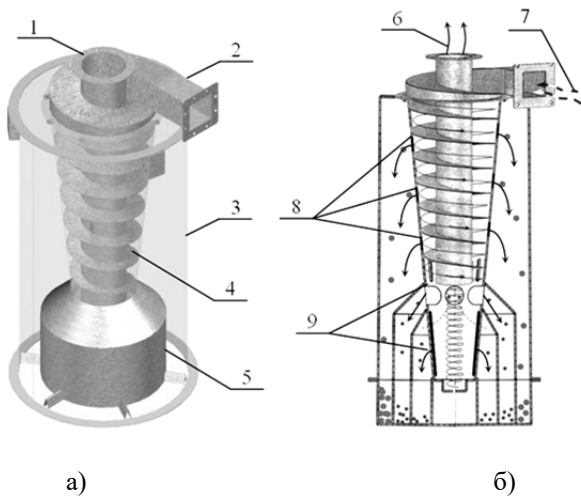


Рис. 1. Аэровинтовой циклон:

- а) конструкция аэровинтового циклона: 1 – выхлопная труба; 2 – входной патрубок; 3 – внешняя обечайка; 4 – винтовая вставка; 5 – пылесборник; б) принцип работы: 6 – вывод очищенного воздуха; 7 – вход запыленного воздуха; 8 – вывод крупной и тяжелой фракций; 9 – вывод мелкой и легкой фракций

Движение дисперсного потока в аэровинтовом циклоне происходит за счет перепада давления  $\Delta P$ , которое создает вентилятор. Создаваемый перепад давления  $\Delta P$  расходуется на преодоление сил трения со стороны стенок, ограничивающих движение дисперсного потока, на разгон потока в сужающемся канале, который формируется конической винтовой вставкой, на вихреобразование в полости винтового канала, а также на ускорение потока при нестационарном движении. При моделировании движения частиц сыпучего материала в межвитковом пространстве винтовой вставки необходимо знать информацию о параметрах несущей среды (воздуха) – скорости, плотности, давлении, температуре потока. При этом стоит понимать, что незначительные изменения геометрии винтового ка-

нала могут приводить к «перестройки» структуры аэродисперсного потока, а это, в свою очередь, повлияет на аэродинамическое сопротивление аппарата в целом.

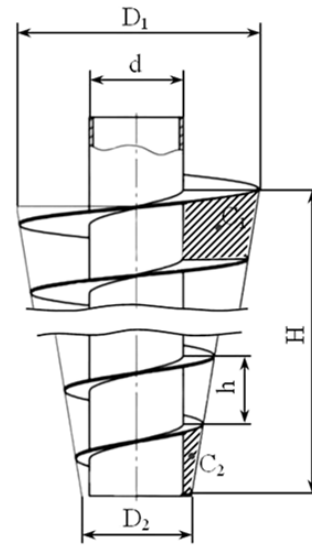


Рис. 2. Основные геометрические размеры аэровинтового циклона

При определении параметров аэродисперсного потока вдоль винтового канала необходимо предварительно вычислить длину винтовой линии, вдоль которой движется аэропоток. Длина винтовой линии будет определяться геометрическими параметрами аэровинтового циклона, основные геометрические размеры которого приведены на рис. 2. К ним относятся:  $H$  – высота винтовой вставки,  $h$  – шаг винтовой вставки,  $d$  – диаметр выхлопной трубы,  $D_1$  – больший диаметр конической обечайки,  $D_2$  – меньший диаметр конической обечайки. Параметры  $H$ ,  $D_1$  и  $D_2$  будут определять конусность винтового канала, а шаг  $h$  – наклон винтовой линии (длину линии). Угол  $\alpha$  (половина угла раствора конуса) определим по формуле

$$\alpha = \arctg\left(\frac{D_1 - D_2}{2 \cdot H}\right). \quad (2)$$

Будем считать, что винтовая линия соединяет две характерные точки винтового канала – точку входа в винтовой канал  $C_1$  (входное сечение первого витка) и точку выхода из канала  $C_2$  (выходное сечение последнего витка) (рис. 1, в). Эти две точки представляют собой пересечения средних линий, проведенных для входного и выходного сечений, и расположены на расстояниях  $R_1$  и  $R_2$  от осевой линии циклона. При этом

$$R_1 = \frac{h}{8 \cdot H} \cdot (D_2 - D_1) + \frac{D_1 + d}{4}, \quad (3)$$

$$R_2 = \frac{(2 \cdot H - h)}{8 \cdot H} \cdot (D_2 - D_1) + \frac{D_1 + d}{4}. \quad (4)$$

Определяя длину винтовой линии, будем считать, что она образована равномерным движением точки вдоль образующей кругового конуса с начальным радиусом  $R_1$ , а сама образующая враща-

ется равномерно вокруг оси конуса. Не расписывая подробно решение чисто геометрической задачи, представим лишь формулу для определения длины винтовой линии

$$\ell = \frac{1}{2\pi} \cdot \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \sqrt{(S_0 \cdot \sin(\alpha))^2 \cdot \varphi^2 - 4\pi \cdot R_1 \cdot S_0 \cdot \sin(\alpha) \cdot \varphi + ((2\pi \cdot R_1)^2 + S_0^2)} d\varphi, \quad (5)$$

где  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  – углы, определяющие начальное и конечное положения образующей конуса при повороте;  $S_0$  – шаг винтовой линии,

$$S_0 = \frac{h}{\cos(\alpha)}. \quad (6)$$

Наряду с уравнением, определяющим длину винтовой линии, необходимо иметь уравнение неразрывности в такой форме, которая бы позволила установить связь между скоростью потока и площадью поперечного сечения винтового канала.

Рассмотрим адиабатическое течение газового потока в канале переменного сечения с учетом дополнительного сопротивления движению со стороны стенок, ограничивающих криволинейный винтовой канал, и без учета влияния на движение переносимых твердых частиц – такое допущение вполне разумно ввиду малости объемного содержания твердых частиц в потоке. В виду того, что описание движения газового потока в межвитковом пространстве винтовой вставки в трехмерной постановке весьма сложно, будем рассматривать движение потока псевдоодномерным вдоль винтовой линии. Площади входного и выходного сечений представим через эквивалентные диаметры, а изменение площади сечения винтового канала считаем известной функцией длины винтовой линии.

Одномерное стационарное течение газового (воздушного) потока по каналу с учетом сил трения описывается уравнением Эйлера, например, как в [10]

$$\rho \frac{dv}{dx} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{dP}{dx} - \frac{\xi}{D} \cdot \frac{\rho v^2}{2}, \quad (7)$$

где  $v$  – скорость воздуха;  $x$  – текущая координата;  $\rho$  – плотность воздуха;  $P$  – давление воздуха;  $\xi$  – коэффициент трения (является функцией критерия Рейнольдса);  $D$  – эквивалентный диаметр канала.

Уравнение движения (7) дополняется уравнением неразрывности

$$\rho \cdot v \cdot S = \text{const}, \quad (8)$$

где  $S$  – площадь поперечного сечения канала (представляет собой известную функцию координаты  $x$ ).

Состояние газа описывается уравнением Менделеева-Клапейрона

$$P = \rho \cdot R \cdot T, \quad (9)$$

где  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $T$  – температура газа.

Сделаем некоторые преобразования уравнений (8) и (9). Возьмем от уравнений (8) и (9) логарифмические дифференциалы, тогда получим

$$\frac{d\rho}{\rho} + \frac{dv}{v} + \frac{dS}{S} = 0, \quad (10)$$

$$\frac{dP}{P} = \frac{dT}{T} - \frac{dv}{v} - \frac{dS}{S}. \quad (11)$$

Используем адиабатическую скорость звука

$$a = \sqrt{k \cdot \frac{P}{\rho}}, \quad (12)$$

где  $k$  – постоянная адиабаты (для воздуха  $k = 1,4$ ), или

$$a = \sqrt{k \cdot R \cdot T}. \quad (13)$$

В уравнении (7) преобразуем слагаемое  $\frac{1}{\rho} \cdot \frac{dP}{dx}$

$$\frac{1}{\rho} \cdot \frac{dP}{dx} = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{dP}{dx} \cdot \frac{d\rho}{d\rho} = \frac{d\rho}{\rho} \cdot \frac{dP}{d\rho} \cdot \frac{1}{dx}, \quad (14)$$

где  $\frac{d\rho}{\rho} = -\frac{dv}{v} - \frac{dS}{S}$  (из уравнения (10));  $\frac{dP}{d\rho} = a^2$ .

Используя число Маха

$$M = \frac{v}{a}, \quad (15)$$

уравнение (7) принимает вид

$$\left( \frac{1 - M^2}{1 + \frac{k-1}{2} \cdot M^2} \right) \cdot \frac{dM}{M} = \frac{\xi}{2 \cdot D} \cdot k \cdot M^2 \cdot dx - \frac{dS}{S}. \quad (16)$$

Используя уравнения (11) и (16), получим изменение температуры

$$\frac{dT}{T} = -\frac{(k-1) \cdot M^2}{1 + \frac{k-1}{2} \cdot M^2} \cdot \frac{dM}{M} \quad (17)$$

или из условия адиабатичности движения выражение для полной энтальпии

$$T \cdot \left( 1 + \frac{k-1}{2} \cdot M^2 \right) = \text{const}. \quad (18)$$

Применяя уравнения (15), (16), (17) или (18), можно определять параметры воздушного потока вдоль винтового канала. В дальнейшем полученные результаты могут быть использованы для описания движения твердых частиц и их сепарации, например, как в работе [9].

**Результаты и их обсуждение**

В качестве примера рассмотрим влияние геометрических параметров аэровинтового циклона на его аэродинамическое сопротивление. Исходные данные будут следующие: расход воздуха –  $Q = 516 \text{ м}^3/\text{ч}$ ; площадь поперечного сечения на входе в винтовой канал –  $8019 \times 10^{-6} \text{ м}^2$ ; скорость воздуха на входе в канал –  $17,874 \text{ м/с}$ ; шаг винта –  $0,09 \text{ м}$ ; число витков – 8; угол конусности  $\alpha$  изменяется в пределах от  $3^\circ$  до  $7^\circ$  с шагом в  $1^\circ$ . Расчет проводился при условии, что плотность воздуха постоянна. Скорость воздуха рассчитывалась из уравнения неразрывности с учетом изменения площади поперечного сечения канала. Примем, что винтовой канал работает как всасывающий воздуховод. На входе в канал статическое давление по модулю равно динамическому (по знаку статическое давление отрицательно). Авторы вполне сознают, что сопротивление циклона складывается из многих факторов, но преобладающим аэродинамическим сопротивлением в конструкции аэровинтового циклона-сепаратора обладает именно конфузорный винтовой канал, образованный конической обечайкой и винтовой вставкой (рис. 1). Результаты расчета сведены в табл. 1.

Таблица 1

Сопротивление винтового канала в зависимости от угла конусности

Угол конусности $\alpha, ^\circ$	Длина винтовой линии, м	Площадь выходного сечения, $\times 10^{-6} \text{ м}^2$	Сопротивление винтового канала, Па
3	4,505	5186	252
4	4,174	4112	317
5	3,845	3055	444
6	3,517	1985	769
7	3,196	911	2412

Расчеты показывают, что, несмотря на уменьшение длины винтовой линии (конфузорного винтового канала) при увеличении угла конусности  $\alpha$ , происходит увеличение аэродинамического сопротивления винтового канала. Этому способствует значительное поджатие потока на выходе из винтового канала.

Диаграммы на рис. 2 и 3 позволяют оценить влияние угла конусности  $\alpha$  на режим работы винтового канала. Как правило, вентиляторы, работающие на предприятиях зернопереработки и пищевой промышленности, обеспечивают перепад давлений  $\approx 1500\text{--}2000 \text{ Па}$ . На рис. 3 хорошо видно, что незначительное изменение геометрии аэровинтового циклона ( $\alpha=7^\circ$ ) приводит к невозможности использования вентиляторов. Важно также понимать,

что в аэровинтовом циклоне происходит увеличение скорости потока при его движении с одновременным уменьшением радиуса кривизны винтовой линии. Такой подход способствует в значительной степени увеличению критерия Фруда (согласно (1)), а значит и эффективности циклона в плане пылеочистки. Вполне очевидно, что сопротивление циклона и его эффективность можно регулировать и изменением числа витков винтовой вставки. Это позволяет «встраивать» циклон в необходимые габариты.

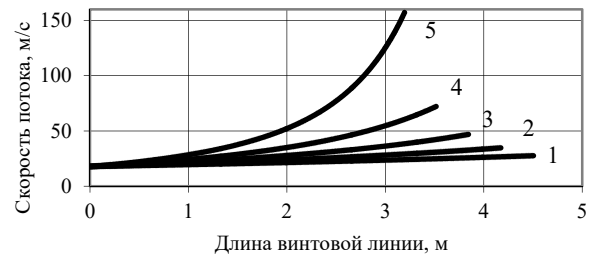


Рис. 3. Изменение скорости потока вдоль винтового канала в аэровинтовом циклоне:

1 –  $\alpha=3^\circ$ ; 2 –  $\alpha=4^\circ$ ; 3 –  $\alpha=5^\circ$ ; 4 –  $\alpha=6^\circ$ ; 5 –  $\alpha=7^\circ$

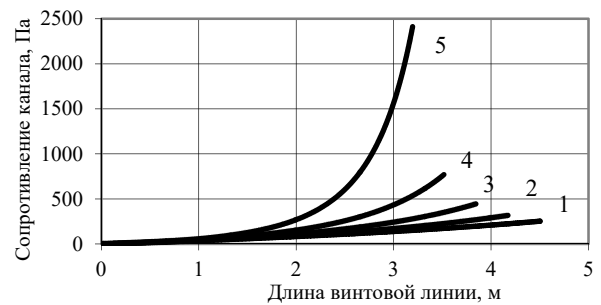


Рис. 4. Изменение аэродинамического сопротивления винтового канала в аэровинтовом циклоне:

1 –  $\alpha=3^\circ$ ; 2 –  $\alpha=4^\circ$ ; 3 –  $\alpha=5^\circ$ ; 4 –  $\alpha=6^\circ$ ; 5 –  $\alpha=7^\circ$

Разработанная модель расчета аэродинамического сопротивления винтового канала аэровинтового циклона позволяет рационально подходить к определению его геометрических параметров и выбору режимов движения аэродисперсного потока. Проведенные лабораторные испытания аэровинтового циклона на продуктах зернопереработки (мука различных сортов) показали вполне удовлетворительную сходимость с результатами расчетов аэродинамического сопротивления, а также подтвердили возможность использования винтовой вставки, формирующей конфузорный винтовой канал, для повышения эффективности пылеочистки. На лабораторных стендах эффективность пылеочистки достигала 99,9 %. Дальнейшие исследования направлены на формирование базового варианта аэровинтового циклона-сепаратора, обеспечивающего высокую эффективность пылеочистки, компактные габариты и приемлемое аэродинамическое сопротивление.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №17-48220056



## Список литературы

1. Патент 2442662 Российская Федерация, 2010122775/05. Аэровинтовой циклон-сепаратор / В.Л. Злочевский; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» (АлтГТУ); заявл. 03.06.2010; опубл. 20.02.2012. – 7 с.
2. Патент 2511120 Российская Федерация, 2012140588/03. Способ пневмофракционирования дисперсных материалов и очистки технологического воздуха / В.Л. Злочевский; заявитель и патентообладатель В.Л. Злочевский; заявл. 21.09.2012; опубл. 06.02.2014. – 9 с.
3. Мисюля, Д.И. Сравнительный анализ технических характеристик циклонных пылеуловителей / Д.И. Мисюля, В.В. Кузьмин, В.А. Марков // Труды БГТУ. – 2012. – № 3: Химия и технология неорганических веществ. – С. 154–163.
4. Hoffman, A.C. Gas Cyclones and Swirl Tubes. Principles, Design, and Operation / A.C. Hoffman, L.E. Stein // Second edition. – 2007. – P. 448.
5. Справочник по пыле- и золоулавливанию / М.И. Биргер, А.Ю. Вальдберг, Б.И. Мягков [и др.]; Под общ. ред. А.А. Русанова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М., 1983. – 312 с.
6. Малис, А.Я. Пневматический транспорт для сыпучих материалов / А.Я. Малис, М.Г. Кастровых. – М., 1985. – 344 с.
7. Штокман, Е.А. Вентиляция, кондиционирование и очистка воздуха на предприятиях пищевой промышленности / Е.А. Штокман. – М., 2001. – 564 с.
8. Gil, A. Modeling the gas and particle flow inside cyclone separators / A. Gil, C. Cortes // Progress in energy and combustion science. – 2007. – Vol. 33. – № 5. – P. 409–452.
9. Злочевский, В.Л. Анализ формирования аэропотока в циклоне / В.Л. Злочевский, К.А. Мухопад // Южно-Сибирский научный вестник. – 2015. – № 4. – С. 5–13.
10. Лойцянский, Л.Г. Механика жидкости и газа. – 7-е изд., испр. – М., 2003. – 840 с.

## References

1. Zlochevskiy V.L. *Aerovintovoy tsiklon-separator* [Aerovolt cyclone-separator]. Patent RF, no. 2442662, 2012.
2. Zlochevskiy V.L. *Sposob pnevmofraktsionirovaniya dispersnykh materialov i ochistki tekhnologicheskogo vozdukh* [The method of pneumatic fractionation of particulate materials and purification of process air]. Patent RF, no. 2511120, 2014.
3. Misyulya D.I., V. Kuz'min V.V., Markov V.A. Sravnitel'nyy analiz tekhnicheskikh kharakteristik tsiklonnykh pylouloviteley [Comparative analysis of technical characteristics of cyclone dust collectors]. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2012, no. 3, pp. 154–163.
4. Hoffman A.C., Stein L.E. *Gas Cyclones and Swirl Tubes. Principles, Design, and Operation*. 2nd ed. Berlin Heidelberg: Springer Publ., 2007. 448 p.
5. Rusanova A.A.(ed.), Birger M.I., Val'dberg A.Yu., Myagkov B.I. et al. *Spravochnik po pyle- i zoloulavlivaniyu* [Handbook of dust and ash collecting]. 2nd ed. Moscow: Energoatomizdat Publ., 1983. 312 p.
6. Malis A.Ya., Kastornykh M.G. *Pnevmaticheskii transport dlya sypushikh materialov* [Pneumatic transport for bulk materials]. Moscow: Agropromizdat Publ., 1985. 344 p.
7. Shtokman E.A. *Ventilyatsiya, konditsionirovanie i ochistka vozdukh na predpriyatiyakh pishchevoy promyshlennosti* [Ventilation, air conditioning and air purification at food industry enterprises]. Moscow: ASV Publ., 2001. 564 p.
8. Cortes C., Gil A. Modeling the gas and particle flow inside cyclone separators. *Progress in energy and combustion science*, 2007. vol. 33, no. 5, pp. 409–452. DOI: 10.1016/j.peccs.2007.02.001.
9. Zlochevskiy V.L., Mukhopad K.A. Analiz formirovaniya aeropotoka v tsiklone [The analysis of the formation of airflow in the cyclone]. *Yuzhno-Sibirskiy nauchnyy vestnik* [South-siberian scientific bulletin], 2015, no. 4, pp. 5–13.
10. Loytsyanskiy L.G. *Mekhanika zhidkosti i gaza* [Mechanics of liquid and gas] 7th ed.. Moscow: Drofa Publ., 2003. 840 p.

## Дополнительная информация / Additional Information

Злочевский, В.Л. Аэродинамическое сопротивление винтового канала в циклоне-сепараторе / В.Л. Злочевский, К.А. Мухопад // Техника и технология пищевых производств. – 2017. – Т. 46. – № 3. – С. 102–107.

Zlochevskiy V.L., Mukhopad K.A. Aerodynamic drag of the screw channel in the cyclone-separator. *Food Processing: Techniques and Technology*, 2017, vol. 46, no. 3, pp. 102–107 (In Russ.).

## © Злочевский Валерий Львович

д-р техн. наук, профессор, заслуженный изобретатель РФ, ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», 656038, Россия, Алтайский край, г. Барнаул, пр. Ленина, 46, тел.: +7 (3852) 63-15-80, e-mail: zlv1@mail.ru

## © Мухопад Константин Алексеевич

старший преподаватель кафедры теоретической механики и механики машин, ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», 56038, Россия, Алтайский край, г. Барнаул, пр. Ленина, 46, тел.: +7 (3852) 67-05-75, e-mail: mka01@yandex.ru

## © Valery L. Zlochevskiy

Dr.Sci.(Eng.), Professor, Honored Inventor of the Russian Federation, Polzunov Altai State Technical University, 46, Lenina Ave., Barnaul, 656038, Russia, phone: +7 (3852) 63-15-80, e-mail: zlv1@mail.ru

## © Konstantin A. Mukhopad

Senior lecturer of the Department of Theoretical Mechanics and Mechanics of Machines, Polzunov Altai State Technical University, 46, Lenina Ave., Barnaul, 656038, Russia, phone: +7 (3852) 67-05-75, e-mail: mka01@yandex.ru