

УДК 62-784.431:331.45

А.В. ПОТЁМКИНА, Е.С. ЛУКАШ

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ГЛУБИНЫ ПОГРУЖЕНИЯ ВЫХЛОПНОГО ПАТРУБКА НА АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЦИКЛОННЫХ АППАРАТОВ

Рассмотрено влияние конструктивных параметров циклонных аппаратов на их аэродинамические свойства и эффективность. Представлены сравнительные экспериментальные исследования цилиндрического (ЦЦ) и конического циклонов (КЦ). Предложена математическая модель аэродинамических процессов в циклонных аппаратах различной конструкции, которая уточняется экспериментальными данными.

**Ключевые слова:** аэродинамика, циклонный аппарат, эффективность, коэффициент гидравлического сопротивления.

**Введение.** Циклонные пылеуловители известны более 100 лет. Теории циклонной сепарации посвящено множество работ (В.А. Барт, А.И. Тер-Линден, А.И. Пирумов, Е.А. Штокман, А.А. Русанов и др.). Конструктивные формы циклонных аппаратов разнообразны. Единого критерия для выбора оптимальной формы циклонов еще не существует, однако в конструкциях современных циклонов проявляется тенденция развития конусной части. Зависимость, существующая между геометрической формой циклонов и их эффективностью, оказывает влияние на аэродинамику течений, возникающих в этих аппаратах. Интерес вызывает распределение скоростей по радиусу циклона.

**Обзор исследований аэродинамики циклонных пылеуловителей.** Изменение скорости газового потока всегда сопровождается изменением существующего в потоке статического давления. В криволинейном потоке наличие центробежных сил обуславливает изменение давления также в направлении, перпендикулярном линиям тока [1].

На рис.1 представлено изменение тангенциальных составляющих скоростей (рис.1,а) и статического давления (рис.1,б), замеренное Тер-Линденом в нескольких поперечных сечениях циклона. Оказалось, что в сечениях, не слишком удаленных от входного, вблизи стенок давление мало отличается от давления во входном патрубке, а тангенциальная составляющая скорости примерно равна средней скорости входа в циклон. Ниже, в особенности в конической части, тангенциальные составляющие скоростей возрастают. Соответственно, увеличивается скоростное давление и уменьшается статическое.

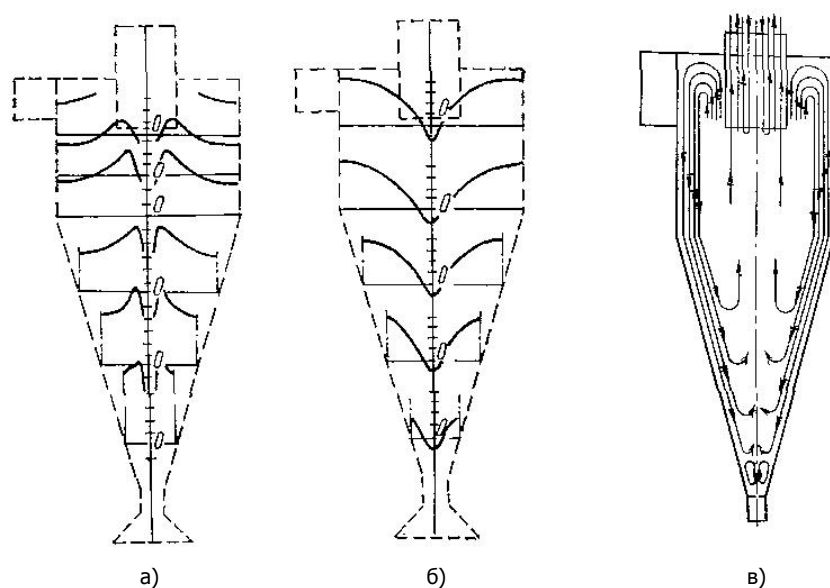


Рис.1. Изменения, замеренные Тер-Линденом в поперечных сечениях циклона: а – тангенциальные скорости; б – статическое давление; в – вторичные токи в циклоне

Во всех сечениях в периферийной части потока наблюдается увеличение тангенциальной составляющей скорости по радиусу по мере удаления от стенок циклона, причем форма кривой распределения скоростей близка к гиперболе. Средняя часть потока характеризуется постоянством угловой скорости. Давление падает по радиусу к центру циклона, достигая минимума на оси вращения. Можно с достаточной для практических целей точностью определить разряжение, которое устанавливается в пылесборном бункере циклона.

На практике установлено, что при недостаточной герметизации пылевыпускного тракта происходит интенсивный подсос воздуха, сводящий на нет эффект сепарации [2].

Разряжение в районе пылевыпускного отверстия тем больше, чем больше нагрузка на циклон. При очень небольших скоростях и установке циклона на нагнетание можно добиться возникновения повышенного давления и избежать, таким образом, необходимости в устройстве герметичных бункеров [3].

Наличие радиального градиента давления обуславливает возникновение в циклонах вторичных циркуляционных течений, влияющих на эффективность пылеулавливания. Для частиц воздуха, находящихся в плоскости, удаленной от днища циклона, градиент давления уравнивается центробежной силой. Вблизи подвижных поверхностей тангенциальная составляющая скорости воздуха вследствие трения уменьшается, следовательно, уменьшается и центробежная сила. Градиент статического давления здесь такой же, как и на большом расстоянии от поверхности, равновесие между силами статического давления и центробежными силами нарушается и возникает реальное течение, направленное к оси вращения, т.е. радиальный или осевой сток. Из условия неразрывности этот сток, в свою очередь, вызывает осевое течение, направленное по внешней нормали к днищу, и подтекание воздуха вдоль образующих цилиндрической части циклона.

На рис.1,в показана схема циркуляции, возникающей в циклоне. В верхней части аппарата вторичные токи сливаются с парным вихрем, образующимся при тангенциальном попадании струи в циклон. Образование парного вихря объясняется тем, что по мере удаления от оси вращения скорость газа уменьшается, вызывая возрастание давления. Повышение давления достигает наибольшей величины в слоях воздуха, прилегающих к внешней границе потока. Под влиянием этого давления воздух перетекает вдоль внешних границ в сторону низких давлений, образуя парный вихрь, вторичный поток. Верхняя часть вторичного вихря устремляется по кратчайшему пути к устью выхлопной трубы, а нижняя, распространяясь вдоль образующих циклона, формирует восходящий поток циклона.

Вторичные токи оказывают большое влияние на эффективность циклонных аппаратов. Верхняя ветвь вихря является кратчайшим путем для выноса пыли в выхлопную трубу. Для ослабления этого влияния увеличивают глубину погружения выхлопной трубы. Исследования, проведенные ранее, показали, что с увеличением глубины погружения выхлопной трубы наблюдается повышение эффективности, связанное, по-видимому, с уменьшением выноса вторичным течением пыли, не успевшей при меньшем погружении за короткое время формирования вращающегося потока перейти из слоев воздуха, опускающихся вдоль выхлопной трубы, в более удаленные слои.

Для каждой схемы циклонов существует оптимальная глубина погружения выхлопной трубы. При превышении этой глубины эффективность снижается, что может быть объяснено увеличением радиальных составляющих скоростей.

Цель настоящего исследования – выявление способов повышения эффективности и улучшения аэродинамических свойств циклонных аппаратов за счет подбора оптимальной глубины погружения выходного патрубка на стадии проектирования.

**Экспериментальные исследования.** На кафедре «Безопасность жизнедеятельности и защита окружающей среды» Донского государственного технического университета в течение последних лет ведется НИР по исследованию аэродинамических характеристик и эффективности пылеулавливания циклонных аппаратов различной формы [4].

Для решения поставленной задачи была собрана экспериментальная установка «Циклон», на которой проводились испытания циклонных аппаратов двух форм: цилиндрического циклона и конического циклона, разработанного на кафедре БЖиЗОС ДГТУ.

Корректность сравнения аэродинамических характеристик циклонных аппаратов, полученных на экспериментальной установке, обеспечивалась равенством заданных конструктивных параметров испытываемых аппаратов, основными из которых являлись объемы рабочей части цилиндров и диаметры входных и выходных патрубков (рис.2).



Рис.2. Общий вид экспериментальной установки

Измерительная установка состоит из испытываемого циклонного аппарата 1, в теле которого шесть технологических отверстий с заглушками (отверстия расположены на равном расстоянии друг от друга по всей высоте рабочей части циклона, при проведении эксперимента в них устанавливаются приборы для измерения), подводящего трубопровода 2, дозатора 3, источника воздушного потока (побудителя расхода воздуха) 4, комплекта жидкостных манометров 5, 6.

Была поставлена задача – определить влияние глубины погружения выхлопного патрубка на аэродинамические свойства циклонных аппаратов.

Исследования проводились для конического и цилиндрического циклонов при глубине погружения выхлопного патрубка на 200, 250, 300 и 350 мм. По результатам исследований были построены следующие графики зависимостей:

- статического давления циклонного аппарата от глубины погружения выхлопного патрубка (рис.3);
- сопротивления циклона от глубины погружения выхлопного патрубка (рис.4).

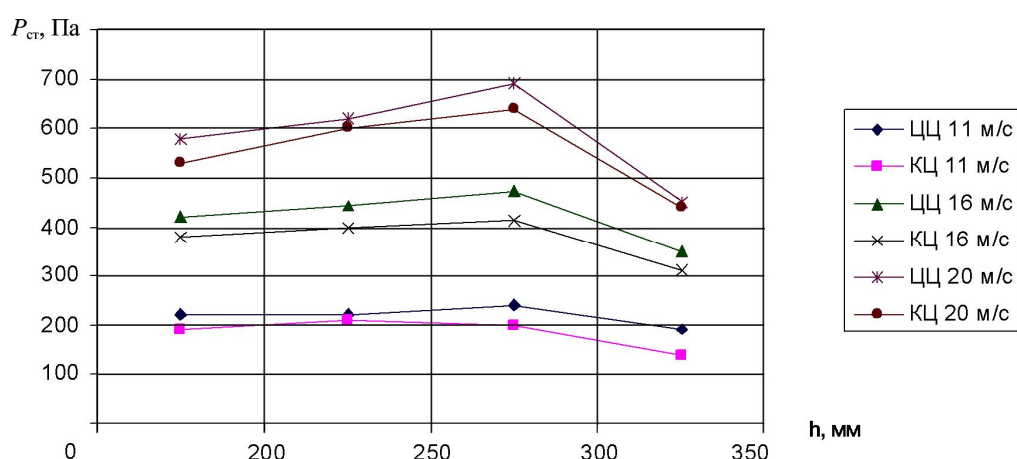


Рис.3. Зависимость статического давления от глубины погружения выхлопного патрубка

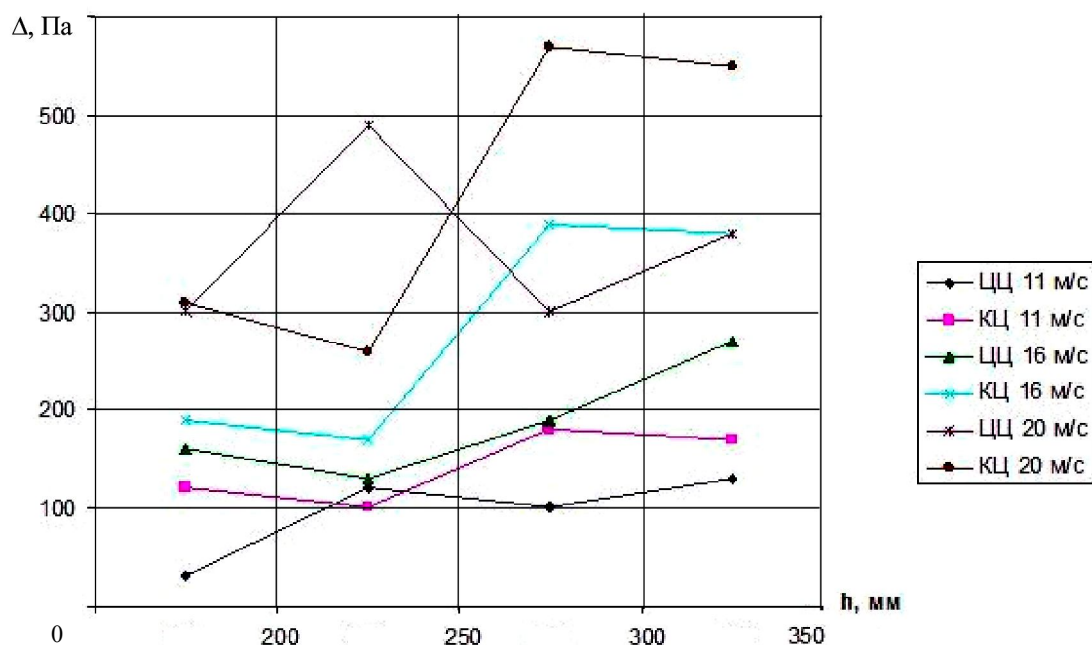


Рис.4. Зависимость сопротивления циклона от глубины погружения выхлопного патрубка

По результатам проведенных экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы:

1) С увеличением скорости статическое давление повышается, при одинаковых значениях скорости статическое давление цилиндрического циклона несколько выше, чем конического. Следует отметить, что независимо от скорости воздушного потока, с увеличением глубины погружения выходного патрубка статическое давление несколько увеличивается и, дойдя до своего максимального значения (при глубине погружения 300 мм), опять начинает снижаться. Это свидетельствует о том, что при глубине погружения выходного патрубка 300 мм эффективность пылеулавливания циклонных аппаратов будет максимальной.

2) С увеличением глубины погружения выхлопного патрубка, при одинаковых значениях скоростей, изменения сопротивления циклона у конического аппарата больше, чем у цилиндрического, наиболее четко данный эффект просматривается при скоростях 11–16 м/с. На глубине погружения выходного патрубка 300 мм сопротивление конического циклонного аппарата макси-

мально, что говорит о наибольшей эффективности конического циклонного аппарата данной конструкции на этой глубине. Цилиндрический циклон обладает максимальным сопротивлением при глубине погружения выхлопного патрубка 250 мм, что говорит о наибольшей эффективности цилиндрического циклонного аппарата на данной глубине.

Закономерность на графиках прослеживается недостаточно явно, есть точки, которые отклоняются от ожидаемых величин сопротивления циклона. Для получения более точных данных исследования будут проведены повторно с использованием высокоточного дифференциального манометра Testo-521 (Германия), который также позволяет измерять скорость потока, и обеспечивает погрешность измерений 0,1 Па.

**Теоретические исследования.** На рис.5,а представлена схема течения и распределения составляющих скорости воздушного потока в циклонном аппарате. В сильно закрученных потоках действующие на пылевые частицы центробежные силы преобладают над силами вязкости, что позволяет рассматривать движение закрученных воздушных потоков как потенциальное [5]. При вихрестое в соответствии с принципом суперпозиций его можно представить в виде плоского вихря (рис.5,б) и стока (рис.5,в).

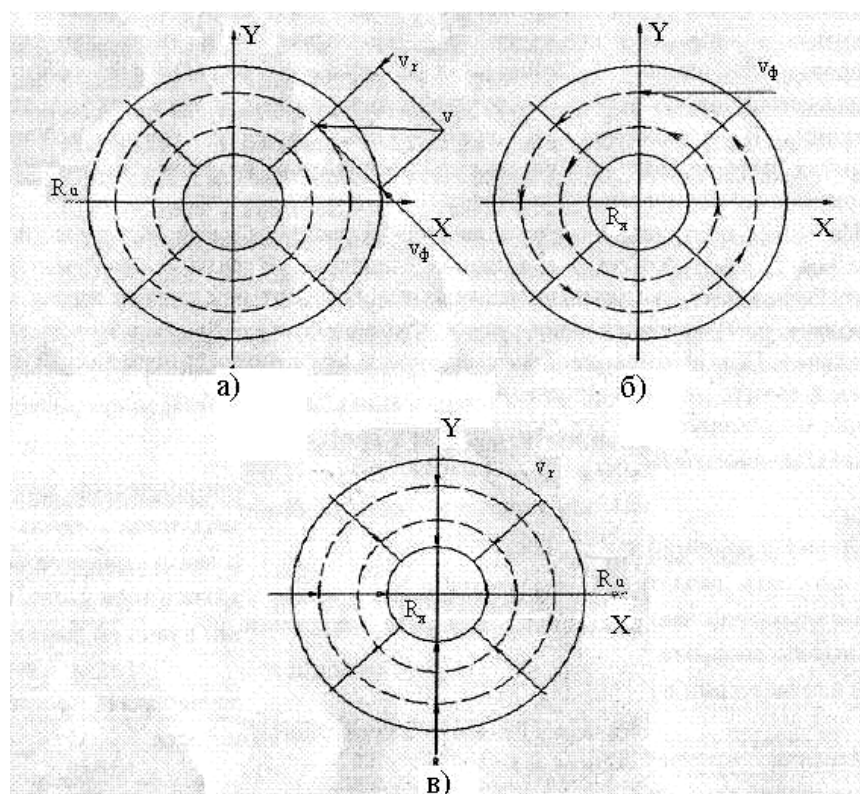


Рис.5. Течения в циклонном аппарате:  
а – распределение составляющих скорости воздушного потока;  
б – движение закрученных воздушных потоков в виде плоского вихря;  
в – движение закрученных воздушных потоков в виде стока

Радиальная скорость воздушного потока  $v_r$  составит:

$$v_r = \frac{D_u^2 v_u}{4 H_u r}, \quad (1)$$

где  $D_u$  – диаметр цилиндрической части циклонного аппарата, м;  $v_u$  – скорость воздушного потока в циклонном аппарате, отнесенная к цилиндрической части аппарата, м/с;  $H_u$  – высота аппарата в зоне стока, м;  $r$  – относительный радиус.

В соответствии с рис.5,6 выразим угол через декартовы координаты

$$\varphi = \text{Carctg}(x/y). \quad (2)$$

Частная производная  $\varphi$  по декартовым координатам дает соответствующие скорости:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial x} = v_x = \frac{\partial}{\partial x} \left( \text{carctg} \frac{x}{y} \right) = -\frac{Cy}{r^2}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial y} = v_y = \frac{\partial}{\partial y} \left( \text{carctg} \frac{x}{y} \right) = -\frac{Cx}{r^2}, \quad (4)$$

где  $r^2 = x^2 + y^2$ .

Следовательно, тангенциальная скорость воздушного потока в цилиндрической системе координат:

$$v_\varphi = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = \left( \frac{C}{r^2} \right) \sqrt{x^2 + y^2} = \frac{C}{r}. \quad (5)$$

Постоянную  $C$  определим из уравнения неразрывности потока:

$$L = a_2 \int_{R_l}^{R_u} v_\varphi dr, \quad (6)$$

где  $L$  – расход воздушного потока, тогда

$$v_\varphi = \frac{\pi D_u^2 v_u}{4a_1 r \ln(R_T / R_u)}, \quad (7)$$

где  $a_1, a_2$  – высота и ширина выхлопного патрубка циклонного аппарата, м;  $R_T, R_u$  – радиус соответственно выхлопной трубы и корпуса аппарата, м.

Экспериментальные исследования показывают, что в реальных условиях распределение тангенциальной скорости воздушного потока в периферийной зоне аппарата аппроксимируется функцией вида:

$$v_\varphi = \frac{C}{r^n} = \frac{\pi D_u^2 v_u (1-n)}{4a_1 r^n (R_u^{n-1} - R_T^{1-n})}, \quad (8)$$

где  $n$  – эмпирический коэффициент, определяемый по экспериментальным данным.

Величина  $n$  меняется по высоте аппарата:

$$v_\varphi = v_{\varphi H} \left( \frac{v_{\varphi H}}{v_{\varphi K}} \right)^{\frac{Z-Z_H}{Z_H-Z_K}}, \quad (9)$$

где  $v_{\varphi H}, v_{\varphi K}$  – тангенциальная скорость в верхней и нижней зонах аппарата, м/с;  $Z_H, Z_K$  – высоты, соответствующие  $v_{\varphi H}, v_{\varphi K}$ .

Центральная часть (ядро) воздушного потока вращается подобно твердому телу

$$v_{\varphi я} = Cr^k, \quad (10)$$

Распределение тангенциальной скорости в ядре и периферийной зоне воздушного потока в циклонном аппарате можно с удовлетворительной точностью аппроксимировать единой функцией вида

$$v_\varphi = v_{\varphi \max} [2r / (1+r)]^m, \quad (11)$$

где  $v_{\phi \max}$  – максимальная тангенциальная скорость воздушного потока, достигаемая на границе ядра периферийной зоны при  $r = r_{\text{я}}$ ;  $r$  – относительный радиус, равный  $r = \bar{r} / r_{\text{я}}$ , а  $\bar{r} = r / R_u$ ;  $r_{\text{я}} = r_{\text{я}} / R_u$ .

Осевую скорость воздушного потока  $v_z$  в циклонном аппарате представим также через уравнение неразрывности потока:

$$v_z = \frac{v_u}{1 - R_T^2}, \quad (12)$$

где  $\bar{R}_T$  – относительный радиус выхлопной трубы аппарата  $\bar{R}_T = R_T / R_u$ .

Обобщенной аэродинамической характеристикой закрученного воздушного потока является коэффициент закрутки:

$$K_z = \frac{v_{\phi \text{cp}} R_{\text{cp}}}{v_z R_u}, \quad (13)$$

где  $R_{\text{cp}}$  – средний радиус входа воздушного потока в аппарат,  $R_{\text{cp}} = 0,5(R_u + R_T)$ .

Гидравлическое сопротивление циклонного аппарата, отнесенное к цилиндрической части корпуса, рассчитывают по формуле:

$$\Delta P = \xi \frac{\rho v_u^2}{2}, \quad (14)$$

где  $\rho$  – плотность пылевой смеси, кг/м<sup>3</sup>.

Зная статическое или полное давление до и после аппарата, можно экспериментально определить коэффициент гидравлического сопротивления аппарата:

$$\xi = 2(P_n - P_k) / \rho v_u^2. \quad (15)$$

Предложенная математическая модель может идентифицируется по экспериментальным данным, полученным с использованием высокоточных приборов. В результате можно уточнить выражения для тангенциальной, радиальной скоростей воздушных потоков, как в ядре, так и в периферийной зоне аппарата. Аппроксимирующие формулы можно получить для цилиндрического и конического циклонов.

**Выводы.** Установлена закономерность влияния глубины погружения выхлопного патрубка на аэродинамические свойства циклонных аппаратов. Представленная математическая модель может быть использована для более детального расчета циклонных аппаратов разной конструкции по сравнению со стандартными методами расчета.

### Библиографический список

1. Пирумов А.И. Обеспыливание воздуха / А.И. Пирумов. – М.: Стройиздат, 1974. – 296 с.
2. Штокман Е.А. Очистка воздуха / Е.А. Штокман. – М.: АСВ, 1999. – 320 с.
3. Падва В.Ю. Оптимальные условия улавливания пыли циклонами / В.Ю. Падва // Водоснабжение и сан. техника. – 1968. – № 4.
4. Михайлов А.Н. Влияние конструктивных особенностей циклонных аппаратов на их аэродинамические свойства / А.Н. Михайлов, Ю.И. Булыгин, С.А. Хлебунов, Е.С. Филь, А.В. Потёмкина, Н.С. Прозоркин // Техносферная безопасность, надежность, качество, энерго- и ресурсосбережение: сб. тр. XI междунар. науч.-практ. конф. (Туапсе, 7-11 сентября 2009) / Рост. гос. строит. ун-т.
5. Расчет и конструирование устройства аэродинамической пылеочистки вихревыми потоками: метод. указания к прак. работе / Рост. гос. строит. ун-т. – Ростов н/Д, 2007. – 15 с.

### References

1. Pirumov A.I. Obespylivanie vozduha / A.I. Pirumov. – M.: Stroiizdat, 1974. – 296 s. – in Russian.
2. Shtokman E.A. Ochistka vozduha / E.A. Shtokman. – M.: ASV, 1999. – 320 s. – in Russian.

3. Padva V.Yu. Optimal'nye usloviya ulavlivaniya pyli ciklonami / V.Yu. Padva // Vodo-snabzhenie i san. tehnika. – 1968. – № 4. – in Russian.

4. Mihailov A.N. Vliyanie konstruktivnyh osobennostei ciklonnyh apparatov na ih aerodinamicheskie svoistva / A.N. Mihailov, Yu.I. Bulygin, S.A. Hlebunov, E.S. Fil', A.V. Potemkina, N.S. Prozorkin // Tehnosfernaya bezopasnost', nadejnost', kachestvo, energo- i resursosberejenie: sb. tr. XI mejdunar. nauch.-prakt. konf. (Tuapse, 7-11 sentyabrya 2009) / Rost. gos. stroit. un-t. – in Russian.

5. Raschet i konstruirovaniye ustroystva aerodinamicheskoi pyleochoistki vihrevymi potokami: metod. ukazaniya k prakt. rabote / Rost. gos. stroit. un-t. – Rostov n/D, 2007. – 15 s. – in Russian.

Материал поступил в редакцию 10.06.10.

**A.V. POTEKINA, E.S. LUKASH**

### **THEORETICAL AND EXPERIMENTAL STUDY OF THE INFLUENCE OF IMMERSION DEPTH OF THE EXHAUST PIPE ON THE CYCLONE APPARATUS AERODYNAMIC PROPERTIES AND EFFICIENCY**

The influence of cyclone devices design parameters on their aerodynamic properties and efficiency is considered. The comparative experimental studies of cylindrical and conical cyclones are presented. A mathematical model of aerodynamic processes in the cyclone apparatus of various designs which is refined by experimental data is suggested.

**Keywords:** aerodynamics, cyclone apparatus, efficiency, hydraulic resistance coefficient.

**ПОТЁМКИНА Алёна Витальевна**, магистрант кафедры «Безопасность жизнедеятельности и защита окружающей среды» Донского государственного технического университета. Окончила Донской государственный технический университет (2008).

Область научных интересов: изучение влияния конструктивных параметров циклонных аппаратов на их аэродинамические свойства и эффективность.

Автор 3 публикаций.

a-potjemkina@mail.ru

**ЛУКАШ Егор Сергеевич** (р. 1986), магистрант кафедры «Безопасность жизнедеятельности и защита окружающей среды» Донского государственного технического университета. Окончил Ростовский государственный строительный университет (2008).

Область научных интересов: разработка программного обеспечения автоматизированных расчетов оценки влияния производственной деятельности человека на окружающую среду.

Автор 1 публикации.

hronorion@rambler.ru

**Alena V. POTEKINA**, Undergraduate of the Life and Environment Protection Sciences Department, Don State Technical University. She graduated from Don State Technical University (2008).

Research interests: influence of cyclone devices design parameters on their aerodynamic properties and efficiency.

Author of 3 scientific publications.

a-potjemkina@mail.ru

**Egor S. LUKASH** (1986), Undergraduate of the Life and Environment Protection Sciences Department, Don State Technical University. He graduated from Rostov State Construction University (2008, Bachelor of Science).

Research interests: software development of automated calculations assessing the impact on the environment.

Author of 1 scientific publication.

a-potjemkina@mail.ru