

**В.И. КРИВОЩЕКОВ**, канд. техн. наук

(Украина, Днепропетровск, Национальный горный университет),

**Л.А. НОВИКОВ**

(Украина, Днепропетровск, Институт геотехнической механики)

### **К РАЗРАБОТКЕ ПНЕВМОСЕПАРАТОРА С ОСЕВЫМ ВВОДОМ ИСХОДНОГО ПРОДУКТА**

*Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.* Одна из задач в области охраны природы – совершенствование технологических процессов и технических средств с целью уменьшения выбросов вредных веществ в окружающую среду и очистка отходящих газов от вредных примесей на основе создания высокоэффективных газопылеулавливающих аппаратов. Такими аппаратами являются сухие инерционные воздухоочистители.

Исследование движения пылевых частиц с использованием математического моделирования позволяет ускорить проектирование воздухоочистителей, сократить количество экспериментальных образцов и испытаний при доводке конструкций для достижения необходимой и достаточной эффективности очистки газа.

В работах [1-4 и др.] вопросы расчета инерционных воздухоочистителей: жалюзных, циклонных, конфузорных (баллистических) и ротационных рассмотрены не в полном объеме.

*Анализ исследований и публикаций.* В основу построения полей скоростей газа в каналах инерционных воздухоочистителей положена модель идеальной несжимаемой жидкости с учетом основных видов гидравлических потерь. Поля скоростей построены при помощи комбинаций простейших потоков с применением приближенных методов расчета. Использование законов сохранения массопереноса позволяет при минимальной эмпирической информации получить расчетным путем основные параметры отрывных и закрученных течений, а также определить потери нестационарных потоков.

Скорости и траектории движения частиц пыли в каналах воздухоочистителей определены численным решением дифференциальных уравнений. В расчетах учтены основные силы, действующие на частицы. Силы аэродинамического сопротивления частиц рассчитаны в достаточном диапазоне чисел Рейнольдса с учетом принятых допущений при технических расчетах.

К недостаткам расчетов следует отнести:

- поля скоростей газопылевых потоков определены приближенно, хотя и с сохранением их основных закономерностей;
- не учтено влияние турбулентности потока;
- твердые частицы считались сферическими, гладкими, не изменяющимися по форме и размерам во времени и не совершающими вращательного движения;

- воздействие твердых частиц на движение газа принимали пренебрежимо малым;
- не учитывалось влияние стенок канала воздухоочистителя на сопротивление движению твердых частиц.

*Постановка задачи.* Целью данной работы является анализ расчета аэродинамических и конструктивных параметров экспериментального пневмосепаратора с осевым вводом запыленного воздуха.

*Изложение материала и результаты.* По результатам работ [5, 6] и методике расчета основных аэродинамических параметров разработан пневмосепаратор с осевым вводом запыленного воздуха (рис. 1).

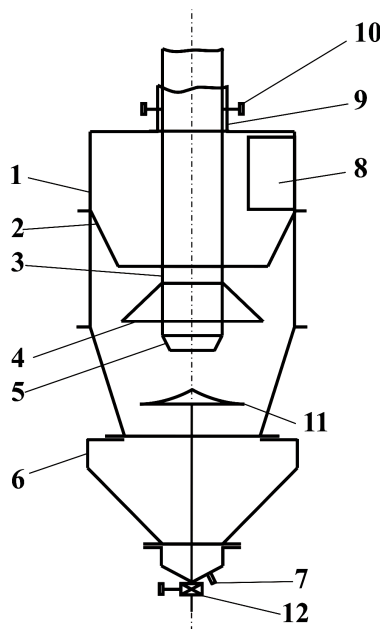


Рис. 1. Схема пневмосепаратора с осевым вводом запыленного воздуха

Пневмосепаратор (рис. 1) состоит из цилиндроконического корпуса 1, верхнего конуса 2, центральной (осевой) трубы 3 с нижним конусом 4 и соплом 5, бункера 6 для улавливаемой пыли, затвора 7, патрубка 8 для вывода очищенного воздуха, центрирующей трубы 9, регулировочно-фиксирующих винтов 10, конусной направляющей газопылевого потока 11 с фиксатором 12.

Принцип работы этого пневмосепаратора заключается в следующем. Запыленный воздух через центральную трубу 3 поступает в цилиндроконический корпус 1, где происходит сепарация пыли в его конфузурно-диффузорном канале, образованным нижним 4 и верхним 2 конусами, а также цилиндрической и конической поверхностями корпуса 1.

На первом этапе исследований была поставлена задача сравнительного анализа структуры потоков и основных аэродинамических параметров в аналогах (рис. 2) разработанного пневмосепаратора (рис. 1).

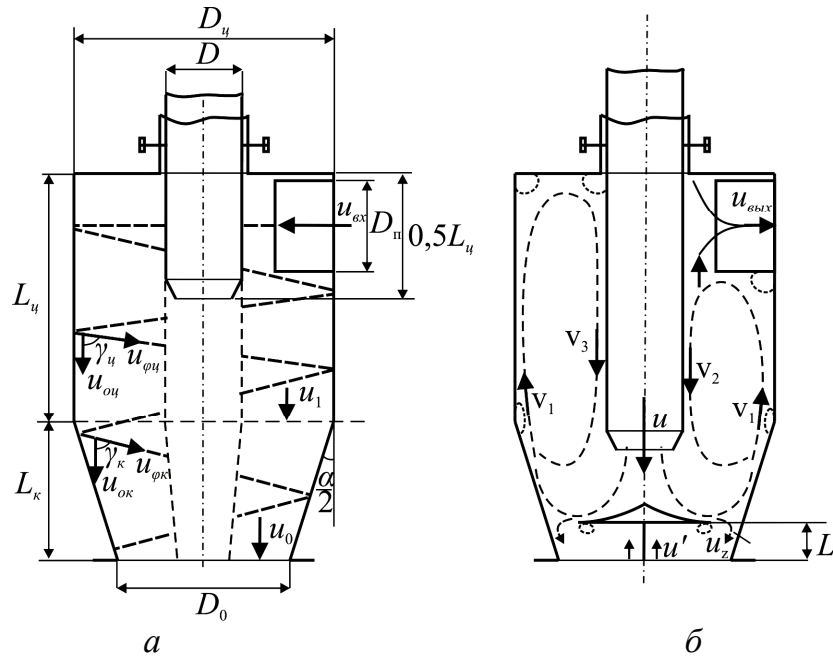


Рис. 2. Упрощенная схема вихревого движения газового потока в цилиндрикоконическом корпусе циклона (а) и пневмосепаратора (б):

$u_{ex}, u_{exx}$  – скорости газа в патрубке на входе в корпус и на выходе из корпуса, м/с;  $u, u_z$  – скорости газа на выходе из сопла осевой трубы и на входе в зазор между основанием конусной направляющей и стенками конфузора, м/с;  $v_1, v_2, v_3$  – средние скорости газа на внешних контурах вихрей, м/с;  $u_{oy}, u_{ok}, u_1, u_0$  – осевые составляющие скорости газа в цилиндрической части корпуса, в конфузурной части корпуса, на входе в конфузор, на выходе из конфузора, м/с;  $u'$  – скорость восходящего потока газа в конфузурной части корпуса, м/с;  $u_{oy}, u_{ok}$  – тангенциальные составляющие скорости газа в цилиндрической и конической частях корпуса, м/с;  $\gamma_u = u_{oy} u_{oy}^{-1}, \gamma_k = u_{ok} u_{ok}^{-1}$  – углы закрутки газового потока в цилиндрической и конфузурной частях корпуса, д.е;  $D_u, D_0, D, D_{II}$  – диаметры цилиндрической части корпуса, конфузурной части корпуса в его выходном сечении, осевой трубы, патрубка, м;  $L_u, L_k$  – длины цилиндрической и конической частей корпуса, м;  $L$  – расстояние между основанием конусной направляющей и выходным сечением конфузурной части корпуса, м;  $\alpha$  – угол конусности, град

Рассмотрим вихревое движение газового потока в цилиндрикоконическом корпусе циклона и прямооточного пневмосепаратора (рис. 2).

При вихревом движении газа в цилиндрической части корпуса циклона (рис. 2,а) можно принять, что  $u_{oy} \approx u_{ex}$ . Потери давления газового потока, выраженные через величину осевой составляющей скорости  $u_{oy}$ , можно определить по формуле [1, 7]

$$\Delta P_{oy} = \frac{\rho_z u_{oy}^2}{2} \left( \frac{\lambda_{oy}^* L_u}{D_u - D} + \frac{\lambda_{oy} L_u}{2D_u} \right), \quad (1)$$

где  $\lambda_{oy}, \lambda_{oy}^*$  – коэффициенты потерь на трение по длине цилиндрической части корпуса без осевой трубы и в зазоре между ними;  $\rho_z$  – плотность газа, кг/м<sup>3</sup>, определяемая из выражения [8]

$$\rho_z = \frac{P_z}{Z_z R_z T_z}, \quad (2)$$

где  $P_z$  – полное давление газа, Па;  $R_z$  – газовая постоянная, Дж/(кг·К);  $T_z$  – температура газа, К;  $Z_z$  – коэффициент сжимаемости газа, определяемый из работы [8].

Согласно формуле А.Д. Альтшуля [7] получим:

$$\begin{cases} \lambda_{\text{от}} = 0,11(\bar{\Delta} + 68Re_{\text{от}}^{-1})^{0,25}; \\ \lambda_{\text{от}}^* = 0,11(\bar{\Delta}^* + 68Re_{\text{от}}^{*-1})^{0,25}, \end{cases} \quad (3)$$

где  $\bar{\Delta} = \Delta D_{\text{от}}^{-1}$ ,  $\bar{\Delta}^* = 2\Delta(D_{\text{от}} - D)^{-1}$  – относительные шероховатости стенок цилиндрической части корпуса, д.е;  $\Delta$  – эквивалентная шероховатость стенок цилиндрической части корпуса, м;  $Re_{\text{от}}$ ,  $Re_{\text{от}}^*$  – числа Рейнольдса в цилиндрической части корпуса без осевой трубы и в зазоре между ними, определяемые как:

$$\begin{cases} Re_{\text{от}} = u_{\text{от}} D_{\text{от}} \nu_z^{-1}; \\ Re_{\text{от}}^* = 0,5u_{\text{от}} (D_{\text{от}} - D) \nu_z^{-1}. \end{cases} \quad (4)$$

Здесь  $\nu_z$  – кинематическая вязкость газа, м<sup>2</sup>/с.

В соответствии с работой [9]

$$\Delta P_{\text{от}} = \Delta P_{\text{от}0} (1 + tg^2 \gamma_{\text{от}})^{0,5(3-m)}, \quad (5)$$

где  $\Delta P_{\text{от}}$  – суммарные потери давления газового потока при его вихревом движении в цилиндрической части корпуса;  $m = 0,25$  – числовой коэффициент, характеризующий турбулентный режим движения [10].

Суммарные потери давления газового потока в конфузорной части корпуса

$$\Delta P_{\text{к}} = \Delta P_{\text{ок}} + \Delta P_{\text{мк}}, \quad (6)$$

где  $\Delta P_{\text{ок}}$ ,  $\Delta P_{\text{мк}}$  – потери давления на трение и местные потери в конфузорной части корпуса, Па, выраженные через величину осевой составляющей скорости  $u_0$  и определяемые согласно работе [7] как:

## Гравітаційна сепарація

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta P_{ок} = \frac{\rho_z u_0^2 \lambda_{ок}}{16 \sin(0,5\alpha)} (1 - n_0^2); \\ \Delta P_{мк} \approx \frac{\rho_z u_0^2}{2} (-0,0125 n_0^4 + 0,0224 n_0^3 - 0,00723 n_0^2 + \\ + 0,00444 n_0 - 0,00745) (\alpha_p^3 - 2\pi\alpha_p^2 - 10\alpha_p), \end{array} \right. \quad (7)$$

где  $\alpha_p = 0,01745\alpha$ , рад;  $\lambda_{ок}$  – коэффициент потерь на трение по длине конфузорной части корпуса;  $n_0 = D_0^2 D_u^{-2}$  – степень сужения конфузора.

Число Рейнольдса на входе в конфузор и величина коэффициента потерь на трение по длине конфузорной части корпуса определяются по следующим формулам [7]:

$$\left\{ \begin{array}{l} Re_1 = \frac{u_1 D_u}{\nu_z}; \\ \lambda_{ок} = 0,11 (\bar{\Delta} + 68 Re_1^{-1})^{0,25}. \end{array} \right. \quad (8)$$

По аналогии с выражением (5) суммарные потери давления газового потока при его вихревом движении в конфузорной части корпуса запишутся так:

$$\Delta P_u = \Delta P_k (1 + t g^2 \gamma_k)^{0,5(3-m)}, \quad (9)$$

Рассмотрим вихревое движение газа в цилиндроконическом корпусе прямого пневмосепаратора (рис. 2,б). При выходе струи газа из сопла происходит ее взаимодействие с поверхностью конусной направляющей, а затем со стенками корпуса (удар струи). Конфузорность стенок и форма конусной направляющей способствуют тому, что основная часть газового потока начинает двигаться вверх. Остальная часть потока (разделение струи) проникает в зазор между стенками конфузорной части корпуса и основанием конусной направляющей.

Результатом взаимодействия потока со стенками цилиндроконического корпуса и осевой трубой пневмосепаратора является образование вихревой области течения, которую на плоскости можно представить в виде вихревой пары.

При достижении дна бункера (рис. 1) газовый поток разворачивается на  $180^\circ$  и начинается его восходящее движение. Так как основная часть энергии газового потока сосредоточена в вихревой области течения, расположенной над конусной направляющей (рис. 2,б), а при входе потока в зазор возникают дополнительные потери энергии, то для вихревой области на участке длиной  $L$  (рис. 2, б) будет наблюдаться незначительная интенсивность турбулентности. По этой причине при турбулентном движении газопылевого потока в корпусе пневмосепаратора наибольшая концентрация частиц пыли будет в вихревой об-

## Гравітаційна сепарація

ласти над конусной направляющей. В зазор между стенками конфузорной части корпуса и конусной направляющей будут попадать крупные частицы пыли, а также отдельные частицы, заносимые турбулентными пульсациями несущей среды. Большая часть этих частиц оседает на дно бункера и не подвержена влиянию восходящего газового потока.

Суммарные потери давления в цилиндроконическом корпусе пневмосепаратора выше основания конусной направляющей, определяются по формуле

$$\Delta p_{\chi} = \sum_{i=1}^6 \Delta p_i + \sum_{i=1}^7 \Delta p_{mi} + \Delta p_w, \quad (10)$$

где  $\Delta p_1, \Delta p_2, \Delta p_3, \Delta p_4, \Delta p_5, \Delta p_6$  – потери давления газового потока на трение по длине поверхности конусной направляющей, обращенной к струе, конфузорного участка корпуса, цилиндрического участка корпуса, наружной поверхности патрубка при восходящем течении, внутренней поверхности патрубка, верхней стенки корпуса, наружной поверхности осевой трубы, Па;  $\Delta p_{m1}, \Delta p_{m2}, \Delta p_{m3}, \Delta p_{m4}, \Delta p_{m5}, \Delta p_{m6}, \Delta p_{m7}$  – местные потери давления газового потока на выходе струи из сопла (внезапное расширение), при взаимодействии соответственно с конусной направляющей, со стенками конфузорного участка корпуса (включая удар струи о стенки), с наружной поверхностью патрубка при восходящем течении, с наружной поверхностью осевой трубы, с верхней стенкой корпуса и на входе в патрубок, Па;  $\Delta p_w$  – местные потери давления газового потока за счет затрат энергии на образование вихревой области течения, Па.

Суммарные потери давления в цилиндроконическом корпусе пневмосепаратора ниже основания конусной направляющей, определяются по формуле

$$\Delta p_{\chi}' = \sum_{i=1}^4 \Delta p_i' + \sum_{i=1}^5 \Delta p_{mi}' + \Delta p_w', \quad (11)$$

где  $\Delta p_1', \Delta p_2', \Delta p_3', \Delta p_4'$  – потери давления газового потока на трение по длине конфузорного участка корпуса, бункера, основания бункера, основания конусной направляющей при восходящем течении, Па;  $\Delta p_{m1}', \Delta p_{m2}', \Delta p_{m3}', \Delta p_{m4}', \Delta p_{m5}'$ ,  $\Delta p_w'$  – местные потери давления газового потока в зазоре после взаимодействия со стенкой конфузорного участка корпуса над основанием конусной направляющей, в конфузорном участке корпуса, при взаимодействии соответственно с основанием бункера, с основанием конусной направляющей и в зазоре при восходящем течении, Па;  $\Delta p_w'$  – местные потери давления газового потока за счет затрат энергии на образование вихревой области течения, Па.

*Выводы и направления дальнейших исследований:*

- использование конусной направляющей газопылевого потока в аналоге прямоточного пневмосепаратора позволяет создать аэродинамический эффект, особенностью которого является разделение газопылевой струи на поверхности

## **Гравітаційна сепарація**

конусной направляющей и на стенке конфурного участка корпуса, что приводит к формированию вихревой области течения двухфазной среды и интенсификации сепарации пыли;

- отличительной особенностью разработанного пневмосепаратора по сравнению с традиционными (жалюзными, циклонными и др.) является формирование новой аэродинамической структуры турбулентного двухфазного потока в цилиндроконическом корпусе.

Дальнейшие исследования авторов будут направлены на изучение влияния конструктивно-технологических параметров пневмосепаратора на сепарацию пыли и аэродинамическое сопротивление воздухоочистителя.

### **Список литературы**

1. **Лойцянский Л.Г.** Механика жидкостей и газа [Текст] / Л.Г. Лойцянский. – М.: Наука, 1970. – 906 с.
2. **Идельчик И.Е.** Аэрогидродинамика технологических аппаратов [Текст] / И.Е. Идельчик. – М.: Машиностроение, 1983. – 351 с.
3. **Русанов А.А.** Справочник по пыле- и золоулавливанию [Текст] / А.А. Русанов. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 312 с.
4. **Мхитарян А.М.** Аэрогидромеханика [Текст] / А.М. Мхитарян. – М.: Машиностроение, 1984. – 412 с.
5. **Кривощек В.И.** Ударное взаимодействие твердой частицы с шероховатой поверхностью стенки [Текст] / В.И. Кривощек, Л.А. Новиков // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2009. – Вип. 38(79). – С. 78 – 85.
6. **Кривощек В.И.** Взаимодействие со стенками канала твердых частиц потока газозвеси [Текст] / В.И. Кривощек, Л.А. Новиков // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2010. – Вип. 41(82) – 42(83). – С. 156 – 163.
7. **Идельчик И.Е.** Справочник по гидравлическим сопротивлениям [Текст] / И.Е. Идельчик. – М.: Машиностроение, 1975. – 559 с.
8. **Голубев И.Ф.** Вязкость газовых смесей [Текст] / И.Ф. Голубев, Н.Е. Гнездилов. – М.: Изд-во стандартов, 1971. – 319 с.
9. **Брэдшоу П.** Введение в турбулентность и ее измерение [Текст] / П. Брэдшоу. – М.: Мир, 1974. – 278 с.
10. Численное моделирование течений несжимаемой жидкости на основе метода искусственной сжимаемости [Текст] / **Ю.А. Грязин, С.Г. Черный, С.В. Шаров** // Вычислительные технологии: сб. науч. тр. – Новосибирск: ИВТ СО РАН, 1995. – Т.4. – №13. – С. 180-203.

© Кривощек В.И., Новиков Л.А., 2011

*Надійшла до редколегії 10.01.2011 р.  
Рекомендовано до публікації д.т.н. Л.Ж. Горобець*