

# ПРОЦЕССЫ, АППАРАТЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ПИЩЕВЫХ ПРОИЗВОДСТВ

УДК 621.928.93

## НОВОЕ В ТЕОРИИ И ТЕХНИКЕ ОЧИСТКИ ГАЗОВ ОТ ПЫЛИ НА ОСНОВЕ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ ВИХРЕВЫХ ПОТОКОВ

*А. В. Акулич, В. М. Лустенков, К. В. Шушкевич, А. А. Акулич*

Разработана математическая модель движения газовой фазы в прямооточных вихревых пылеуловителях и построены изолинии тока газа при различных кратностях расходов. Создана классификация центробежных пылеуловителей на основе закрученных потоков. Разработаны новые способы и конструкции вихревых и комбинированных пылеуловителей. Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований гидродинамики разработанных пылеуловителей на основе вихревых потоков

### Введение

Эффективная очистка отработанного воздуха в системах аспирации и пневмотранспорта на предприятиях пищевой промышленности является актуальной проблемой, для решения

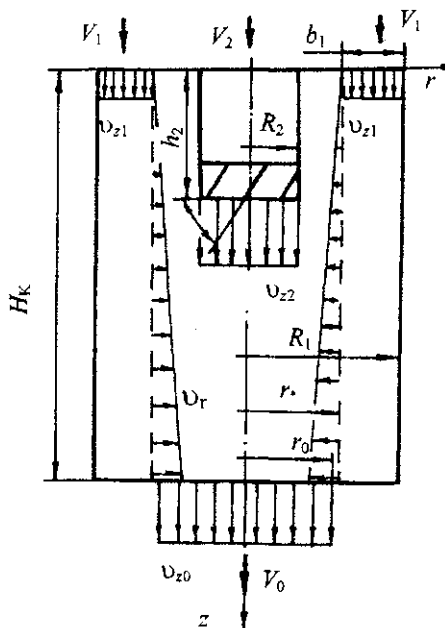


Рисунок 1 – Схема движения двух закрученных потоков в прямооточном вихревом пылеуловителе

которой необходимы разработка и внедрение новых технологических и технических решений, реализующих принцип взаимодействующих вихревых потоков газ-взвеси. Данный принцип позволяет создавать управляемую гидродинамическую обстановку в аппарате, что способствует высокоэффективной очистке пылегазовых потоков.

### Основы теории центробежной очистки газов от пыли

Разработана математическая модель движения газовой фазы в прямооточных вихревых пылеуловителях, которая включает систему дифференциальных уравнений Навье-Стокса и неразрывности, и получены результаты ее численного решения с помощью  $(k-\epsilon)$ - модели турбулентности (рисунок 1) [1]. При моделировании принято, что движение центрального закрученного газового потока, формируемого с помощью лопаточного завихрителя, подчиняется закону квазитвердого вращения. Во входном патрубке периферийного потока распределение тангенциальной скорости газа равномерное. Предположено, что пристеночная турбулентность является равновесной, т.е. скорости генерации и диссипации турбулентности равны.

Изучена гидродинамика движения газовой фазы в прямооточных вихревых пылеуловителях (ПВП) в зависимости от кратности расходов  $k$ , угла

закрутки центрального завихрителя  $\beta$  и относительной высоты его ввода  $h_2/H_k$ .

На рисунке 2 приведены изолинии тока газа в прямоточном вихревом пылеуловителе при различных значениях кратности расходов  $k$ . Анализ полученных результатов показывает, что с изменением  $k$  изменяется гидродинамическая обстановка в аппаратах. Так, при  $k=0,55$  в зоне взаимодействия вихревых потоков наблюдается примерно равная интенсивность течения газа (рисунок 2), вследствие увеличения доли газа, подаваемого в центральный завихритель. Однако, при  $k=0,85$  возрастает интенсивность течения газа в периферийной области и снижается в центральной части, вблизи завихрителя, где появляется зона кольцевого течения газа (т.е. зона вихреобразования). При  $k=0,7$  такой зоны не наблюдается (рисунок 2).

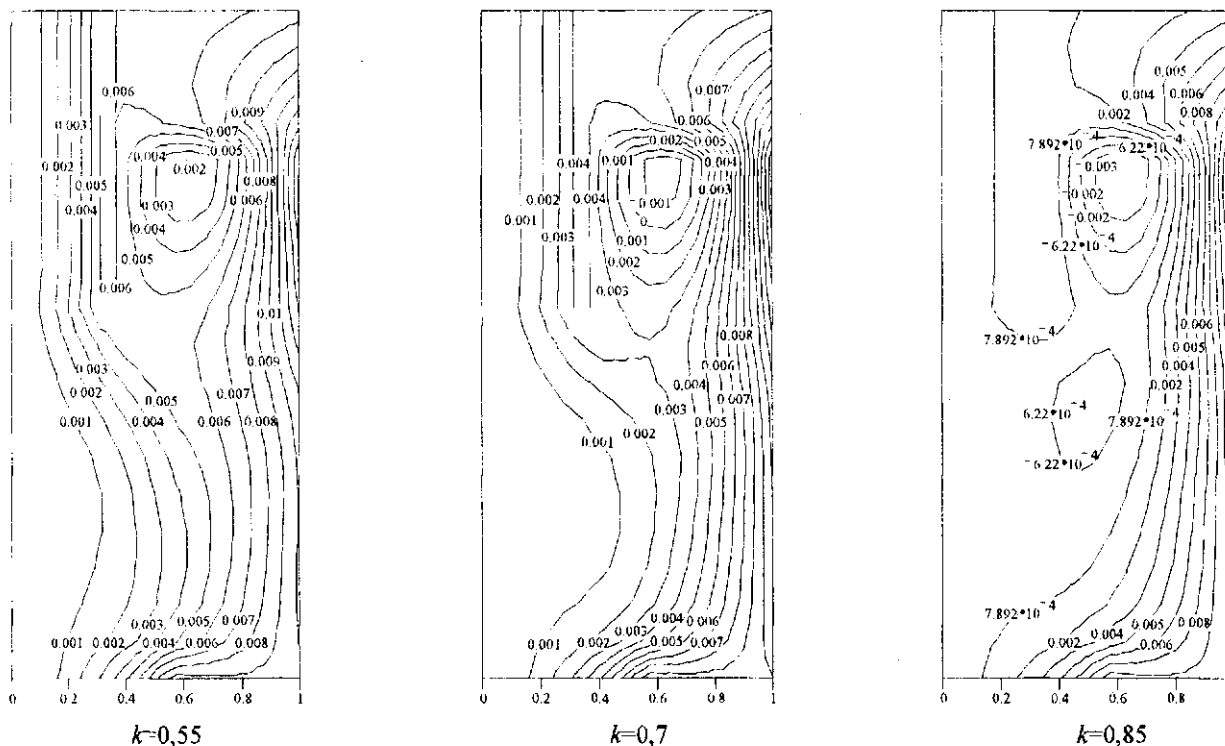


Рисунок 2 – Изолинии тока газа в прямоточном вихревом пылеуловителе при различной кратности расходов  $k$  ( $v_{cp}=5$  м/с;  $\beta=45^\circ$ ;  $h_2/H_k=0,45$ )

### Новые типы пылеуловителей на основе взаимодействующих вихревых потоков

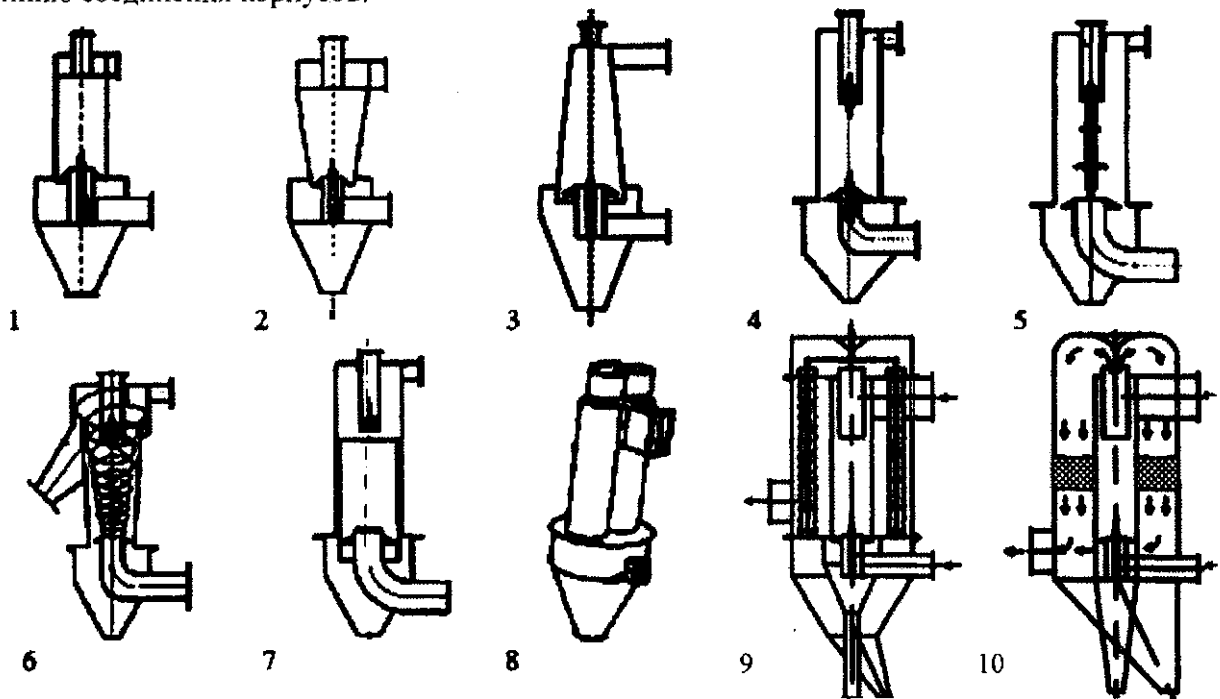
Разработана классификация закрученных потоков по способам генерации, движения и динамического взаимодействия их между собой с учетом возникающих при этом вихревых эффектов [2]. Создана классификация центробежных пылеуловителей, которые подразделены на три класса: циклонные, вихревые и комбинированные. При этом вихревые пылеуловители выделены в два подкласса, а именно противоточные и прямоточные. Выделен новый класс комбинированных пылеуловителей, к которым отнесены вихревые-фильтрационные аппараты, а также вихревые пылеуловители, в которых одновременно действуют другие энергетические поля [2].

На кафедре теплохладотехники на протяжении 30 лет ведется работа по созданию новых способов и конструкций вихревых пылеуловителей, которые существенно расширяют область их применения и повышают эффективность очистки газовых потоков (рисунок 3).

При очистке большого объема запыленного газа в одиночном аппарате, обеспечивающем заданную производительность, недостаточна степень его очистки. В этом случае путем объединения вихревых пылеуловителей в групповые (батарейные) установки можно получить нужную производительность при требуемой эффективности очистки газа [3–4].

Создана новая конструкция групповых вихревых пылеуловителей (рисунок 3) с двумя

корпусами [3]. При этом корпуса вихревых пылеуловителей установлены на цилиндрико-коническом общем бункере без зазора. Для компактности и уменьшения металлоемкости патрубки периферийного и центрального потоков газозвеси, каждого из корпусов, объединены в один и разделены перегородками, установленными в плоскости, проходящей через линию соединения корпусов.



1 – вихревой противоточный пылеуловитель; 2 – вихревой спирально-конический пылеуловитель; 3 – вихревой пылеуловитель с расширяющимся корпусом; 4 – прямоточный вихревой пылеуловитель; 5 – прямоточный вихревой пылеуловитель с дополнительными шайбами; 6 – прямоточный вихревой пылеуловитель с коническим корпусом и промежуточным бункером; 7 – прямоточный вихревой пылеуловитель с цилиндрической обечайкой; 8 – групповой вихревой пылеуловитель; 9 – комбинированный пылеуловитель с тканевыми фильтровальными рукавами; 10 – комбинированный пылеуловитель с зернистым слоем

**Рисунок 3 – Разработанные типы пылеуловителей на основе вихревых потоков**

Опыт промышленной эксплуатации пылеулавливающего оборудования показал, что в настоящее время перспективным направлением является разработка комбинированных пылеуловителей, которые позволяют снизить габариты, энерго- и металлоемкость при высокой степени очистки газов от мелкодисперсной фракции. Это достигается совмещением нескольких способов отделения в едином энергетическом поле аппарата.

Разработан способ комбинированной очистки газов и аппараты для его реализации (рисунок 3), отличительной особенностью которого является взаимодействие периферийного и центрального потоков газозвеси, закрученных в одном направлении и движущихся навстречу друг другу с последующей доочисткой газа фильтрованием [5]. Данный способ реализован в принципиально новой конструкции комбинированного пылеуловителя, в котором осуществляется центробежное отделение взвешенных частиц в системе двух взаимодействующих потоков с последующей доочисткой газа фильтрованием через ряд тканевых рукавов, установленных вокруг камеры центробежного отделения [6]. На первой стадии очистки обеспечивается высокая эффективность отделения пыли при сравнительно небольшом гидравлическом сопротивлении. При этом снижается пылевая нагрузка на фильтровальную ткань, что позволяет повысить скорость процесса фильтрования.

Созданный способ реализован также в комбинированном пылеуловителе с зернистым слоем (рисунок 3). Отличительной особенностью данного аппарата является выполнение стадии фильтрования в виде кольцевого слоя зернистого материала, размещенного на распределителе

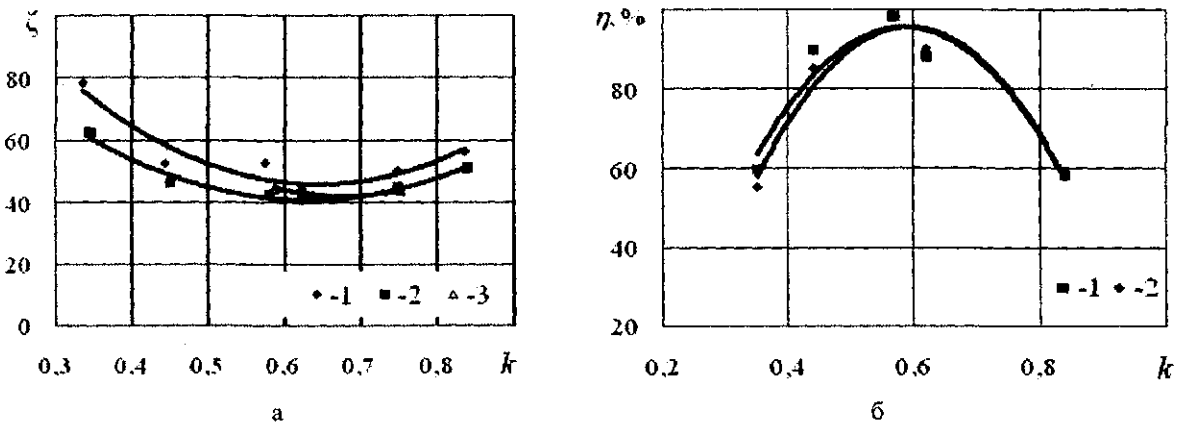
тельной решетке между корпусом пылеуловителя и камерой центробежного отделения.

**Результаты исследований и их обсуждение**

На основе энергетического баланса потоков впервые получена зависимость для расчета гидравлического сопротивления группового (батарейного) вихревого пылеуловителя, состоящего из  $n$  корпусов, при условии подачи запыленного газа во все патрубки:

$$\Delta P = \frac{1}{n} [ (\Delta P_1^I + \Delta P_1^{II} + \Delta P_1^{III} + \dots + \Delta P_1^n) \cdot k + (\Delta P_2^I + \Delta P_2^{II} + \Delta P_2^{III} + \dots + \Delta P_2^n) \cdot (1 - k) ] \quad (1)$$

Исследована гидродинамика группового вихревого пылеуловителя. На рисунке 4а представлены зависимости коэффициента гидравлического сопротивления  $\zeta$  группового вихревого пылеуловителя ГВП-120-2 от кратности расхода  $k$  [4]. Из анализа результатов экспериментов следует, что при кратности расхода  $k=0,55-0,65$  достигается наименьший коэффициент гидравлического сопротивления  $\zeta=40-50$  (рисунок 4а). При этом с изменением кратности расхода  $k$  как влево, так и вправо относительно данного интервала происходит значительное увеличение коэффициента гидравлического сопротивления. В указанном интервале  $k$  обеспечивается максимальная эффективность улавливания, которая достигает 98 % (рисунок 4б).



1 -  $V_0=350 \text{ м}^3/\text{ч}$ , 2 -  $V_0=450 \text{ м}^3/\text{ч}$ , 3 -  $V_0=550 \text{ м}^3/\text{ч}$

**Рисунок 4 – Зависимости коэффициента гидравлического сопротивления (а) и эффективности улавливания йодированной соли (б) в групповом вихревом пылеуловителе ГВП 120-2 от кратности расхода  $k$  при различных общих расходах газа**

Разработаны и внедрены в промышленности групповые вихревые пылеуловители ГВП-750-2 на ОАО «Мозырьсоль» ( $V_0=22520-26280 \text{ м}^3/\text{ч}$ ) и ГВП-350-2 на ОАО «Лидапиче-концентраты» ( $V_0=4160-5040 \text{ м}^3/\text{ч}$ ).

Проведены теоретические исследования гидродинамики комбинированного пылеуловителя с тканевыми фильтровальными рукавами и впервые получена зависимость для расчета потери давления [7, 8]:

$$\Delta P_0 = k\Delta P_1 + (1 - k)\Delta P_2 + \mu(Kw_\phi + K_{с.п} z_{вх} w_\phi^2) \quad (2)$$

где  $\Delta P_i$ , ( $i=0,1,2$ ) – потери давления всего аппарата, периферийного и центрального потоков, Па;

$k$  – кратность расходов;

$K$  – коэффициент, характеризующий сопротивление фильтровальной перегородки с оставшимся на ней слоем пыли,  $\text{м}^{-1}$ ;

$K_{с.п}$  – коэффициент сопротивления слоя пыли,  $\text{м}/\text{кг}$ ;

$w_\phi$  – скорость фильтрования,  $\text{м}/\text{с}$ ;

$z_{вх}$  – концентрация пыли при входе на стадию фильтрования,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$\mu$  – динамическая вязкость воздуха,  $\text{Па}\cdot\text{с}$ ;

$\tau$  – продолжительность фильтровального цикла, с.

Получена также зависимость для определения коэффициента гидравлического сопротивления комбинированного пылеуловителя с тканевыми фильтровальными рукавами:

$$\zeta_0 = \zeta_1 k^3 + \zeta_2 (1-k)^3 + \zeta_3 \frac{D_k^4}{n^2 d_p^4}, \quad (3)$$

где  $\zeta_i$ , ( $i=0,1,2,3$ ) – коэффициент гидравлического сопротивления всего аппарата, камеры центробежного отделения при подаче воздуха только через периферийный и центральный патрубки, стадии фильтрования;

$D_k$  – диаметр камеры центробежного отделения, м;

$d_p$  – диаметр рукава, м;

$n$  – число рукавов.

Разработаны и внедрены в производство комбинированные пылеуловители КП–350–10 ( $V_0 = 2100 \text{ м}^3/\text{ч}$ ) и КП–400–10 ( $V_0 = 3000 \text{ м}^3/\text{ч}$ ) для улавливания сахарной пудры на ОАО «Красный Мозырянин».

На основе энергетического баланса получена зависимость для расчета гидравлического сопротивления комбинированного пылеуловителя с зернистым слоем [10]:

$$\Delta P = k \Delta P_1 + (1-k) \Delta P_2 + \left[ 5,47 \frac{(1-\varepsilon)^2 \rho H_{cn} w_\phi^2}{\varepsilon^3 d_s} \right], \quad (4)$$

где  $H_{cn}$  – высота зернистого слоя, м;

$d_s = \sqrt[3]{6V/\pi}$  – эквивалентный диаметр гранулы, м;  $V$  – объем гранулы,  $\text{м}^3$ ;

$\varepsilon$  – порозность слоя;

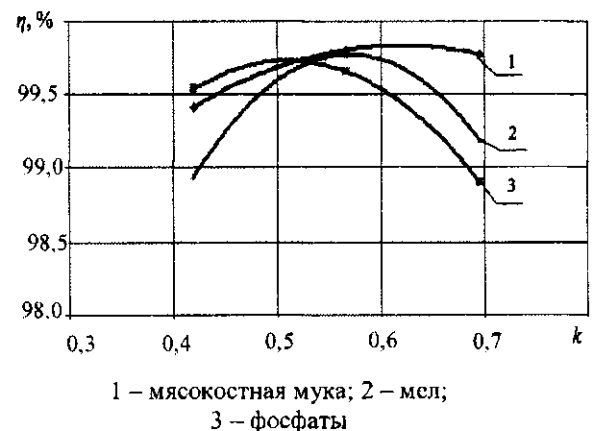
$\rho$  – плотность газа,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Проведены экспериментальные исследования гидравлического сопротивления и эффективности улавливания комбинированного пылеуловителя КПЗС–150–0,14 с зернистым слоем, состоящим из древесных опилок с эквивалентным диаметром  $2 \cdot 10^{-3}$  м и высотой  $0,03 \pm 0,075$  м.

Найдены зависимости потери давления (рисунок 5а) комбинированного пылеуловителя, камеры центробежного отделения и стадии фильтрования, а также эффективности улавливания (рисунок 5б) различных мелкодисперсных материалов от кратности расходов при общем расходе газа  $300 \text{ м}^3/\text{ч}$  и высоте зернистого слоя  $0,03$  м.



а



б

Рисунок 5 – Зависимости потери давления в комбинированном пылеуловителе КПЗС–150–0,14 (а) и эффективности улавливания мелкодисперсных материалов от кратности расходов  $k$  при общем объемном расходе газа  $300 \text{ м}^3/\text{ч}$  и высоте зернистого слоя  $0,03$  м

Установлено, что потери давления комбинированного пылеуловителя и камеры центробежного отделения при различных общих объемных расходах газа являются минимальными в диапазоне кратности расходов  $k=0,35\div 0,6$  (рисунок 5а). Также определено, что комбинированный пылеуловитель КПЗС-150-0,14 работает в режиме наибольшей эффективности улавливания в интервале  $k=0,5\div 0,6$  (рисунок 5б).

### **Заключение**

Разработана математическая модель движения газовой фазы в прямооточных вихревых пылеуловителях и построены изолинии тока газа при различных значениях кратности расходов. Представлены новые способы и конструкции одиночных и групповых (батарейных) вихревых пылеуловителей, а также комбинированных пылеуловителей на основе взаимодействующих закрученных потоков. Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований гидродинамики групповых вихревых пылеуловителей и комбинированных пылеуловителей с фильтровальными рукавами и зернистым слоем. Впервые получена зависимость для расчета гидравлического сопротивления групповых вихревых пылеуловителей в зависимости от числа корпусов. Установлены диапазоны кратности расходов, обеспечивающие минимальные потери давления и наибольшую эффективность улавливания комбинированного пылеуловителя с зернистым слоем.

### **Литература**

- 1 Акулич, А.В. Моделирование движения газовой фазы в прямооточном вихревом пылеуловителе / А.В. Акулич, Б.С. Сажин, А.Г. Егоров. – Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. 1998. – № 4. – С. 96–100.
- 2 Акулич, А.В. Совершенствование вихревых аппаратов для сушки и сепарации дисперсных материалов / А.В. Акулич // Доклады IV Минского международного форума по тепломассообмену. ММФ-2000. Тепломассообмен в процессах сушки, т.9. – Минск, 2000. – С. 49–56.
- 3 Групповой вихревой пылеуловитель: пат. 8329 Респ. Беларусь, МПК7 В04С 3/06, 5/28 / А.В. Акулич, К.В. Шушкевич; заявитель Могил. гос. ун-т продовольствия. – № а 20040006; заявл. 08.01.2004; опубл. 30.08.2006 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці., 2006. – № 4. – С. 56.
- 4 Шушкевич, К.В., Акулич А.В. Исследование гидродинамики вихревого пылеуловителя для очистки пылегазовых потоков пищевых производств / К.В. Шушкевич, А. В. Акулич // сб. науч. работ «НИРС 2002». / Изд. Центр БГУ; редкол.: А.А. Баешко (отв. ред.) [и др.]. – Минск, 2003. – С. 455–457.
- 5 Способ очистки газа от твердых частиц: пат. 6280 Респ. Беларусь, МПК7 В 04 С 3/04, В 01 D 45/12 / А.В. Акулич; заявитель Могил. технол. ин-т. – № а 20001037; заявл. 22.11.00; опубл. 30.06.04. – № 2. – С. 140.
- 6 Комбинированный пылеуловитель: пат. 8290 Респ. Беларусь, МПК7 В 01 D 46/02, В 04 С 3/06 / А.В. Акулич, В.М. Лустенков; заявитель Могил. гос. ун-т продовольствия. – № а 20030016; заявл. 05.01.02; опубл. 30.08.06 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2006. – № 4. – С. 52–53.
- 7 Лустенков, В. М. Разработка комбинированного пылеуловителя/ В. М. Лустенков, А.В. Акулич, А.В. Темрук // Материалы IV междунар. науч.-техн. конф. «Техника и технология пищевых производств». – Могилев, 2003. – С. 309–310.
- 8 Акулич, А.В. Исследование гидравлического сопротивления комбинированного пылеуловителя / А.В. Акулич, В.М. Лустенков // ИФЖ. – 2005. – Т. 78. № 4. – С. 158–162.
- 9 Способ очистки газа от твердых частиц: пат. 16599 Респ. Беларусь, МПК2006 В04С 3/00, В01D 45/12, В01D 46/30 / А.В. Акулич, В.М. Лустенков, А.А. Акулич; заявитель Могил. гос. ун-т продовольствия. – № а20101052; заявл. 07.09.2010; опубл. 30.12.2012 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці, 2012. – № 6.
- 10 Акулич, А.В. Определение гидравлического сопротивления и эффективности улавливания комбинированного пылеуловителя с зернистым слоем / А.В. Акулич, В.М. Лустенков, В.М. Акулич // Научни трудове научной конференции с международным участием «Хранителна наука, техника и технологии – 2011» 14–15 октомври, Университет по хранителни технологии. – Пловдив, 2011, том LVIII, Св. 3, 2011. – С. 303–308.

*Поступила в редакцию 07.12.2012*