

# ПРОЦЕССЫ, АППАРАТЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ПИЩЕВЫХ ПРОИЗВОДСТВ

УДК 621.928.93

## ЭФФЕКТИВНЫЕ СПОСОБЫ И ВИХРЕВЫЕ АППАРАТЫ ДЛЯ ОЧИСТКИ ПЫЛЕГАЗОВЫХ ВЫБРОСОВ ОТ МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ

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

Рассмотрены новые способы очистки пылегазовых выбросов и разработанные для их реализации энергоэффективные вихревые аппараты на основе взаимодействующих закрученных потоков, в том числе групповые (батарейные) пылеуловители противоточного и прямоточного типа. Представлены результаты экспериментальных исследований гидродинамики разработанных аппаратов. Рассмотрено влияние режимных и конструктивных параметров на гидравлическое сопротивление и эффективность улавливания мелкодисперсных частиц в вихревых пылеуловителях. Приведены результаты промышленного внедрения вихревых пылеуловителей, разработанных авторами.

### **Введение**

В настоящее время в промышленности стоит проблема повышения эффективности процессов очистки пылегазовых выбросов за счет создания энергосберегающего пылеулавливающего оборудования, которое позволит не только обеспечить возврат мелкодисперсных материалов в производство, но и будет способствовать снижению выбросов в окружающую среду.

Анализ эксплуатируемого оборудования показал, что на предприятиях пищевой промышленности широкое распространение получили сухие инерционные осадители, циклоны, аппараты с вихревыми потоками, фильтры различных конструкций.

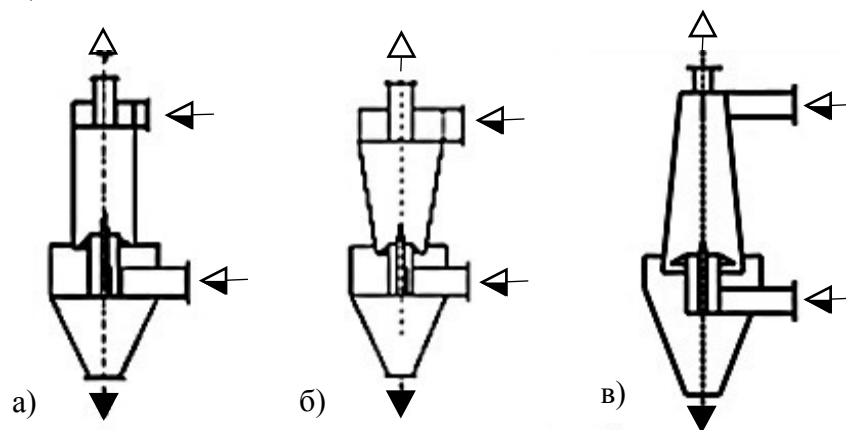
Следует отметить, что разработка и проектирование пылеуловителей должны основываться на ряде требований и условий, обеспечивающих высокую эффективность процесса очистки газов от мелкодисперсных частиц при наименьших энергозатратах. При выборе типа пылеулавливающего оборудования следует учитывать дисперсный состав пыли, плотность частиц, их абразивность, концентрацию, требуемую степень очистки, производительность, себестоимость, эксплуатационную надежность.

### **Результаты исследований и их обсуждение**

На кафедре теплохладотехники на протяжении 40 лет ведется работа по созданию новых энергоэффективных способов и аппаратов на основе взаимодействующих закрученных потоков для очистки запыленных газов от мелкодисперсных частиц, которые существенно расширяют область применения вихревых потоков и повышают эффективность пылеочистки (рисунки 1–3) [1–4].

Разработан способ и ряд конструкций вихревых пылеуловителей на основе противоточного движения потоков, закрученных в одну сторону и движущихся во встречных направлениях (рисунок 1) [5–6]. В вихревых противоточных пылеуловителях (ВПП) запыленный газ подается через два тангенциальных ввода, расположенных в верхней и нижней частях аппарата, при этом закрученные потоки движутся навстречу друг другу и в результате их взаимодействия

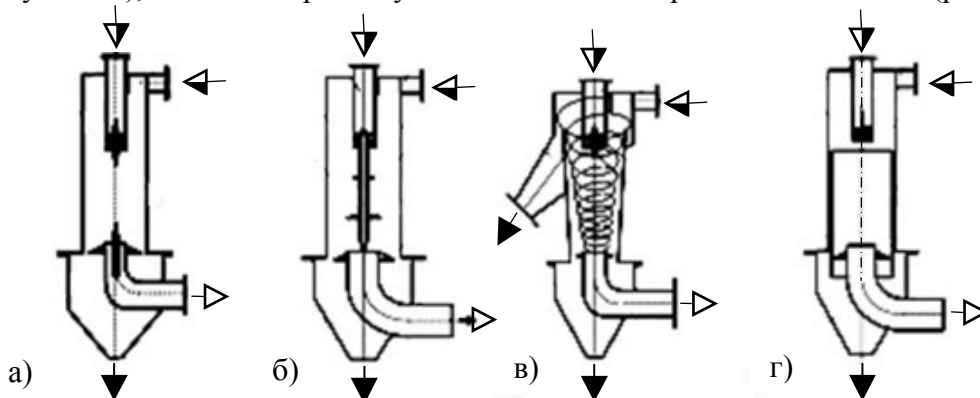
обеспечивается высокоактивный гидродинамический режим в сепарационной зоне. Очищенный газ выводится через выхлопную трубу в верхней части аппарата. Данные технические решения обеспечивают высокую эффективность улавливания мелкодисперсных частиц и могут применяться в различных производствах с учетом особенностей улавливаемого материала. Так, например, выполнение корпуса цилиндрико-конической формы обеспечивает увеличение эффективности улавливания наиболее мелкой фракции (рисунок 1б). Для улавливания частиц, характеризующихся высокой абразивностью, предложена конструкция с расширяющимся корпусом (рисунок 1в).



а – вихревой пылеуловитель с цилиндрическим корпусом; б – вихревой спирально-конический пылеуловитель; в – вихревой пылеуловитель с расширяющимся корпусом

**Рисунок 1 – Вихревые противоточные пылеуловители**

Для снижения гидравлического сопротивления вихревых аппаратов на основе взаимодействующих закрученных потоков предложен новый способ очистки газов, основанный на прямооточном движении закрученных в одном направлении потоков (рисунок 2) [7–9]. В прямооточных вихревых пылеуловителях (ПВП) газозвесь подается через периферийный и центральный вводы, расположенные в верхней части аппарата и потоки, закручиваясь, движутся, взаимодействуя, в одном направлении. В результате прямооточного движения и взаимодействия очищенный газ выводится через выхлопную трубу в нижней части аппарата (рисунок 2). Для стабилизации гидродинамической структуры взаимодействующих потоков и уменьшения зон разряжения в прямооточных пылеуловителях установлены дополнительные шайбы (рисунок 2б), корпус выполнен коническим и оснащен промежуточным бункером (рисунок 2в), в зоне сепарации установлена цилиндрическая обечайка (рисунок 2г).



а – вихревой пылеуловитель с цилиндрическим корпусом; б – вихревой пылеуловитель с дополнительными шайбами; в – вихревой пылеуловитель с коническим корпусом и промежуточным бункером; г – вихревой пылеуловитель с цилиндрической обечайкой

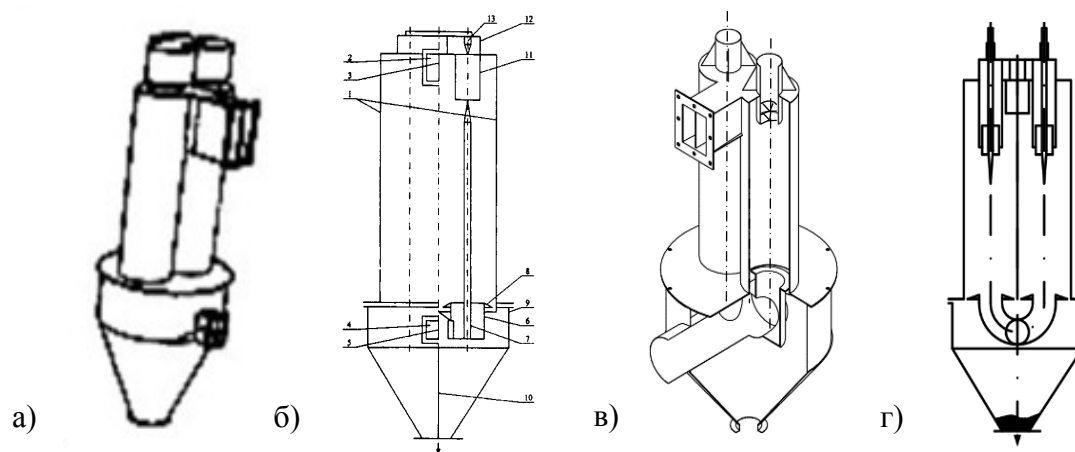
**Рисунок 2 – Прямоточные вихревые пылеуловители**

Изготовлены лабораторные модели противоточного (ВПП–140) и прямоточного (ПВП–140) вихревых пылеуловителей с диаметрами сепарационных камер 0,14 м. Проведен комплекс экспериментальных исследований их гидродинамики при общем объемном расходе газа через аппарат  $Q=280 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Установлено, что при кратности расходов  $k=0,6$  гидравлическое сопротивление для ПВП–140 составило 1000 Па, а для ВПП–140 – 1250 Па [10].

Проведены экспериментальные исследования и по эффективности улавливания дисперсных материалов в вихревых пылеуловителях ВПП–140 и ПВП–140. Установлено, что при общем объемном расходе газа через аппарат  $Q=280 \text{ м}^3/\text{ч}$  и кратности расходов  $k=0,6$  эффективность улавливания сухого обезжиренного молока с медианным диаметром  $d_{50}=19,2 \text{ мкм}$  в ПВП–140 составила  $\eta=91 \%$ , а при улавливании сахарной пудры с  $d_{50}=16,7 \text{ мкм}$  в ВПП–140  $\eta=72 \%$ .

Результаты сравнительного анализа вихревых пылеуловителей различного типа позволяют сделать вывод, что при одинаковых режимах работы прямоточный вихревой пылеуловитель (ПВП) характеризуется меньшим гидравлическим сопротивлением, чем вихревой противоточный пылеуловитель (ВПП), обеспечивая при этом достаточно высокую эффективность улавливания дисперсных материалов.

Для очистки больших объемов запыленного газа разработаны новые способы, которые реализованы в групповых (батареях) вихревых пылеуловителях на основе взаимодействующих закрученных потоков (рисунок 3) [1, 11–13]. Их отличительной особенностью является независимое гидродинамическое взаимодействие периферийных и центральных потоков газозвеси в корпусе, образованном из двух цилиндрических обечаяек, установленных без зазора на общем бункере уловленного материала. При этом периферийные потоки газозвеси подаются в верхней части обечаяек, а центральные потоки газозвеси подаются в нижней в противоточных аппаратах и в верхней части в прямоточных. При этом очищенный газ отводится в верхней части корпуса в противоточных аппаратах и в нижней части в прямоточных (рисунок 3).



а – групповой противоточный вихревой пылеуловитель; б – групповой противоточный вихревой пылеуловитель с увеличенными по высоте вытеснителями центрального потока; в – групповой прямоточный вихревой пылеуловитель с осевыми завихрителями центральных потоков; г – групповой прямоточный вихревой пылеуловитель с улочными завихрителями центральных потоков

### Рисунок 3 – Групповые вихревые пылеуловители

На основе уравнения энергетического баланса потоков впервые получена зависимость для расчета гидравлического сопротивления группового прямоточного вихревого пылеуловителя [14–15]:

$$\Delta P = \frac{1}{2} [(\Delta P_1' + \Delta P_1'') \cdot k + (\Delta P_2' + \Delta P_2'') \cdot (1 - k)], \quad (1)$$

где  $\Delta P_1', \Delta P_1'', \Delta P_2', \Delta P_2''$  – потери полного давления, соответственно, периферийных и центральных потоков запыленного газа в каждой из цилиндрических обечаек, Па;

$k = Q_1/Q_0$  – кратность расходов;

$Q_1, Q_2$  – объемные расходы запыленного газа, подаваемого через периферийные и центральные патрубки, м<sup>3</sup>/с;

$Q_0 = Q_1 + Q_2$  – общий объемный расход запыленного газа через аппарат, м<sup>3</sup>/с.

Впервые получена зависимость для определения коэффициента гидравлического сопротивления группового прямооточного вихревого пылеуловителя, состоящего из двух цилиндрических обечаек при подаче запыленного газа во все патрубки:

$$\zeta = \frac{1}{2} [(\zeta_1' + \zeta_1'')k^3 + (\zeta_2' + \zeta_2'')(1 - k)^3], \quad (2)$$

где  $\zeta_1', \zeta_1''$  – коэффициенты гидравлического сопротивления аппарата при подаче запыленного газа только в периферийные потоки каждой цилиндрической обечайки;

$\zeta_2', \zeta_2''$  – коэффициенты гидравлического сопротивления аппарата при подаче запыленного газа только в центральные потоки каждой цилиндрической обечайки.

Проведены экспериментальные исследования гидродинамики лабораторной модели группового противоточного вихревого пылеуловителя (рисунок 3а) от кратности расходов  $k$  при различных общих объемных расходах газа. Установлено, что его гидравлическое сопротивление при  $k=0,55 \div 0,70$  составляет от 460 до 1250 Па. При этом эффективность улавливания перлово-овсяной пыли в указанном интервале кратности расходов достигает 98 %, а овсяной пыли – 85 % [1].

Для исследования гидродинамики нового энергоэффективного способа очистки газов от мелкодисперсных твердых частиц изготовлена лабораторная модель группового прямооточного вихревого пылеуловителя на основе взаимодействующих закрученных потоков (рисунок 4) [14–15]. Групповой прямооточный вихревой пылеуловитель состоит из цилиндрического корпуса, выполненного в виде двух цилиндрических обечаек 1 и установленных без зазора на бункере 2 уловленной пыли. В верхней части цилиндрических обечаек 1 установлен патрубок 3 периферийного потока газозвеси, разделенный перегородкой 4 и патрубки 5 центрального потока газозвеси. В бункере 2 уловленной пыли установлены две выхлопные трубы 6, объединенные патрубком 7 отвода очищенного газа.

Проведены экспериментальные исследования гидравлического сопротивления (рисунок 5) группового прямооточного вихревого пылеуловителя на основе взаимодействующих закрученных потоков от кратности расходов ( $k$ ) и отношения диаметра центральных завихрителей к диаметру камер центробежного улавливания ( $d/D$ ) при отношении высоты установки центральных завихрителей к высоте цилиндрических камер центробежного улавливания  $h/H=0,25$  и общем объемном расходе газа  $Q_0=0,138$  м<sup>3</sup>/с (рисунок 5). Установлено, что гидравлическое сопротивление группового прямооточного пылеуловителя с взаимодействующими закрученными потоками возрастает с увеличением кратности расходов  $k$  и снижается при увеличении  $d/D$ . Наименьшее гидравлическое сопротивление  $\Delta P=400 \div 600$  Па достигается при  $d/D=0,46$  ( $d=0,056$  м),  $k=0,6 \div 0,8$  при  $h/H=0,25$  ( $h=0,12$  м) и общем объемном расходе газа  $Q_0=0,138$  м<sup>3</sup>/с (рисунок 5) [14–15].

Установлено, что на эффективность улавливания группового прямооточного вихревого пылеуловителя значительное влияние оказывает кратность расходов  $k$ . Из анализа зависимостей, представленных на рисунке 6а, установлено, что при  $k=0,85$ ,  $d=0,042$  м и  $h=0,12$  м во всем интервале исследованного объемного расхода газа  $Q_0=0,111 \div 0,166$  м<sup>3</sup>/с эффективность улавливания соляной пыли в групповом прямооточном вихревом пылеуловителе достигает 90 %. Определено, что при уменьшении кратности расходов до  $k=0,7$  эффективность улавливания снижается до  $\eta=74$  %. Кроме того, установлено, что уменьшение диаметров центральных завихрителей обеспечивает повышение эффективности улавливания соляной пыли в групповом

прямоточном вихревом пылеуловителе (рисунок 6б). Так, при  $k=0,7$  и  $Q_0=0,138 \text{ м}^3/\text{с}$  для  $d=0,042 \text{ м}$   $\eta=88 \%$ , а для  $d=0,062 \text{ м}$   $\eta=80 \%$  [16].

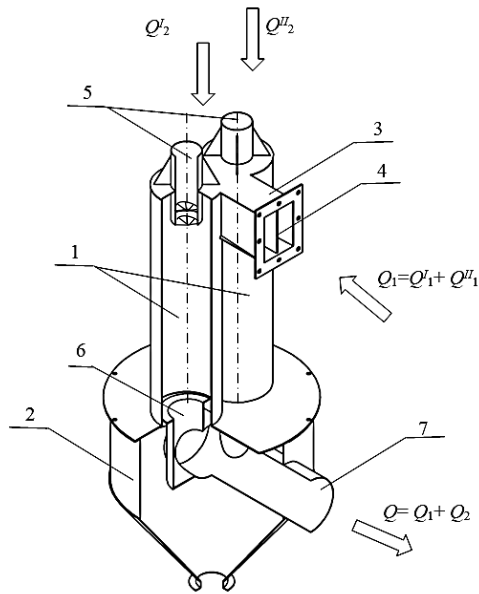


Рисунок 4 – Групповой прямоточный вихревой пылеуловитель

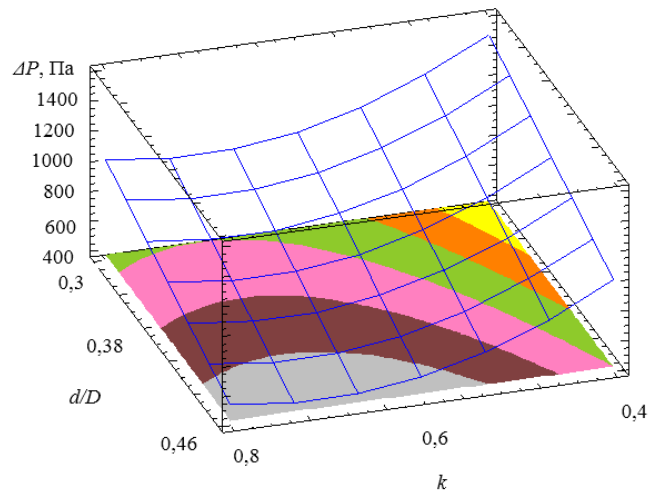
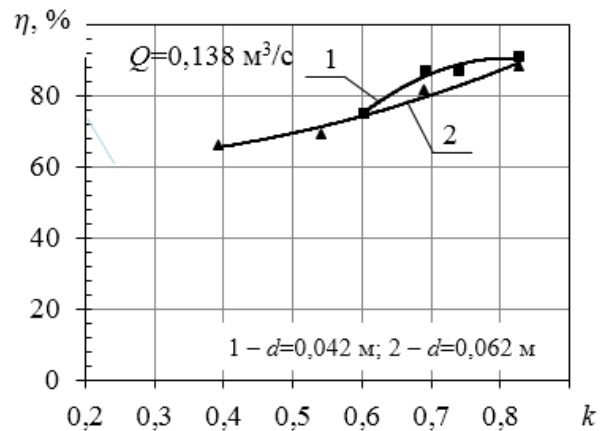
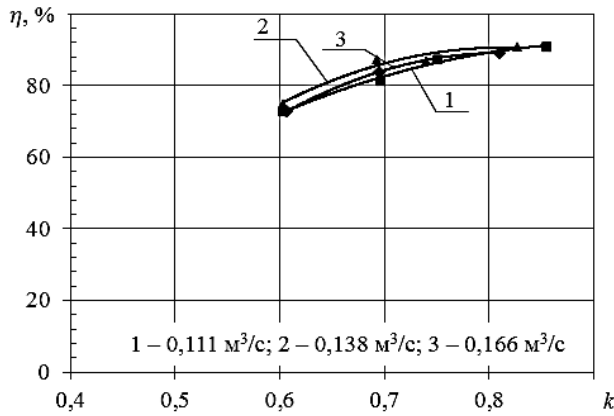


Рисунок 5 – Зависимость гидравлического сопротивления группового прямоточного вихревого пылеуловителя



а) б)  
Рисунок 6 – Зависимости эффективности улавливания соляной пыли в групповом прямоточном вихревом пылеуловителе

Полученные зависимости эффективности улавливания группового прямоточного вихревого пылеуловителя от кратности расходов позволяют сделать вывод об управляемой гидродинамике разработанного группового аппарата, то есть регулируя режимы работы пылеуловителя, подбираются оптимальные значения режимных и конструктивных параметров, при которых обеспечивается высокая эффективность улавливания мелкодисперсных пылей при наименьшем гидравлическом сопротивлении.

По результатам проведенных исследований разработаны и внедрены одиночные вихревые противоточные пылеуловители ВПП–300, ВПП–500, ВПП–600, ВПП–700, а также одиночный прямоточный вихревой пылеуловитель ПВП–600. Разработаны и внедрены групповые противоточные вихревые пылеуловители ГВП-750-2 с производительностью по запыленному газу  $Q=22520\div 26280$  м<sup>3</sup>/ч на ОАО «Мозырсьоль» и БВП–350–2 на ОАО «Лидапищеконцентраты» [1].

### Заключение

Созданы новые способы высокоэффективной очистки пылегазовых выбросов от мелкодисперсных частиц на основе взаимодействующих закрученных потоков. Для реализации новых способов разработаны энергоэффективные вихревые пылеуловители, в том числе групповые (батареи) пылеуловители прямоточного и противоточного типа.

На основе уравнения энергетического баланса потоков впервые получена зависимость для расчета гидравлического сопротивления и коэффициента гидравлического сопротивления группового прямоточного вихревого пылеуловителя, состоящего из двух цилиндрических обечаек. Проведены экспериментальные исследования гидродинамики разработанных вихревых пылеуловителей. Изучено влияние режимных и конструктивных параметров на гидравлическое сопротивление и эффективность улавливания мелкодисперсных частиц. Установлено, что гидравлическое сопротивление группового противоточного вихревого пылеуловителя при общем объемном расходе газа  $Q_0=0,139$  м<sup>3</sup>/с и  $k=0,65$  составляет 1250 Па. При  $k=0,55\div 0,7$  эффективность улавливания перлово-овсяной пыли достигает 98 %, а овсяной пыли – 85 %. Наименьшее гидравлическое сопротивление группового прямоточного вихревого пылеуловителя  $\Delta P=400\div 600$  Па достигается при  $d/D=0,46$  ( $d=0,056$  м),  $k=0,6\div 0,8$ ,  $h/H=0,25$  ( $h=0,12$  м) и общем объемном расходе газа  $Q_0=0,138$  м<sup>3</sup>/с.

Приведены результаты промышленного внедрения вихревых пылеуловителей, разработанных авторами.

### Литература

- 1 Акулич, А.В. Новое в теории и технике очистки газов от пыли на основе взаимодействующих вихревых потоков / А.В. Акулич // Вестник МГУП. – 2012. – № 2 (13). – С. 101–106.
- 2 Акулич, А.В. Создание групповых вихревых пылеуловителей для очистки газов в химической и текстильной промышленности / А.В. Акулич, К.В. Шушкевич, В.М. Акулич, В.М. Лустенков // Современные технологии и оборудование текстильной промышленности (Текстиль 2010): матер. Междунар. науч.-техн. конф., Москва, 23–24 ноября 2010 г. / Моск. гос. текстильный ун-т имени А.Н. Косыгина. – Москва, 2010. – С. 265.
- 3 Акулич, А.В. Новые высокоэффективные способы и пылеулавливающее оборудование на основе взаимодействующих вихревых потоков в пищевой промышленности / А.В. Акулич, В.М. Лустенков // Инновационные решения проблем экономики знаний Беларуси и Казахстана: сборник материалов науч.-практ. конф., Минск, 13 октября 2016 г. / БНТУ. – Минск, 2016. – С. 150–151.
- 4 Акулич, А.В. Новые способы очистки газов и групповые пылеуловители на основе взаимодействующих вихревых потоков / А.В. Акулич, В.М. Лустенков, А.А. Акулич // Сб. науч. тр. / VI-ый Междунар. науч.-техн. симпозиум Современные энерго- и ресурсосберегающие технологии СЭТТ–2017 Междунар. научно-технич. Форума Первые международные Косыгинские чтения, Москва, 11–12 октября 2017 г.: в 2 Т. / ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина». – Москва, 2017. – Т. 2. – С. 47–52.
- 5 Клепча, О.С. Сравнение прямоточных и противоточных вихревых пылеуловителей / О.С. Клепча, А.В. Акулич, В.М. Лустенков // Техника и технология пищевых производств: тезисы докладов X Междунар. науч. конф. студентов и аспирантов, Могилев, 28–29 апреля 2016 г. / Могил. гос. ун-т продовольствия; редкол.: А.В. Акулич (отв. ред.) [и др.]. – Могилев, 2016. – 256 с.
- 6 Вихревой пылеуловитель: а.с. 1466795 СССР / Б.С. Сажин, Б.П. Лукачевский, А.В. Акулич, А.И. Буяров, П.В. Акулич, Н.И. Кикабидзе; Моск. текст ин-т. // Открытия. Изобретения. – 1989. – № 11. – С. 28.
- 7 Вихревой пылеуловитель: пат. 2112 Респ. Беларусь / А.В. Акулич, А.А. Полевич, П.В. Акулич, А.Г. Егоров; заявитель Могил. технол. ин-т. // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 1998 – № 2. – С. 107.
- 8 Устройство для выделения частиц из газового потока: пат. 3475 Респ. Беларусь / А.В. Акулич, Б.С.Сажин, П.В.Акулич, А.Г.Егоров; заявитель Могил.технол. ин-т. // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2000. – № 3. – С. 93–94.
- 9 Устройство для выделения частиц из газового потока: пат. 3476 Респ. Беларусь / А.В. Акулич, П.В.Акулич, А.Г. Егоров, В.Я. Ковалев; заявитель Могил.технол. ин-т. //Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2000. – № 3. – С. 94.

- 10 Акулич, А.В. Разработка группового прямооточного пылеуловителя на основе взаимодействующих закрученных потоков /А.В. Акулич, В.М. Лустенков, А.А. Акулич, К.С. Летун // Техника и технология пищевых производств: материалы XI Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 20–21 апреля 2017 г. / Могил. гос. ун-т продовольствия; редкол.: А.В. Акулич (отв. ред.) [и др.]. – Могилев, 2017. – С. 234.
- 11 Групповой вихревой пылеуловитель: пат. 8329 Рэсп. Беларусь / А.В. Акулич, К.В. Шушкевич; заявитель Могил. гос. ун-т продовольствия //Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці.– 2006. – № 4.– С. 56.
- 12 Батарейный вихревой пылеуловитель: пат. 17948 Рэсп. Беларусь /А.В. Акулич, К.В. Шушкевич, А.А. Акулич; заявитель Могил. гос. ун-т продовольствия // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2013. – № 4.– С. 63.
- 13 Способ очистки газа от твердых частиц: Евразийский патент 029246, В1 В01D 50/00 / А.В. Акулич, В.М. Лустенков, А.А. Акулич; заявитель Могил. гос. ун-т продовольствия. – № 201500461; заявл. 01.04.2015; выдан 28.02.2018.
- 14 Акулич, А.В. Исследование гидравлического сопротивления группового прямооточного пылеуловителя на основе взаимодействующих закрученных потоков / А.В. Акулич, В.М. Лустенков, А.А. Акулич, В.В. Барсуков // Технология пищевых продуктов и комбикормов: матер. Междунар. науч.-практ. конф., Одесса, 25–30 сентября 2017 г. / Одесская национальная академия пищевых технологий; редкол.: Б.В. Егоров (отв. ред.) [и др.]. – Одесса, 2017. – С. 24–25.
- 15 Акулич, А.В. Разработка группового прямооточного пылеуловителя и исследование его гидравлического сопротивления / А.В. Акулич, В.М. Лустенков, А.А. Акулич, В.В. Барсуков, М.В. Хурсин //Техника и технология пищевых производств: матер. XII Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 19–20 апреля 2018 г. /Могил. гос. ун-т продовольствия; редкол.: А.В. Акулич (отв. ред.) [и др.]. – Могилев, 2018. – С. 10–11.
- 16 Акулич, А.В. Исследование эффективности улавливания группового прямооточного пылеуловителя на основе взаимодействующих закрученных потоков/А.В. Акулич, В.М. Лустенков, В.М. Акулич, В.В. Барсуков, М.В. Хурсин // Образование, наука и производство в XXI веке: современные тенденции развития: материалы юбилейной междунар. конф., Могилев 3–4 ноября 2018 г. / М-во образования Респ. Беларусь, М-во образования и науки Рос. Федерации, Белорус.-Рос. ун-т; редкол.: И.С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2018. – С. 151–152.

*Поступила в редакцию 06.06.2018*