

621.9  
К 89

Учреждение образования  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ»

УДК 621.928.93

**Кузьмин Владислав Владимирович**

**ГИДРОДИНАМИКА ПОТОКОВ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОЧИСТКИ  
В ЦИКЛОННО-РОТОРНОМ ПЫЛЕУЛОВИТЕЛЕ**

05.17.08 – Процессы и аппараты химических технологий

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Минск 2005

Работа выполнена в Белорусском государственном технологическом университете на кафедре процессов и аппаратов химических производств.

Научный руководитель

доктор технических наук, профессор  
**Марков Владимир Алексеевич**,  
УО «Белорусский государственный  
технологический университет», кафедра  
процессов и аппаратов химических произ-  
водств

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор  
**Левданский Эдуард Игнатьевич**,  
УО «Белорусский государственный  
технологический университет», кафедра  
машин и аппаратов химических и сили-  
катных производств;

кандидат технических наук  
**Перминов Евгений Викторович**,  
УО «Белорусский государственный  
экономический университет», кафедра  
технологии важнейших отраслей про-  
мышленности

Оппонирующая организация

ОАО «Гродненский научно-исследова-  
тельский и проектный институт азот-  
ной промышленности и продуктов ор-  
ганического синтеза»

Защита состоится 26 мая 2005 г. в 14<sup>00</sup> часов на заседании Совета по защите диссертаций Д 02. 08. 02 при УО «Белорусский государственный технологический университет» (220050, г. Минск, ул. Свердлова, 13а) в аудитории 240 корп. 4. Тел.: (017) 226-00-39; факс: (017) 227-62-17.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке УО «Белорусский государственный технологический университет».

Автореферат разослан 21 апреля 2005 г.

Ученый секретарь  
совета по защите диссертаций  
доктор технических наук, профессор



В.А. Марков

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы диссертации.** Проблема очистки запыленных газовых потоков, выбрасываемых в атмосферу промышленными предприятиями, приобретает все более важное значение как в связи с ростом производства, так и с тенденцией к ужесточению требований охраны окружающей среды. В этой проблеме можно выделить две стороны: экологическую – очистка пылегазовых выбросов от вредных примесей и экономическую – улавливание ценных продуктов с целью их возврата и использования.

Для решения данной проблемы в промышленности используют различные виды пылеулавливающего оборудования: инерционного типа (жалюзийные, циклонные, вихревые), фильтры различных модификаций, мокрые пылеуловители и т.д. Наиболее широкое применение находят циклонные пылеуловители различных типов. Это обусловлено тем, что они просты в изготовлении, эксплуатации и обслуживании, имеют относительно невысокие эксплуатационные и капитальные затраты. В то же время, как показывает практика их эксплуатации, данные аппараты отличаются сравнительно высокой эффективностью улавливания мелкодисперсных пылей и имеют достаточно узкий диапазон эффективной работы.

В этой связи создание на их основе комбинированных циклонно-роторных пылеуловителей с более высокой эффективностью разделения в широком диапазоне расходов является важной и актуальной задачей.

**Связь работы с крупными научными программами, темами.** Исследования, выполненные по теме диссертации, проводились в рамках госбюджетных тем: «Разработка высокоэффективных аппаратов и машин для проведения химико-технологических процессов в гетерогенных системах» 1 Б 26 – 01 (2000 – 2005 г.г.), «Исследовать комбинированные способы интенсификации процессов теплообмена и разделения многофазных систем в полях массовых сил, разработать математические модели с алгоритмами по реализации их в инженерных расчетах» ГБ 24 – 044 (2000 – 2003 г.г.).

**Цель и задачи исследования.** Целью настоящей работы является разработка высокоэффективного комбинированного циклонно-роторного пылеуловителя, обладающего более высокой эффективностью улавливания дисперсной фазы по сравнению с обычными циклонами и лучшими эксплуатационными характеристиками.

Для достижения поставленной цели решались следующие основные задачи:

1. На основе аналитического обзора имеющихся публикаций, анализа работы известных пылеуловителей и механизма разделения фаз определить подходы к созданию перспективных конструкций циклонно-роторных пылеуловителей.

2. Разработать новые конструкции, провести их сравнительные исследования по эффективности разделения фаз и определить оптимальный вариант циклонно-роторного пылеуловителя, обеспечивающего более высокую степень очистки газового потока от пыли.

693а/

ИЗДАТЕЛЬСТВО  
Уральского государственного  
университета

3. Путем экспериментальных и теоретических исследований изучить структуру и особенности движения газового потока в пылеуловителе, математически описать процесс сепарации твердых частиц в аппарате и разработать алгоритмы решения полученных уравнений

4. По результатам исследований получить зависимости для инженерного расчета эффективности разделения фаз и энергозатрат, провести полупромышленные испытания и разработать методику расчета с рекомендациями по проектированию и эксплуатации разработанного циклонно-роторного пылеуловителя.

**Объект и предмет исследования.** Объект исследования – процесс центробежного разделения газодисперсных потоков и новые конструкции циклонно-роторных пылеуловителей. Предмет исследования – механизм разделения фаз, эффективность пылеулавливания, энергозатраты на проведение процесса и оптимизация конструкции.

**Методология и методы проведенного исследования.** В работе использовались инструменты и оборудование, соответствующие государственным стандартам, а также созданные на их базе экспериментальные установки. Использовался комплекс известных методов и стандартных методик, соответствующих приборов для измерения и контроля исследуемых параметров, техническое и программное обеспечение ПК.

**Научная новизна и значимость полученных результатов.** Впервые выполнены комплексные теоретические и экспериментальные исследования механизма разделения фаз в сепарационном объеме пылеуловителя с комбинированным циклонно-роторным способом закручивания потока. В результате исследований:

- изучена структура закрученного сочетанием статического и роторного способов газового потока;

- на основе анализа циклонного и ротационного механизмов сепарации определены подходы к проектированию аппаратов с комбинированным циклонно-роторным способом разделения фаз;

- показано, что общие удельные энергозатраты на процесс разделения с одинаковой эффективностью при комбинированном циклонно-роторном способе закручивания газового потока ниже, чем при циклонном и при определенном соотношении режимных параметров принимают минимальное значение;

- предложен новый способ утилизации энергии выходящего из центробежного пылеуловителя закрученного потока тягодутьевым устройством центробежного типа и показана возможность повышения эффективности сепарации путем роторного способа организации встречного закрученного потока в циклонных и вихревых пылеуловителях;

- математически описано движение частиц пыли в сепарационном объеме пылеуловителя и разработан алгоритм решения системы дифференциальных уравнений;

– рассмотрен механизм процесса разделения фаз в объеме циклонно-роторного пылеуловителя, получены новые экспериментальные результаты, эмпирические и аналитические зависимости для расчета эффективности сепарации и гидравлического сопротивления разработанной конструкции;

– предложена, с учетом проведенной статистической обработки микрорентгоснимков дисперсного состава сепарируемых твердых частиц, методика расчета циклонно-роторного пылеуловителя, а также рекомендации по проектированию и эксплуатации аппарата.

**Практическая значимость полученных результатов.** На основе теоретических и экспериментальных исследований разработана новая конструкция циклонно-роторного пылеуловителя, обладающая по сравнению с противочисными циклонами более высокой степенью очистки запыленных газовых потоков в широком диапазоне изменения их расходов при низких удельных энергозатратах, что позволяет использовать пылеуловитель для очистки переменных по расходу и низконапорных газовых потоков, а также для улавливания абразивных пылей. Определены рациональные соотношения режимных и конструктивных параметров, установлен энергетически оптимальный диапазон работы, предложена методика инженерного расчета пылеуловителя и рекомендации по его проектированию и эксплуатации в промышленных условиях.

Полупромышленный образец циклонно-роторного пылеуловителя использован для отделения мелкодисперсной пыли лекарственных препаратов от газового потока, выходящего из сушилки кипящего слоя, на РУП «Белмедпрепараты». Эффективность улавливания по сравнению с использовавшимся ранее безосадоочным фильтром мокрой очистки повысилась примерно на 12%, выделение пыли в сухом виде обеспечило возможность ее дальнейшего использования.

#### **Основные положения диссертации, выносимые на защиту:**

1. Подходы к проектированию и разработанные конструкции циклонно-роторных пылеуловителей.

2. Результаты экспериментальных исследований эффективности и гидродинамики новой конструкции циклонно-роторного пылеуловителя, а также способ снижения энергозатрат на проведение процесса центробежной сепарации путем утилизации энергии закрученного потока.

3. Математическое описание процессов отделения взвешенных частиц и взаимодействия ротора с закрученным потоком в сепарационном объеме циклонно-роторного пылеуловителя, экспериментальные и аналитические зависимости для определения эффективности и гидравлического сопротивления, а также разработанные по результатам исследований методика расчета пылеуловителя и рекомендации по его проектированию и эксплуатации в промышленных условиях.

**Апробация результатов диссертации.** Результаты исследований докладывались на следующих конференциях:

Международная научно-техническая конференция «Новые технологии в химической промышленности». – Минск, 2002.

Международная научно-техническая конференция «Техника и технология защиты окружающей среды». – Минск, 2002.

Международная Интернет-конференция «Технологические комплексы, оборудование предприятий строительных материалов и стройиндустрии». – Белгород, 2003.

**Опубликованность результатов.** Основные результаты диссертационной работы изложены в 7 научных статьях, 3 тезисах докладов на конференциях. Оформлено 7 заявок на получение патента РБ.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения и приложений, содержит 59 иллюстраций и 1 таблицу. Список использованных источников имеет 153 наименования. Полный объем – 157 страниц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе приведены конструкции основных типов центробежных пылеуловителей (циклонов, вихревых, ротационных пылеуловителей), выполнен анализ их достоинств и недостатков.

Проанализированы пути повышения эффективности циклонных пылеуловителей и выявлено, что одним из наиболее эффективных способов повышения эксплуатационных характеристик циклонов является совмещение циклонного и роторного способов сепарации в одном аппарате.

На основании анализа циклонного процесса и существующих конструкций ротационных и циклонно-роторных пылеуловителей сформулированы следующие подходы к конструированию аппаратов такого типа:

- наиболее предпочтительным является использование прямоточных и осевых типов ротационных пылеуловителей, как более компактных и обладающих невысоким гидравлическим сопротивлением;

- снабжение ротора приводом позволит поддерживать необходимый уровень крутки независимо от изменений расхода и регулировать параметры работы аппарата;

- установка ротора целесообразна на выходе газового потока из циклонного пылеуловителя, после отделения основной массы пыли, что существенно уменьшит абразивный износ рабочих поверхностей ротора;

- энергию вращательного движения приосевого циклонного вихря необходимо использовать для дополнительной сепарации частиц и уменьшения энергозатрат на привод ротора;

- отвод пылегазового потока из ротационной ступени производить непосредственно к стенке циклона и далее в виде встречного спутнозакрученного потока, способствуя повышению эффективности улавливания мелкодисперсных частиц;

- использовать ротор для уменьшения или устранения процессов, негативно влияющих на эффективность очистки в циклонных пылеуловителях (радиальный сток и вторичная циркуляция, унос отсенарированных частиц).

**Вторая глава** посвящена разработке и экспериментальному исследованию новой конструкции циклонно-роторного пылеуловителя.

С учетом сформулированных выше подходов к конструированию циклонно-роторных пылеуловителей предложено несколько новых вариантов этих аппаратов, схематично представленных на рис. 1.

На основе предварительных исследований выбран оптимальный вариант пылеуловителя (рис. 1з), на прозрачной модели которого диаметром  $D = 0,24$  м проведены комплексные экспериментальные исследования гидродинамики, влияния режимных и конструктивных параметров: среднерасходной скорости газового потока  $w = 1,25 \div 5,5$  м/с, числа оборотов ротора  $n = 10 \div 50$  об/с, диаметра выходного отверстия  $D_{\text{вых}} = (0,46 \div 0,83)D$  и наружной части ротора  $d_p = (0,7 \div 0,92)D$ , расстояния между верхней плоскостью ротора и крышкой циклона  $s = (0,004 \div 0,06)D$ , диаметра цилиндрической вставки по оси ротора  $d_{\text{вст}} = (0,2 \div 0,5)D$ , угла наклона лопаток к оси аппарата, высоты расположения ротора относительно входного патрубка  $h_p = (0,14 \div 0,46)D$  на эффективность очистки и гидравлическое сопротивление. Кроме того, исследованы затраты энергии на привод ротора и общие удельные энергозатраты на очистку газового потока.

Исследование распределения полей скоростей в сепарационном объеме циклонно-роторного пылеуловителя (рис. 2) при различных режимах его работы позволило проследить следующие особенности движения газового потока в таком пылеуловителе.

Величины тангенциальной и полной скоростей зависят от режима работы пылеуловителя, повышаясь совместно с увеличением  $n$  и  $w$ . Наиболее существенные различия по сравнению с гидродинамикой обычного циклона наблюдаются в верхней части пылеуловителя, вблизи самого ротора. В циклонах, как известно, максимум тангенциальной скорости  $w_t$  расположен от оси аппарата на расстоянии, примерно равном радиусу выходного отверстия ( $R_{\text{вых}}$ ). В исследуемом пылеуловителе положение максимума  $w_t$  изменяется по высоте корпуса, располагаясь в его верхней части непосредственно у стенки аппарата (рис. 2, сечение 1). С удалением от ротора максимальное значение  $w_t$  смещается к оси пылеуловителя, и в самом нижнем сечении цилиндрической части корпуса располагается на расстоянии примерно  $0,9R_{\text{вых}}$ . Характер распределения скоростей при этом приблизительно соответствует циклонному (рис. 2, сечение 4). Увеличение  $w$  также приводит к смещению максимума тангенциальной скорости к оси аппарата (рис. 2з).

Небольшие восходящие токи, наблюдающиеся вдоль стенки верхней части сепарационного объема циклона (так называемый вторичный или наррный вихрь), приводят, как известно, к выносу пылевых частиц через выхлопную трубу. В исследуемом пылеуловителе распределение осевых скоростей носит своеобразный характер. Смещаемая ротором к периферии аппарата наружная часть приосевого восходящего вихря (вместе с неотсепарированными ранее частицами) образует нисходящий, пристенный закрученный поток, препятствуя формированию вторичных токов и повышая общую эффективность сепарации.

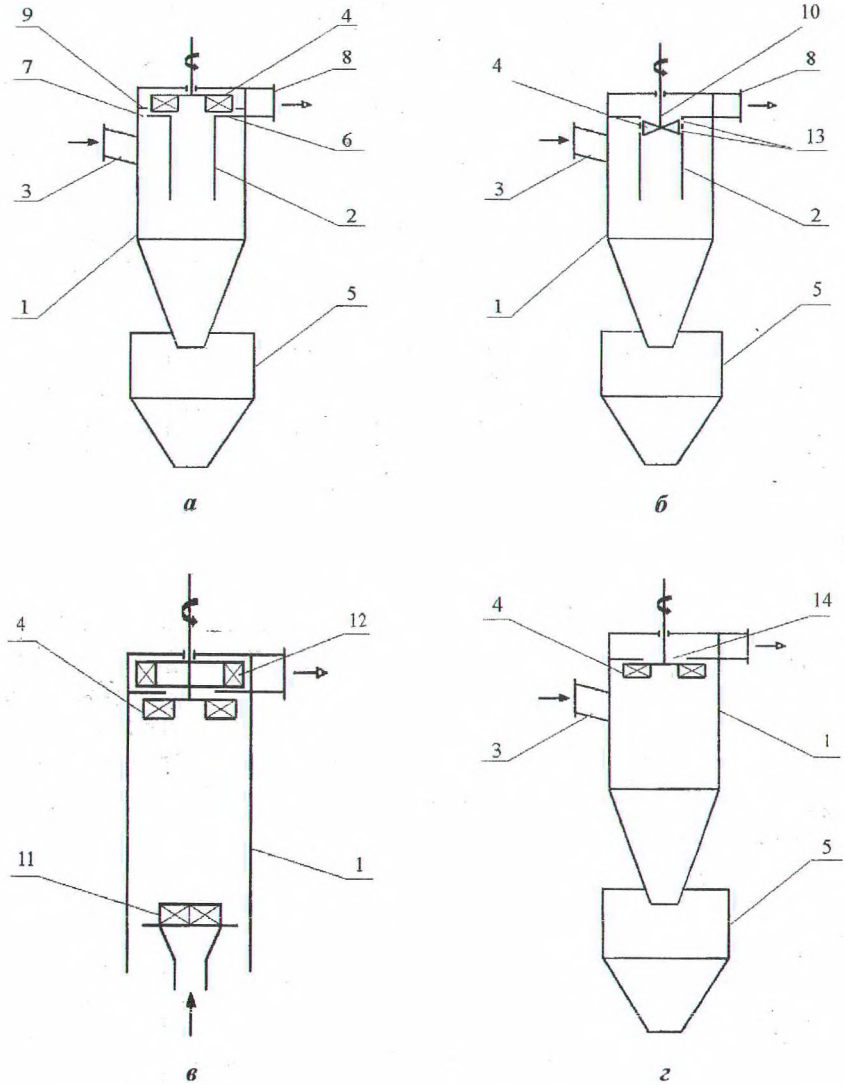


Рис. 1 Конструкции циклонно-роторных пылеуловителей: *а* – с прямоточным роторным пылеуловителем; *б* – с роторным пылеуловителем осевого типа; *в* – с нижней подачей газового потока (роторно-вихревой пылеуловитель); *г* – с прямоточно-осевым роторным пылеуловителем, без выхлопной трубы. 1 – цилиндроконический корпус; 2 – осевая выхлопная труба; 3 – тангенциальный входной патрубок; 4 – лопастной ротор; 5 – бункер для сбора пыли; 6 – крышка; 7 – перепускное отверстие; 8 – улитка; 9 – кольцо; 10 – вал; 11 – входной патрубок со статическим закручивателем; 12 – вентилятор; 13 – щелевые прорезы выполненные, например, по винтовой линии; 14 – выходное отверстие.



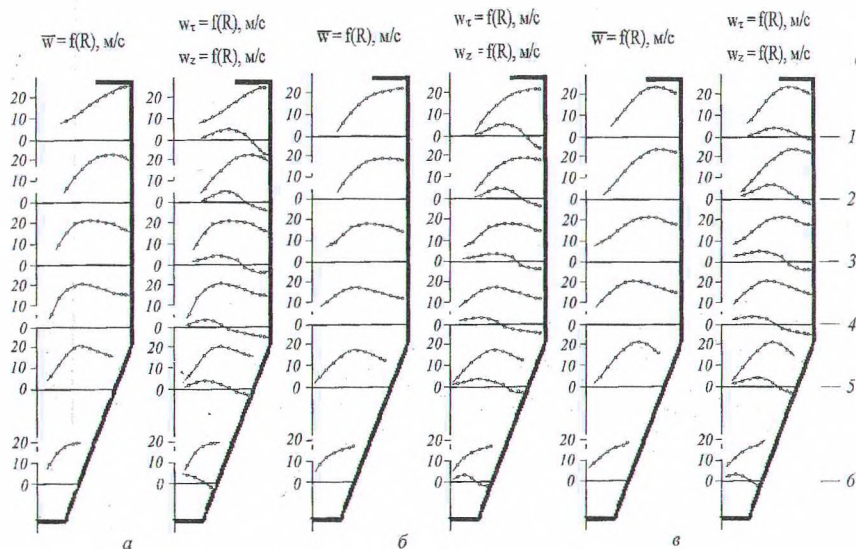


Рис. 2. Распределение полной скорости и ее составляющих в ряде сечений по высоте пылеуловителя при различных режимах его работы: (а) —  $n = 50$  об/с,  $w = 2$  м/с; (б) —  $n = 40$  об/с,  $w = 2$  м/с; (в) —  $n = 40$  об/с,  $w = 3,5$  м/с.

Установлено также, что значения нисходящих скоростей в верхней части пылеуловителя зависят от режима его работы, увеличиваясь с ростом  $n$  и уменьшением  $w$  (рис. 2). Повышение этих скоростей положительно скажется на эффективности очистки, что связано, очевидно, с увеличением доли газового потока, направляющегося на рециркуляцию, а также с более интенсивным движением отсепарированных частиц в нижнюю часть аппарата, к бункеру.

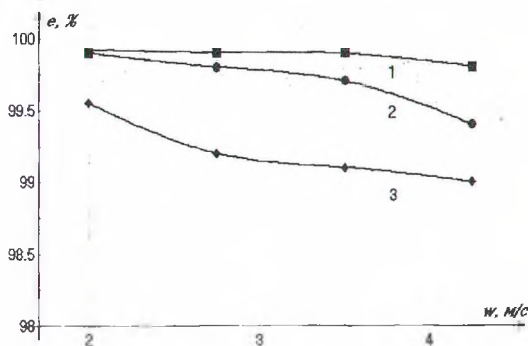


Рис. 3. Эффективность очистки для различных видов пыли (1 — содовая,  $d_{cp} \approx 40$  мкм; 2 — мушная,  $d_{cp} \approx 24$  мкм; 3 — кварцевая,  $d_{cp} \approx 14$  мкм).

Выявлено (рис. 3, 4), что эффективность циклонно-роторного пылеуловителя, в отличие от традиционных циклонов, повышается при снижении среднерасходной скорости потока в аппарате. Такое явление, наблюдавшееся для всех исследованных видов пыли различной плотности и дисперсного состава (содовая,  $d_{cp} \approx 40$  мкм; мушная,  $d_{cp} \approx 24$  мкм; кварцевая,  $d_{cp} \approx 11 \div 120$  мкм),

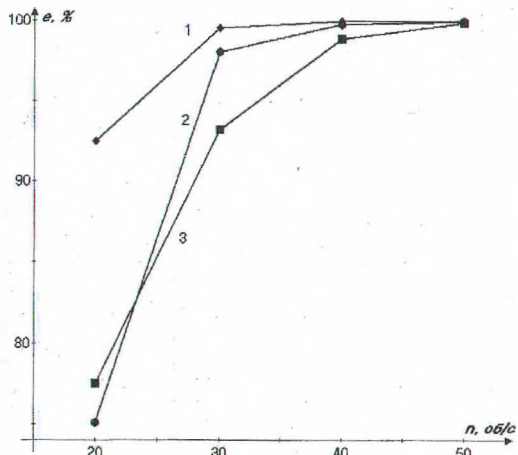


Рис. 4. Зависимость эффективности циклонороторного пылеуловителя от частоты вращения ротора  $n$  и среднерасходной скорости на сечение: 1 —  $w = 2,75$  м/с; 2 —  $w = 3,5$  м/с; 3 —  $w = 4,25$  м/с.

На рис. 5. представлены зависимости потерь давления  $\Delta P$  от среднерасходной скорости газового потока в аппарате и частоты вращения ротора, откуда видно, что сопротивление пылеуловителя  $\Delta P$ , зависящее как от  $w$ , так и от  $n$ , несколько снизилось по сравнению с циклоном обычной конструкции.

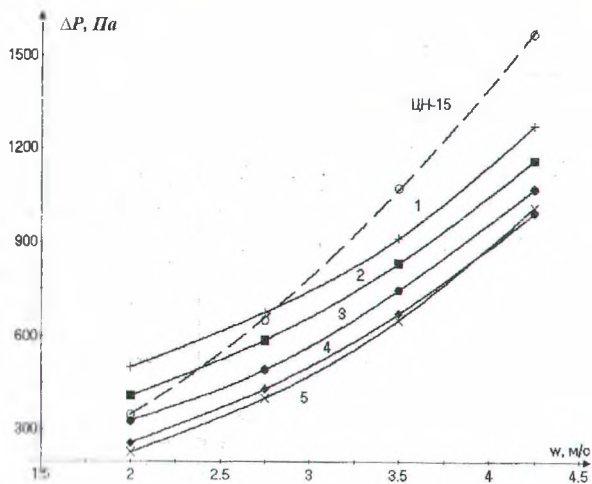


Рис. 5. Зависимость  $\Delta P$  от  $w$  при разных значениях  $n$  (1) — 48 об/с; (2) — 40 об/с; (3) — 30 об/с; (4) — 20 об/с; (5) — 10 об/с.

объясняется как увеличением эффективности сепарации самим ротором (в качестве ротационного пылеуловителя осевого типа), так и создаваемым им подкручивающим эффектом, компенсирующим снижение тангенциальных скоростей в корпусе аппарата (уменьшение расхода в данном случае приводит к более длительному нахождению пылегазового потока в аппарате, и, следовательно, к повышению эффективности пылеулавливания).

Увеличение частоты вращения ротора также способствует повышению значений  $e$  (рис. 4).

Вместе с тем с повышением частоты вращения ротора общее гидравлическое сопротивление пылеуловителя увеличивается, причем зависимость  $\Delta P$  для каждого значения  $n$  можно аппроксимировать следующим выражением:

$$\Delta P = \Delta P^* + k w^c, \quad (1)$$

где  $\Delta P^*$  — постоянная при данном числе оборотов ротора величина,

описываемая уравнением типа:

$$\Delta P^* = \epsilon \cdot n^2, \quad (2)$$

где значение  $\epsilon$  для разных  $n$  лежит в диапазоне  $0,11 \div 0,12$ ;  $k$  и  $c$  – постоянные коэффициенты, опытные значения которых изменялись соответственно от 49,2 и 2,07 при  $n = 10$  об/с до 54,7 и 1,98 при  $n = 48$  об/с.

Величина потребляемой приводным электродвигателем ротора мощности  $N$ , как и гидравлическое сопротивление пылеуловителя, существенно зависела от значений  $n$  и  $w$ , однако увеличение среднерасходной скорости газового потока в аппарате приводило к снижению  $N$ .

Суммарные удельные энергозатраты  $N'$  (в кВт на  $1000 \text{ м}^3$  очищаемого газа) на проведение процесса сепарации в циклонно-роторном пылеуловителе (рис. 6) определялись с учетом его гидравлического сопротивления  $\Delta P$  и затрат мощности на вращение ротора  $N^*$  по формуле:

$$N' = \Delta P^* + N^*; \quad (3)$$

где  $\Delta P^*$  – удельные энергозатраты на прохождение через пылеуловитель газового потока, определенные по величине полезной мощности,  $\text{кВт} \cdot \text{ч} / 1000 \text{ м}^3$  очищаемого газа:

$$\Delta P^* = \Delta P \cdot Q / 1000 \cdot Q^*, \quad (4)$$

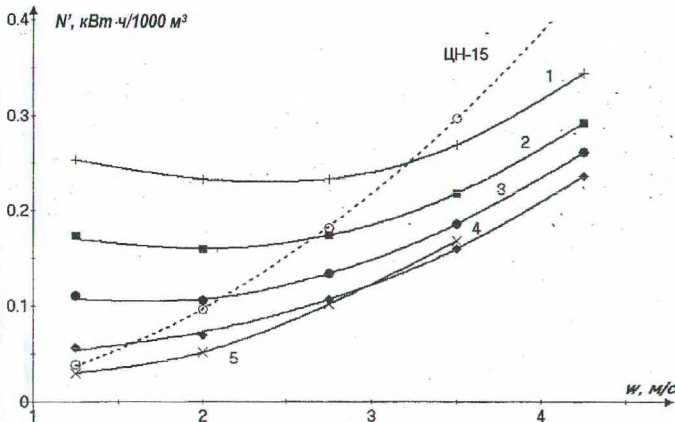


Рис. 6. Зависимость суммарных удельных энергозатрат  $N'$ ,  $\text{кВт} \cdot \text{ч} / 1000 \text{ м}^3$  газа, от средней скорости  $w$  и частоты вращения ротора  $n$ : (1) – 48 об/с; (2) – 40 об/с; (3) – 30 об/с; (4) – 20 об/с; (5) – 10 об/с.

где  $\Delta P$  – гидравлическое сопротивление циклонно-роторного пылеуловителя, Па;

$Q$  – расход газового потока,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;

$Q^*$  – объем газа, проходящего через пылеуловитель за один час, в тысячах  $\text{м}^3/\text{ч}$ ;

$N^*$  – удельные энергозатраты на привод ротора,  $\text{кВт}\cdot\text{ч}/1000 \text{ м}^3$  очищаемого газа:

$$N^* = N / 1000 Q^*, \quad (5)$$

При высоких значениях расхода газа величина суммарных удельных энергозатрат для циклонно-роторного пылеуловителя оказалась ниже, чем для стандартного ЦН-15, на базе которого был выполнен пылеуловитель (рис. 6). С уменьшением  $w$ , когда затраты мощности на подкручивание газового потока ротором возрастают,  $N'$  снижается менее интенсивно, чем в обычном циклоне. В то же время в обычном циклоне фактор разделения, как и  $N'$ , определяются квадратом средней скорости, поэтому ее снижение сопровождается и соответствующим ухудшением эффективности очистки. В циклонно-роторном пылеуловителе, где необходимый уровень крутки потока поддерживается с помощью ротора, снижение расхода газа приводит лишь к более длительному нахождению взвешенных частиц в поле сепарирующих сил и, соответственно, повышению эффективности разделения.

В области номинальных для циклона расходов газового потока (при  $w = 3,5 \text{ м/с}$ ) величина  $N'$  для циклонно-роторного пылеуловителя не превышает удельных затрат в обычном циклоне (рис. 6) при более высокой степени очистки. Данный факт свидетельствует о более рациональной, с точки зрения эффективности использования энергии, организации сепарационного процесса в таком пылеуловителе.

Аппроксимация зависимостей  $N'$  от  $w$  показала наличие минимумов данной функции (рис. 7), причем значение  $N'_{\min}$  и соответствующей ему величины среднерасходной скорости определялись частотой вращения ротора.

Дополнительно снизить энергозатраты при центробежном разделении возможно путем установки перемещающего устройства центробежного типа непосредственно на выходе из сепаратора закрученного потока (рис. 1а). Поскольку в таких устройствах передача энергии потоку

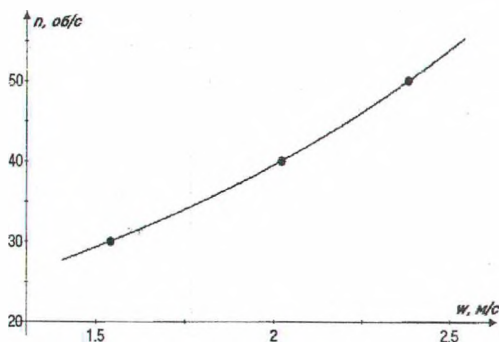


Рис. 7. Соотношение частоты вращения ротора и среднерасходной скорости при минимальных значениях  $N'$

осуществляется посредством его закручивания, то поступление в них уже вращающегося потока должна способствовать уменьшению потребляемой ими мощности.

Согласно теории центробежных машин величина удельной работы, затрачиваемой теоретически центробежным вентилятором на закручивание потока, определяется следующим образом:

$$L_{T\infty} = u_2 c_{2u} - u_1 c_{1u}, \quad (6)$$

где  $u_2$  и  $u_1$  — окружные скорости газового потока соответственно на выходе из рабочего колеса и на входе в него;

$c_{2u}$  и  $c_{1u}$  — тангенциальные составляющие абсолютной скорости газового потока на выходе и входе в рабочее колесо.

В свою очередь для вентилятора, установленного, например, на выходе закрученного потока из циклона можно записать:

$$L_{T\infty} = u_2 c_{2u} - u_1 w_{T \text{ вых}}, \quad (7)$$

где  $w_{T \text{ вых}}$  — тангенциальная скорость газа на выходе из циклона, а произведение  $u_1 w_{T \text{ вых}}$  представляет собой удельную энергию крутки, заключенную в выходящем из циклона потоке, и, соответственно, теряемую вместе с ним.

С целью проверки изложенного было проведено исследование влияния места установки вентилятора (до циклона и непосредственно на выходе из него) на потребляемую им мощность. Проведенные эксперименты показали, что при одинаковых значениях  $n$  и  $w$  потребление мощности вентилятором, установленным непосредственно на выходе из циклона, снижается (рис. 8). В диапазоне расходов, близких к оптимальным для циклона ЦН-15 (при  $w = 3 \div 4$  м/с), снижение энергопотребления составило в среднем  $15 \div 20\%$ .

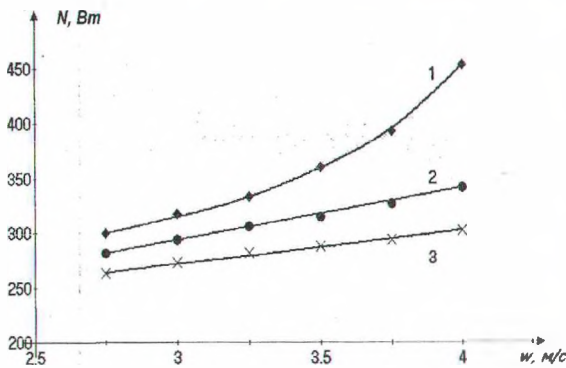


Рис. 8. Зависимость потребляемой вентилятором мощности  $N$  от среднерасходной скорости в циклоне  $w$  при установке вентилятора: 1 — перед циклоном, 2 и 3 — непосредственно на выходе из циклона (соответственно с выхлопной трубой и без нее) (при  $n = 48$  об/с).

Выполненные с помощью электронного микроскопа фотографии пыли, сепарируемой в циклонно-роторном пылеуловителе, позволили провести статистическую обработку результатов измерений ее дисперсного состава и получить данные для определения фракционной эффективности пылеуловителя.

В третьей главе приведено теоретическое описание процесса сепарации взвешенных частиц в закрученном потоке циклонно-роторного пылеуловителя.

Полученное экспериментально распределение скоростей в сепарационном объеме циклонно-роторного пылеуловителя в некотором приближении позволило рассчитать траектории движения частиц в закрученном потоке и выполнить анализ влияния различных факторов на эффективность сепарации.

При расчетах сделаны следующие допущения: на частицу действуют основные обобщенные силы – сила гидродинамического воздействия со стороны газового потока и сила тяжести, при движении частица не испытывает влияния других частиц и имеет сферическую форму.

На основании уравнения Лагранжа 2 рода, с учетом принятых допущений получена следующая система дифференциальных уравнений, описывающая движение частиц в закрученном потоке:

$$\begin{cases} \frac{d^2 r}{dt^2} = \psi \cdot k \left( w_r - \frac{dr}{dt} \right) \cdot |\vec{v}| + r \left( \frac{d\varphi}{dt} \right)^2 \\ r \frac{d^2 \varphi}{dt^2} = \psi \cdot k \left( w_r - \frac{d\varphi}{dt} \right) \cdot |\vec{v}| - \frac{dr}{dt} \cdot \frac{d\varphi}{dt} \\ \frac{d^2 z}{dt^2} = \psi \cdot k \left( w_z - \frac{dz}{dt} \right) \cdot |\vec{v}| - g \end{cases} \quad (8)$$

где  $\psi$  – коэффициент аэродинамического сопротивления, определяемый в зависимости от режима движения частиц;

$$k = \frac{3}{4} \cdot \frac{\rho d}{\rho_q};$$

$d$  – диаметр частицы, м;

$\rho$  – плотность среды, кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_q$  – плотность частиц, кг/м<sup>3</sup>;

$w_r, w_r, w_z$  – соответственно радиальная, тангенциальная и осевая составляющие скорости газа, м/с;

$g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$|\vec{v}|$  – абсолютное значение скорости, м/с, равное:

$$|\vec{v}| = \sqrt{\left( w_r - \frac{dr}{dt} \right)^2 + \left( w_r - \frac{d\varphi}{dt} r \right)^2 + \left( w_z - \frac{dz}{dt} \right)^2} \quad (9)$$

Для решения системы (8) был применен численный метод Рунге-Кутты. С помощью ЭВМ произведен расчет движения взвешенных частиц различного размера и плотности, получены траектории их движения (рис. 9).

Выполненный аналитический расчет позволил проследить следующие закономерности процесса сепарации в циклонно-роторном пылеуловителе. Наличие вдоль стенки пылеуловителя обратного потока, формируемого ротором из наружных слоев приосевого, покидающего пылеуловитель, способствует дополнительному отделению мелких частиц, неотсепарированных в основном объеме.

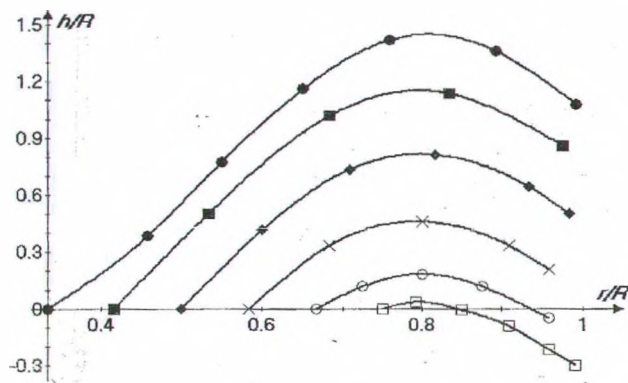


Рис. 9 Траектории движения частицы в верхней части сепарационного объема циклонно-роторного пылеуловителя при различном начальном радиусе ее расположения ( $d_v = 10$  мкм,  $\rho_v = 1000$  кг/м<sup>3</sup>).

Повышение частоты вращения ротора улучшает процесс осаждения пыли в циклонно-роторном пылеуловителе вследствие увеличения тангенциальных скоростей потока вблизи ротора. Кроме того, увеличивается объем газа, перемещаемого ротором к его периферии, что, при неизменном общем расходе через аппарат, приводит к увеличению периферийного потока и, соответственно, общей эффективности улавливания.

Радиус, на котором происходит изменение направления осевой скорости частиц, определяется не только величиной обратного потока, но также начальным положением, размером и плотностью частицы. Обладающие большей инерционностью частицы в меньшей степени подвержены влиянию гидродинамического воздействия со стороны газа. Что касается влияния плотности и размера частиц на эффективность улавливания, то, как и в обычных циклонах, с их увеличением эффективность возрастает.

Аналитически получено следующее выражение для определения граничного размера частиц  $d_{sp}$ , улавливаемых в циклонно-роторном пылеуловителе:

$$d_{sp} = \sqrt{\frac{4,5w_{fl}D^2}{\rho_v w_{sp}^2 (2H_u + H_w)}} \quad (10)$$

Вычисленное с помощью данного выражения значение  $d_{ap}$  (которое соответствует параметру  $d_{50}$ , используемому при расчете общей эффективности очистки), согласуется со значением, полученным опытным путем при определении фракционной эффективности пылеуловителя.

При рассмотрении механизма взаимодействия ротора с закрученным потоком в циклонно-роторном пылеуловителе получено следующее выражение для расчета его гидравлического сопротивления:

$$\Delta P = \alpha (\pi d_p n)^2 - \{(\beta \alpha)^2 + \zeta\} w^2 \quad (11)$$

и проанализировано влияние на  $\Delta P$  отдельных конструктивных параметров ротора.

В четвертой главе приведена методика инженерного расчета циклонно-роторного пылеуловителя.

Основными эксплуатационными параметрами пылеуловителей, подлежащими расчету, являются эффективность очистки и величина гидравлического сопротивления при оптимальных технико-экономических условиях эксплуатации. В качестве критерия оптимальности этих условий целесообразно принять значение общих удельных энергозатрат на проведение сепарационного процесса, показывающих эффективность использования энергии в данном пылеуловителе.

Как показали проведенные исследования, в разработанной конструкции циклонно-роторного пылеуловителя величина общих удельных энергозатрат является функцией частоты вращения ротора и среднерасходной скорости газового потока (рис. 6 – 7) и при определенном соотношении этих параметров принимает минимальное значение. С точки зрения минимизации затрат энергии на очистку необходимо придерживаться именно этих соотношений в качестве оптимальных режимов работы пылеуловителя.

Эффективность сепарации для пыли с логнормальным законом распределения (встречающемся в подавляющем большинстве случаев) может быть определена с помощью табулированной функции  $\Phi(\chi)$  по следующему выражению:

$$e = \frac{1}{2} \cdot (\Phi(\chi) + 1) \quad (12)$$

где 
$$\chi = \frac{\lg\left(\frac{d_m}{d_{50}}\right)}{\sqrt{\lg^2 \sigma_n + \lg^2 \sigma_\varphi}}$$



где  $d_m$  и  $\sigma_c$  - медианный размер частиц пыли и среднеквадратичное отклонение в функции распределения частиц по размеру;

$d_{50}$  и  $\sigma_m$  - соответственно диаметр частиц, улавливаемых на 50% и среднеквадратичное отклонение в функции зависимости фракционной эффективности очистки от размера частиц.

Параметры  $d_{50}$  и  $\sigma_m$  для оптимального режима работы пылеуловителя были получены экспериментально при определении фракционной эффективности пылеуловителя.

Гидравлическое сопротивление пылеуловителя может быть определено по экспериментальной (1) или эмпирической (11) зависимостям. Выражения для определения мощности  $N$ , потребляемой ротором, также получены в виде эмпирических зависимостей, учитывающих основные режимные и геометрические параметры.

Определены рациональные соотношения геометрических параметров циклонно-роторного пылеуловителя, с учетом которых изготовлен опытно-промышленный образец аппарата, использованный для отделения пыли лекарственных препаратов от газового потока на РУП «Белмедпрепараты». Эффективность улавливания, по сравнению с использовавшимся ранее аппаратом мокрой очистки повысилась примерно на 12%, выделение пыли в сухом виде обеспечило возможность ее дальнейшего использования.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Рассмотрены конструкции основных типов центробежных пылеуловителей (циклонов, вихревых, ротационных пылеуловителей) и выполнен анализ их достоинств и недостатков, в результате чего установлено, что одним из перспективных способов повышения эксплуатационных характеристик циклонов является совмещение циклонного и роторного способов сепарации в одном аппарате (циклонно-роторном пылеуловителе) [1, 2]. Сформулированы основные подходы к конструированию таких комбинированных сепараторов.

2. Предложены роторный способ организации встречного закрученного потока в циклонных и вихревых пылеуловителях, а также способ снижения энергозатрат при центробежном разделении путем установки перемещающего устройства центробежного типа непосредственно на выходе закрученного потока [3, 6].

3. Разработаны различные конструкции циклонно-роторных пылеуловителей [11-14], путем сравнительных исследований [2, 6, 8, 9] выбран оптимальный вариант и выполнено исследование распределения скоростей в сепарационном объеме, показаны преимущества его гидродинамики перед обычными противоточными циклонами.

4. Проведено экспериментальное исследование влияния режимных и конструктивных параметров на основные характеристики циклонно-

роторного пылеуловителя: степень очистки, гидравлическое сопротивление, затраты мощности на привод ротора [2, 3, 5, 6]. Определены общие удельные энергозатраты на проведение процесса очистки в циклонно-роторном пылеуловителе [5]. Показано, что при одинаковой эффективности процесса данный показатель ниже, чем у обычных циклонов и при определенном режиме работы пылеуловителя принимает минимальное значение. Размещение ротора непосредственно на валу вытяжного вентилятора, помимо компактности, дает возможность дополнительного снижения энергозатрат.

5. Теоретически описано движение взвешенных частиц в закрученном потоке. На основе численного решения системы дифференциальных уравнений и с учетом экспериментально полученного распределения скоростей рассчитано движение частиц в сепарационном объеме циклонно-роторного пылеуловителя [7]. Выполнен анализ влияния различных факторов на процесс отделения частиц и получены аналитические и экспериментальные зависимости для определения основных параметров пылеуловителя (эффективности, гидравлического сопротивления, затрат мощности на привод ротора).

6. Обоснован оптимальный режим работы и разработана методика инженерного расчета циклонно-роторного пылеуловителя. Разработан полупромышленный образец пылеуловителя, который использован для выделения мелкодисперсной пыли лекарственных препаратов из газового потока на РУП «Белмедпрепараты», где показал высокую эффективность улавливания.

## ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

$w$  – средняя скорость на сечение, м/с;  $n$  – частота вращения ротора, об/с;  $d_{cp}$  – средний размер частиц пыли, определенный по ее удельной поверхности, мкм;  $\rho_v$  – плотность частиц, кг/м<sup>3</sup>;  $e$  – эффективность очистки, %;  $\Delta P$  – гидравлическое сопротивление, Па;  $N$  – затраты мощности на привод ротора, Вт;  $N'$  – суммарные удельные энергозатраты, кВт на 1000 м<sup>3</sup>/ч очищаемого газа;  $w$  – полная локальная скорость газового потока, м/с;  $w_t$  – тангенциальная составляющая скорости газового потока, м/с;  $w_z$  – осевая составляющая скорости газового потока, м/с;  $\mu$  – коэффициент динамической вязкости, Па·с;  $R$  – радиус цилиндрической части корпуса циклонно-роторного пылеуловителя, м;  $r$  – текущий радиус, м;  $h$  – осевое перемещение, м;  $w_{tgp}$  – тангенциальная скорость газового потока на границе приосевого вихря, м/с;  $H_y, H_k$  – соответственно высота цилиндрической и конической частей корпуса циклонно-роторного пылеуловителя, м;  $d_p$  – диаметр ротора, м;  $\alpha = \mu_r \mu_{топ} \rho$ ;  $\mu_r$  и  $\mu_{топ}$  – коэффициенты, учитывающие соответственно потери давления внутри межлопастных каналов и конечное число лопаток ротора;  $\rho$  – плотность газа, кг/м<sup>3</sup>;  $\beta$  – коэффициент, зависящий от геометрии циклонного аппарата и относительного радиуса расположения рассматриваемой точки потока;  $\zeta$  – коэффициент гидравлического сопротивления.

## СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Кузьмин В. В., Марков В. А. Пути повышения эффективности циклонных пылеуловителей // Труды БГТУ. Сер. химии и технологии неорганической химии. 2003. Вып. XI. – С. 172-176.
2. Кузьмин В. В., Марков В. А. Разработка и исследование циклонно-роторного пылеуловителя // Труды БГТУ. Сер. химии и технологии неорганической химии. 2003. Вып. XI. – С. 167-171.
3. Кузьмин В. В., Марков В. А. Использование комбинированной схемы закручивания пылегазового потока в циклонном пылеуловителе // Химическая промышленность. Т. 80, № 8, 2003. – С. 12-14.
4. Кузьмин В. В., Марков В. А. Исследование аэродинамики циклонно-роторного пылеуловителя // Химическая промышленность. Т. 81, № 3, 2004. – С. 116-118.
5. Кузьмин В. В. Энергоэффективность применения ротора в циклонном пылеуловителе // Энергетика – Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. № 5, 2004. – С. 79-82.
6. Кузьмин В. В., Марков В. А. Роторно-вихревые пылеуловители // Экология и промышленность России. № 12, 2004. – С. 12-13.
7. Марков В. А., Кузьмин В. В. Расчет движения частиц в сепарационном объеме циклонно-роторного пылеуловителя // Известия академии промышленной экологии. № 1, 2005. – С. 11-14.
8. Кузьмин В. В., Марков В. А. Исследование циклона роторного типа / Материалы докладов Международной научно-технической конференции «Новые технологии в химической промышленности». – Мн.: БГТУ. – 2002. – Ч. 1. – С. 258-261
9. Кузьмин В. В., Марков В. А. Повышение эффективности пылеулавливания циклонным аппаратом / Материалы докладов Международной научно-технической конференции «Техника и технология защиты окружающей среды». – Мн.: БГТУ – 2002. – С. 98-100.
10. Кузьмин В. В., Марков В. А. Экспериментальное исследование циклонно-роторного пылеуловителя / Сб. докл. Международной Интернет-конференции «Технологические комплексы, оборудование предприятий строительных материалов и стройиндустрии». – Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2003. – С. 104-106.
11. Циклонный пылеуловитель / Марков В. А., Кузьмин В. В., Легчилов И. В. / «Афишны бюлетэнъ Дзярж. Пат. Ведамства РБ». Заявка на изобретение № а 2002608, МКИ В 01D. – 2004. – №1. – С. 19.
12. Циклонный пылеуловитель / Кузьмин В. В., Марков В. А., Легчилов И. В. / «Афишны бюлетэнъ Дзярж. Пат. Ведамства РБ». Заявка на изобретение № а 2002609, МКИ В 01D. – 2004. – №1. – С. 19.

13. Ротационный сепаратор / Кузьмин В. В., Марков В. А. / «Афіцыйны бюлетэнь Дзярж. Пат. Ведамства РБ». Заявка на изобретение № а 20030054 МКИ В 01D. – 2004. – №3. – С. 21.

14. Центробежный пылевлагоотделитель / Кузьмин В. В., Марков В. А. / «Афіцыйны бюлетэнь Дзярж. Пат. Ведамства РБ». Заявка на изобретение № а 20030056 МКИ В 01D. – 2004. – №3. – С. 21 –22

A handwritten signature in black ink, appearing to be the initials 'KV' or similar, written in a cursive style.

## РЭЗІЮМЕ

Кузьмін Уладзіслаў Уладзіміравіч

ГІДРАДЫНАМІКА ПЛЫНЯЎ І ЭФЕКТЫЎНАСЦЬ АЧЫСТКІ  
Ў ЦЫКЛОННА-РОТАРНЫМ ПЫЛАЎЛОЎНІКУ

ГІДРАДЫНАМІКА, ЭФЕКТЫЎНАСЦЬ, СЕПАРАЦЫЯ, ПЫЛАЎЛОЎНІК, ЦЫКЛОН, РОТАР, ГІДРАЎЛІЧНАЕ СУПРАЦІЎЛЕННЕ, МАГУТНАСЦЬ, ЭНЕРГАЗАТРАТЫ, ЧАСЦІНКА

Аб'ектам даследавання з'яўляецца працэс цэнтрабежнага раздзялення газадысперсных пlynяў і новыя канструкцыі цыклонна-ротарных пылаўлоўнікаў.

Мэта работы – тэарэтычнае і эксперыментальнае даследаванне гідрадынамікі пlynяў і распрацоўка высокаэфектыўнай канструкцыі цыклонна-ротарнага пылаўлоўніка з больш высокімі, у параўнанні з цыклонамі, тэхніка-эксплуатацыйнымі паказчыкамі работы.

На падставе аналізу цыклоннага працэсу і існуючых канструкцый рагацыйных пылаўлоўнікаў вызначаны асноўныя падыходы да канструявання і распрацаваны шэраг камбінаваных цыклонна-ротарных пылаўлоўнікаў. Для аптымальнага варыянта канструкцыі праведзены тэарэтычныя і эксперыментальныя даследаванні, выканана даследаванне размеркавання хуткасцей у сепарацыйным аб'ёме, якія паказалі перавагу яго гідрадынамікі перад звычайнымі цыклонамі. Прапанаваны ротарны спосаб арганізацыі сустрэчнай закручанай пlynі ў цэнтрабежным пылаўлоўніку, а таксама спосаб зніжэння энергызатрат шляхам устаноўкі вентылятара цэнтрабежнага тыпу непасрэдна на выхадзе закручанай пlynі. Вызначаны рацыянальныя суадносіны рэжымных і канструкцыйных параметраў, распрацавана метадыка інжынернага разліку пылаўлоўніка.

Распрацаваны паўпрамысловы цыклонна-ротарны пылаўлоўнік, які выкарыстоўваецца для выдзялення дробнадысперснага пылу лекавых сродкаў з газавай пlynі на РУП «Белмедпрепараты», паказаў высокую эфектыўнасць улоўлівання. Захоўванне высокай эфектыўнасці ачысткі і адначасова зніжэнне гідраўлічнага супраціўлення пры памяншэнні расхода газу праз сепаратар дазваляе выкарыстоўваць яго для ачысткі зменных па расходу, а таксама нізканапорных газавых пlynяў, пры ўлоўліванні абразіўнага пылу. Размяшчэнне ротара непасрэдна на вале выцяжнага вентылятара, акрамя кампактнасці, дае магчымасць дадатковага зніжэння энергызатрат на правядзенне працэсу раздзялення.

**РЕЗЮМЕ**

Кузьмин Владислав Владимирович

**ГИДРОДИНАМИКА ПОТОКОВ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОЧИСТКИ В ЦИКЛОННО-РОТОРНОМ ПЫЛЕУЛОВИТЕЛЕ**

ГИДРОДИНАМИКА, ЭФФЕКТИВНОСТЬ, СЕПАРАЦИЯ, ПЫЛЕУЛОВИТЕЛЬ, ЦИКЛОН, РОТОР, ГИДРАВЛИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ, МОЩНОСТЬ, ЭНЕРГОЗАТРАТЫ, ЧАСТИЦА

Объектом исследования является процесс центробежного разделения газодисперсных потоков и новые конструкции циклонно-роторных пылеуловителей.

Цель работы – теоретическое и экспериментальное исследование гидродинамики потоков и разработка высокоэффективной конструкции циклонно-роторного пылеуловителя, имеющей более высокие, по сравнению с циклонами, технико-эксплуатационные показатели работы.

На основе анализа циклонного процесса и существующих конструкций ротационных пылеуловителей определены основные подходы к конструированию и разработан ряд комбинированных циклонно-роторных пылеуловителей. Для выбранного оптимального варианта конструкции проведены теоретические и экспериментальные исследования, выполнено исследование распределения скоростей в сепарационном объеме, показавшее преимущество его гидродинамики перед обычными циклонами. Предложен роторный способ организации встречного закрученного потока в центробежном пылеуловителе, а также способ снижения энергозатрат путем установки вентилятора центробежного типа непосредственно на выходе закрученного потока. Определены рациональные соотношения режимных и конструктивных параметров, разработана методика инженерного расчета пылеуловителя.

Разработанный полупромышленный образец циклонно-роторного пылеуловителя использован для выделения мелкодисперсной пыли лекарственных препаратов из газового потока на РУП «Белмедпрепараты» и показал высокую эффективность улавливания. Сохранение высокой эффективности очистки и одновременно снижение гидравлического сопротивления при уменьшении расхода газа через сепаратор позволяет использовать его для очистки переменных по расходу, а также низконапорных газовых потоков, при улавливании абразивной пыли. Размещение ротора непосредственно на валу вытяжного вентилятора, помимо компактности, дает возможность дополнительного снижения энергозатрат на проведение процесса разделения.

## SUMMARY

Kuzmin Vladislav Vladimirovich

**HYDRODYNAMICS OF STREAMS AND EFFICIENCY OF CLEARING  
IN CYCLON-ROTOR DEDUSTER**

HYDRODYNAMICS, EFFICIENCY, SEPARATION, DEDUSTER, CYCLONE, ROTOR, HYDRAULIC RESISTANCE, CAPACITY, POWER INPUTS, PARTICLE

The research object is process of centrifugal solid-gas separation and new designs cyclone-rotor dedusters.

The purpose of the work - both theoretical and experimental research of hydrodynamics of streams and development of a highly effective design cyclone-rotor deduster, having higher technique-operational parameters of work in comparison with cyclones.

On the basis of the analysis of cyclonic process and existing designs of rotational dedusters the basic approaches to designing are certain and a number of combined cyclone-rotor dedusters is developed. For the chosen optimum variant of a design are lead to theoretical and experimental researches, research of distribution of speeds in separation the volume, shown advantages of its aerodynamics before usual cyclones is executed. The way of decrease in power inputs by installation of the fan of centrifugal type directly on an output of the twirled stream and also a rotor way of the organization of the counter twirled stream in a centrifugal deduster are offered. Rational parities regime are certain and design data, the technique of engineering calculation of a deduster are developed.

Developed semi-industrial the sample cyclone-rotor deduster is used for allocation tiny a dust of medical products from a gas stream on RUE "Belmedpreparati" and has shown high efficiency of catching. Preservation of high efficiency of clearing and simultaneously decrease in hydraulic resistance at reduction of the charge of gas through a separator allows to use it for clearing variables under the charge, and also low-pressure gas streams, at catching abrasive dust. The accommodation a rotor directly on a shaft of an exhaust fan, besides compactness, enables additional decrease in power inputs on carrying out of process of division.