

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

УДК 621.928.37+621.928.93

МИСЮЛЯ
Дмитрий Иванович

**СНИЖЕНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ
И УНОСА ДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ В ЦИКЛОНАХ С ПОМОЩЬЮ
СТАТИЧЕСКИХ РАСКРУЧИВАЮЩИХ УСТРОЙСТВ**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук
по специальности 05.17.08 – Процессы и аппараты химических технологий

Минск, 2011

Работа выполнена в учреждении образования «Белорусский государственный технологический университет».

Научный руководитель

Марков Владимир Алексеевич,
доктор технических наук, профессор кафедры процессов и аппаратов химических производств учреждения образования «Белорусский государственный технологический университет»

Официальные оппоненты:

Акулич Александр Васильевич,
доктор технических наук, профессор, заслуженный изобретатель Республики Беларусь, проректор по научной работе учреждения образования «Могилевский государственный университет продовольствия».

Сороко Олег Леонидович,
кандидат технических наук, доцент, начальник отдела новых технологий и техники РУП «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по продовольствию»

Оппонирующая организация

Белорусский научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт горной и химической промышленности ОАО «Белгорхимпром»

Защита состоится 28 декабря 2011 г. в 14⁰⁰ часов на заседании совета по защите диссертаций Д 02.08.02 при учреждении образования «Белорусский государственный технологический университет» (Беларусь, 220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а) в аудитории 240 корп. 4.

Тел. 226-00-39; факс (017) 227-62-17, электронная почта: root@bstu.unibel.by

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

Автореферат размещен «25» ноября 2011 г.

Ученый секретарь

совета по защите диссертаций
доктор технических наук, доцент

Левданский А. А.

ВВЕДЕНИЕ

Для сохранения чистоты атмосферы в условиях роста промышленного производства предъявляются высокие требования ко всем газоочистным аппаратам, среди которых наиболее распространены циклоны, широко применяемые для улавливания из газов взвешенных частиц.

Основными параметрами, характеризующими работу циклона, являются эффективность очистки и гидравлическое сопротивление, которые зависят от конструктивных особенностей аппарата и скорости движения газового потока.

Энергетические затраты в циклоне обусловлены различными факторами. Значительная их часть связана с вращательным движением газа и потерей кинетической энергии выходящего вихревого потока. Поэтому, если уменьшить интенсивность вращения выходящего из аппарата потока с помощью раскручивающего устройства, позволяющего преобразовать кинетическую энергию вращательного движения в потенциальную энергию статического давления, то можно существенно снизить гидравлическое сопротивление циклона.

Учитывая, что энергосбережение является приоритетным направлением фундаментальных и прикладных научных исследований Республики Беларусь, снижение потерь энергии при циклонной очистке газов является актуальной задачей.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами (проектами) и темами. Исследования, выполненные по теме диссертации, проводились в рамках государственных тем: ГБ 26–06 «Разработка и исследование новых способов интенсификации тепломассообменных процессов и ресурсо-энергосберегающих технологий» (2008–2010 г.), ГБ 26–11 «Исследование и разработка новых технических решений по интенсификации процессов тепломассообмена и разделения многофазных систем, а также методов расчета аппаратов и их оптимизации» (2011 г.).

Цель и задачи исследования. Цель диссертационной работы – снижение гидравлического сопротивления и уноса дисперсных частиц в циклонах с помощью статических раскручивающих устройств, а также разработка методики расчета гидравлического сопротивления и эффективности очистки газов в циклонах с данными устройствами.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Создание новых конструкций раскручивающих устройств для снижения потерь давления и повышения эффективности очистки газа в циклонах, а также проведение комплекса теоретических и экспериментальных исследований, направленных на:

Опубликованность результатов диссертации. Основные результаты диссертационной работы изложены в 15 научных статьях (9,12 авторских листа), соответствующих пункту 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь, 2 материалах форумов, 9 материалах республиканских и международных конференций. Поданы 4 заявки на изобретения Республики Беларусь, по двум из которых получены решения о выдаче патентов.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из перечня условных обозначений, введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения, библиографического списка и приложений. Полный объем диссертации составляет 157 страниц, в том числе 38 рисунков в объеме 27 страниц, 13 таблиц в объеме 4 страниц, 290 наименований использованных библиографических источников на 22 страницах (включая 30 собственных публикаций соискателя на 3 страницах) и четыре приложения на 7 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе приведен аналитический обзор литературы, в котором содержатся сведения о существующих конструкциях циклонных аппаратов, описано влияние геометрических и режимных параметров на гидравлическое сопротивление и эффективность циклонов, рассмотрены основные способы и устройства для снижения потерь давления в них.

Анализ данных литературы показал, что самыми распространенными типами механическими пылеуловителями являются цилиндрические циклоны НИИОГАЗ, среди которых чаще всего используются аппараты типа ЦН-11 и ЦН-15. Установлено, что наиболее неэффективными устройствами для снижения гидравлического сопротивления циклонов являются раскручивающие устройства. Выработаны рекомендации по проектированию и разработке перспективных конструкций раскручивающих устройств, позволяющих существенно снизить потери давления, не оказывая при этом негативного влияния на степень очистки газов в циклонах:

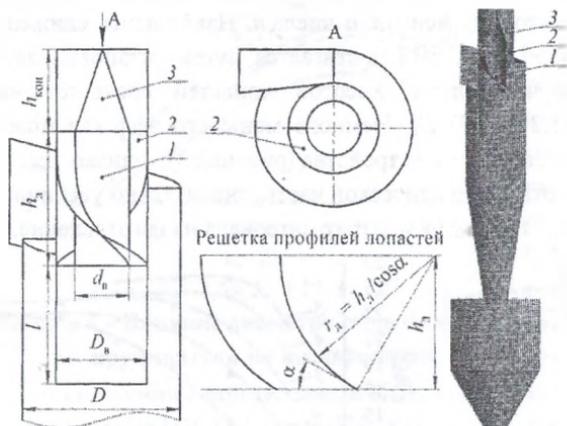
- раскручивающее устройство должно обладать качествами, при которых не снижается эффективность улавливания, обеспечивается простота конструкции и надежность работы, поскольку технические требования к циклонам заключаются в возможно большей степени очистки при минимальном гидравлическом сопротивлении;

- наиболее предпочтительными устройствами являются статические лопастные раскручивающие устройства;

- раскручивающее устройство должно представлять собой центральное тело с направляющими лопастями и устанавливаться внутри выхлопной трубы;
- при выборе профиля лопастей раскручивателя целесообразно использовать профили лопастей спрямляющих аппаратов, применяемых в компрессорных машинах и насосах для использования кинетической энергии вращательного движения потока на выходе.

На основании анализа литературных и патентных данных сформулирована цель диссертационной работы и определены основные задачи исследования, направленные на достижение поставленной цели.

Вторая глава посвящена разработке и исследованиям новой конструкции лопастного раскручивающего устройства, представленной на рисунке 1. Лопастной раскручиватель, располагаемый в выхлопной трубе циклона, состоит из цилиндрической части (сердечника) 1 с прикрепленными к ней радиальными, изогнутыми по направлению вращения газового потока лопастями 2 и конуса 3. Профиль лопастей 2 соответствует дуге окружности (в соответствии со средней линией профиля лопастей осевых вентиляторов) радиусом r_n . Угол наклона передней кромки лопастей α определяется аэродинамикой газового потока в выхлопной трубе, а задней кромки – соответствует осевому движению газа.



Принцип работы разработанного устройства следующий: очищенный газ в виде вихревого потока поступает в выхлопную трубу и попадает на лопасти 2 раскручивателя, на которых происходит его плавное равномерное спрямление. Благодаря конусу 3 обеспечивается постепенное расширение раскрученного газового потока на все сечение выхлопной трубы. Сердечник 1 предназначен для ликвидации осевого обратного тока.

1 – сердечник; 2 – лопасть; 3 – конус;
 r_n – радиус кривизны профиля лопасти; D , D_n , d_n – диаметр циклона, выхлопной трубы и сердечника; h_n , $h_{кон}$ – высота лопастей и конуса раскручивателя; l – высота установки раскручивателя; α – угол наклона передней кромки лопастей

Рисунок 1 – Конструкция циклона с лопастным раскручивателем

Целью экспериментальных исследований являлось изучение влияния раскручивателя на аэродинамику, гидравлическое сопротивление и эффективность циклонов, и определение оптимальных значений его геометрических и конструктивных параметров, обеспечивающих наибольшее снижение потерь давления при сохранении степени очистки.

Экспериментальные исследования проводились на циклонах ЦН-11 и ЦН-15, изготовленных из оргстекла с внутренним диаметром $D = 0,24$ м при условной скорости газа в интервале $w_{ц} = 2,5-4$ м/с, соответствующем практически используемому диапазону рабочих скоростей для данных типов циклонных аппаратов.

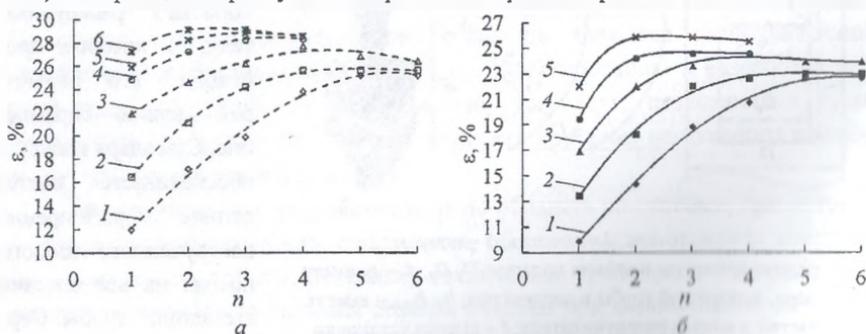
Влияние раскручивателя на потери давления в циклоне оценивалось коэффициентом снижения сопротивления ϵ , %, определяемым по формуле

$$\epsilon = (1 - \Delta p_p / \Delta p) \cdot 100, \quad (1)$$

где Δp_p , Δp – сопротивление циклона с раскручивающим устройством и без него соответственно, Па.

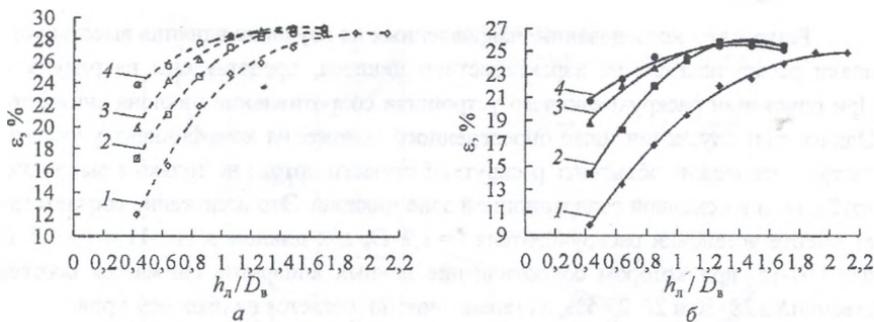
Результаты исследований раскручивателя с различным числом и высотой лопастей, соответствующие высоте установки раскручивателя $l = D_b$ и условной скорости газа $w_{ц} = 3$ м/с, представлены на рисунках 2 и 3.

Влияние количества лопастей раскручивателя на коэффициент снижения сопротивления ϵ зависит от их высоты. С увеличением высоты лопастей максимум кривых смещается в сторону меньшего числа n . Наибольшее снижение сопротивления циклонов ЦН-11 и ЦН-15 достигается путем установки двух- или трехлопастного раскручивателя с высотой лопастей соответственно $h_n = (1,48-1,69) \cdot D_b$ и $h_n = (1,27-1,48) \cdot D_b$. Немного меньшего эффекта можно добиться с помощью однолопастного устройства (рисунок 3), однако высота лопасти при этом, как и высота цилиндрической части, значительно увеличивается, что приводит к росту его габаритов и затрат материала на изготовление.



1 – $h_n/D_b = 0,42$; 2 – 0,63; 3 – 0,85; 4 – 1,06; 5 – 1,27; 6 – 1,48

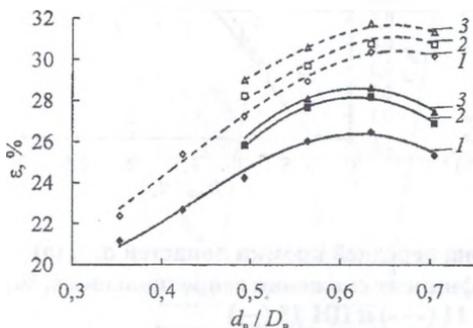
Рисунок 2 – Влияние числа лопастей n раскручивателя на коэффициент снижения сопротивления ϵ , %, циклонов ЦН-11 (а) и ЦН-15 (б) при $d_b = 0,5 \cdot D_b$ и различной высоте лопастей h_n



1 - n = 1; 2 - 2; 3 - 3; 4 - 4

Рисунок 3 – Влияние высоты лопастей h_n раскручивателя на коэффициент снижения сопротивления ϵ , %, циклонов ЦН-11 (а) и ЦН-15 (б) при $d_n = 0,5 \cdot D_n$ и различном числе лопастей n

При увеличении числа и высоты лопастей возрастают потери на трение вследствие увеличения суммарной поверхности лопаток, однако с ростом высоты лопастей раскручивание потока осуществляется более плавно.



1 - $h_n/D_n = 1,06$; 2 - 1,27; 3 - 1,48

Рисунок 4 – Влияние диаметра сердечника d_n раскручивателя на коэффициент снижения сопротивления ϵ , %, циклонов ЦН-11 (---) и ЦН-15 (—) при $n = 2$ и различной высоте лопастей h_n

Результаты экспериментальных исследований влияния диаметра сердечника раскручивающего устройства на сопротивление циклонов представлены на рисунке 4. Наибольшее снижение потерь давления в циклонах ЦН-11 и ЦН-15 достигается при $d_n = (0,62 - 0,7) \cdot D_n$ и $d_n = (0,55 - 0,65) \cdot D_n$ соответственно. Выбор определенного значения диаметра сердечника из данного интервала может осуществляться с учетом конкретных условий проведения процесса.

Влияние угла наклона передней кромки лопастей и высоты конуса на сопротивление циклонов приведено на рисунке 5. Наибольшее снижение сопротивления циклонов ЦН-11 достигается при $\alpha = 27 - 31^\circ$, а ЦН-15 – при $\alpha = 29 - 33^\circ$. Для данных типов циклонов угол наклона передней кромки лопастей раскручивателя можно принять равным 30° . При достижении высоты конуса равной $h_{\text{кон}} = 1,5 \cdot d_n$ сопротивление циклона остается практически постоянным.

Результаты исследований, направленных на изучение влияния высоты установки раскручивателя на характеристики циклона, представлены на рисунке 6. При опускании раскручивающего устройства сопротивление циклона снижается. Однако при опускании ниже определенного положения коэффициент уноса возрастает, что можно объяснить раскруткой газового потока не только в выхлопной трубе, но и в основной сепарационной зоне циклона. Это положение соответствует высоте установки раскручивателя $l = 1,9 \cdot D_B$ для циклонов ЦН-11 и $l = 1,3 \cdot D_B$ для ЦН-15, при котором сопротивление данных аппаратов снижается соответственно на 28–30 и 26–27,5%, а степень очистки остается на прежнем уровне.

При использовании в циклонах лопастного раскручивателя существенные изменения в аэродинамике потока наблюдаются лишь на выходе из циклона (рисунок 7). Значения тангенциальной скорости снижаются в среднем в пять раз, а осевая скорость распределяется более равномерно. Следовательно, раскручиватель не влияет на формирование первичного вихря, а лишь способствует ликвидации потерь давления, которые возникают вследствие вращения потока на выходе.

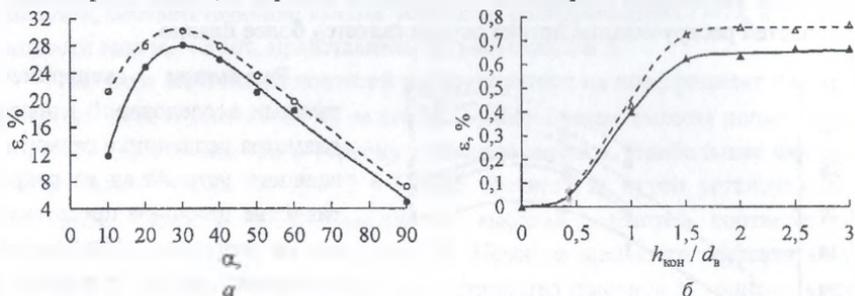


Рисунок 5 – Влияние угла наклона передней кромки лопастей $\alpha, ^\circ$ (а) и высоты конуса $h_{\text{кон}}$ (б) на коэффициент снижения сопротивления $\epsilon, \%$, циклонов ЦН-11 (---) и ЦН-15 (—)

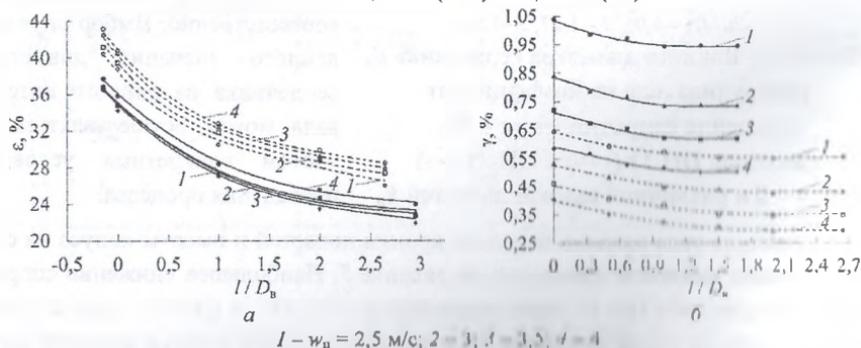


Рисунок 6 – Влияние высоты установки раскручивателя l на коэффициент снижения сопротивления $\epsilon, \%$ (а) и коэффициент уноса $\gamma, \%$, частиц муки (б) в циклонах ЦН-11 (---) и ЦН-15 (—)

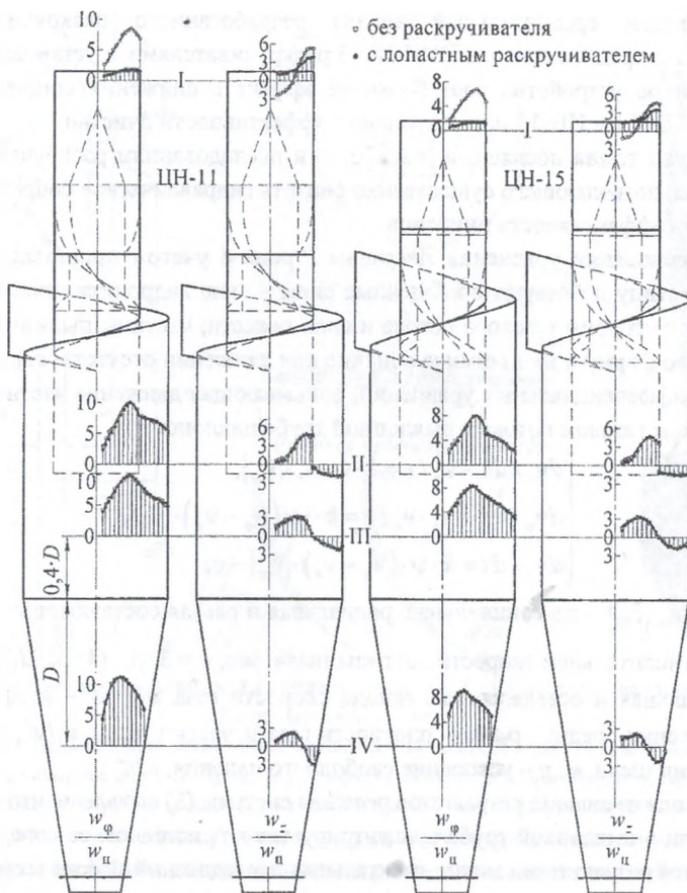


Рисунок 7 – Влияние лопастного раскручивателя на распределение скоростей в циклонах ЦН-11 и ЦН-15

В результате теоретических исследований получена формула для определения потерь давления вследствие вращательного движения потока на выходе

$$\sigma = \frac{\omega^2 \cdot R_r^4}{\zeta \cdot w_{II}^2 \cdot R_{\text{вых}}^2} \cdot \left(0,5 + 2 \cdot \ln \frac{R_{\text{вых}}}{R_r} \right), \quad (2)$$

где σ – величина, показывающая какой части общего сопротивления равны потери давления, связанные с тангенциальной скоростью потока на выходе; ω – угловая скорость вращения, с^{-1} ; $R_r, R_{\text{вых}}$ – радиус ядра вихря (воздушного «тромба») и выходного сечения циклона, м; ζ – коэффициент гидравлического сопротивления циклона; w_{II} – условная скорость газа в циклоне, м/с.

Проведен сравнительный анализ разработанного раскручивающего устройства с предложенными НИИОГАЗ раскручивателями и установлено, что разработанное устройство дает больший эффект в снижении сопротивления циклонов ЦН-11 и ЦН-15 при сохранении эффективности очистки.

Третья глава посвящена разработке и исследованиям раскручивающего устройства, позволяющего существенно снизить гидравлическое сопротивление и повысить эффективность циклонов.

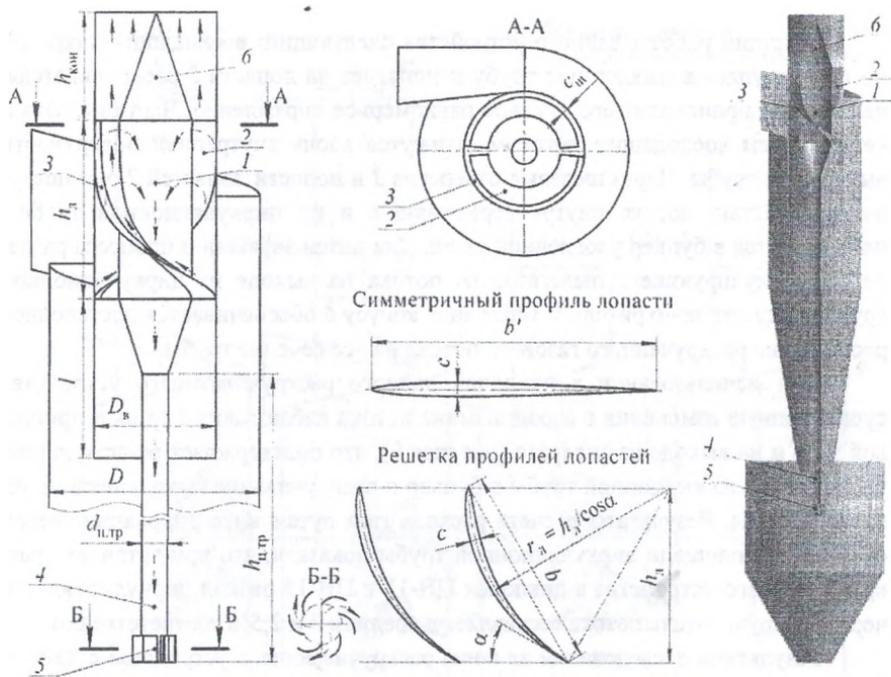
На основании уравнения Лагранжа II рода с учетом принятых допущений (на частицу действуют обобщенные силы – сила гидродинамического воздействия со стороны газового потока и сила тяжести; частицы пыли имеют шарообразную форму и их взаимное влияние при движении отсутствует) получена система дифференциальных уравнений, описывающая движение частиц пыли в закрученном газовом потоке в выхлопной трубе циклонов

$$\begin{cases} dv_r / d\tau - v_\varphi^2 / r = k \cdot \psi \cdot v_r \cdot |\nabla_{от}|, \\ dv_\varphi / d\tau + v_\varphi \cdot v_r / r = k \cdot \psi \cdot (w_\varphi - v_\varphi) \cdot |\nabla_{от}|, \\ dv_z / d\tau = k \cdot \psi \cdot (w_z - v_z) \cdot |\nabla_{от}| - g, \end{cases} \quad (3)$$

где v_φ , v_r , v_z , $|\nabla_{от}|$ – тангенциальная, радиальная и осевая составляющие, модуль полной относительной скорости частицы пыли, м/с; $k = 3 \cdot \rho_r / (4 \cdot \rho_\varphi \cdot d_\varphi)$; w_φ , w_z – тангенциальная и осевая составляющие скорости газа, м/с; ψ – коэффициент сопротивления среды; ρ_r , ρ_φ – плотность газа и частиц пыли, кг/м³; d_φ – диаметр частиц пыли, м; g – ускорение свободного падения, м/с².

Исходя из анализа результатов решения системы (3) выявлено, что основная масса пыли в выхлопной трубе концентрируется в пристенном ее слое, что подтверждается результатами экспериментальных исследований. Также теоретически и экспериментально установлено, что статическое давление в циклоне уменьшается по направлению к оси. На основании этого с целью снижения потерь давления и повышения эффективности очистки газов в циклонах разработана конструкция раскручивающего устройства для осуществления внутренней рециркуляции части потока с наибольшей концентрацией пыли из выхлопной трубы в бункер и уменьшения интенсивности вращения выходящего из аппарата потока.

Раскручивающее устройство с рециркуляцией потока (рисунок 8) состоит из полой цилиндрической части (сердечника) 1 с прикрепленными к ней радиальными, изогнутыми по направлению вращения газового потока, полыми лопастями 2 со щелевыми отверстиями 3, циркуляционной трубы 4, на нижнем конце которой установлен статический завихритель 5, осуществляющий закрутку газа в направлении вращения потока в циклоне, и конуса 6. Параметры данного устройства для циклонов ЦН-11 и ЦН-15 приведены в таблице 1.



1 – сердечник; 2 – лопасть; 3 – щелевое отверстие; 4 – циркуляционная труба;
5 – завихритель; 6 – конус;

b, b', c, r_n – хорда, длина средней линии, максимальная толщина и радиус кривизны профиля лопасти; $c_{щ}$ – ширина щели; $D, D_B, d_n, d_{ц.тр}$ – диаметр циклона, выхлопной трубы, сердечника и циркуляционной трубы; $h_n, h_{кон}, h_{ц.тр}$ – высота лопастей, конуса и циркуляционной трубы;

l – высота установки раскручивателя; α – угол наклона передней кромки лопастей

Рисунок 8 – Конструкция циклона с раскручивающим устройством с рециркуляцией потока

Таблица 1 – Параметры раскручивающего устройства с рециркуляцией потока

Параметры раскручивающего устройства с рециркуляцией потока	Тип циклона	
	ЦН-11	ЦН-15
Диаметр сердечника d_n	$(0,37-0,41) \cdot D$	$(0,32-0,38) \cdot D$
Число лопастей n	2	
Высота лопастей h_n	$0,87 \cdot D$	
Угол наклона передней кромки лопастей α	30°	30°
Ширина щели на передней стороне лопасти $c_{щ}$	$0,026 \cdot D$	
Высота конуса $h_{кон}$	$1,5 \cdot d_n$	
Высота установки в выхлопной трубе l	$1,12 \cdot D$	$0,77 \cdot D$
Внутренний диаметр циркуляционной трубы $d_{ц.тр}$	$0,12 \cdot D$	
Длина циркуляционной трубы $h_{ц.тр}$	$4 \cdot D$	$3,7 \cdot D$

Принцип работы данного устройства следующий: восходящий вихревой поток поступает в выхлопную трубу и попадает на лопасти 2 раскручивателя, на которых происходит его плавное равномерное спрямление. Частицы, захваченные этим восходящим потоком, движутся вдоль внутренней поверхности выхлопной трубы. Через щелевые отверстия 3 и полости лопастей 2 они поступают с частью потока внутрь сердечника 1 и по циркуляционной трубе 4 направляются в бункер уловленной пыли. Для интенсификации процесса разделения циркулирующего пылегазового потока на выходе из циркуляционной трубы 4 служит завихритель 5. Благодаря конусу 6 обеспечивается постепенное расширение раскрученного газового потока на все сечение трубы.

При использовании в циклонах данного раскручивающего устройства существенные изменения в аэродинамике потока наблюдаются лишь в приосевой зоне и на выходе из аппарата (рисунок 9), что подтверждает рециркуляцию части потока из выхлопной трубы в бункер и раскручивание выходящего из аппарата потока. Результаты расчета расхода газа путем интегрирования осевой скорости по площади циркуляционной трубы показали, что при установке раскручивающего устройства в циклонах ЦН-11 и ЦН-15 расход циркулирующего через раскручиватель потока составляет в среднем 3 и 2,5% соответственно.

Результаты исследований влияния раскручивающего устройства с частичной рециркуляцией потока на сопротивление и эффективность циклонов представлены в таблице 2 и на рисунке 10. Применение данного устройства позволяет снизить потери давления в циклонах ЦН-11 и ЦН-15 в среднем на 23 и 19%, при этом унос пыли уменьшается на 10–17 и 7–12% соответственно.

В четвертой главе разработана методика инженерного расчета циклонов с раскручивающими устройствами и определены энергозатраты при очистке газа в них. Потери давления в циклонах с раскручивающим устройством Δp_p , Па, можно рассчитать по формуле

$$\Delta p_p = \zeta_p \cdot \frac{\rho_r \cdot w_u^2}{2} = \frac{(100 - \varepsilon)}{100} \cdot \zeta \cdot \frac{\rho_r \cdot w_u^2}{2}, \quad (4)$$

где ζ_p – коэффициент сопротивления циклона с раскручивающим устройством.

Основной характеристикой эффективности циклонов является величина d_{50} – диаметр частиц, улавливаемых с эффективностью 50%.

Поскольку лопастной раскручиватель не влияет на степень очистки газа в циклонах ЦН-11 и ЦН-15, то значения d_{50} для данных аппаратов с лопастным раскручивателем такие же, как и для циклонов без раскручивателя. Величины d_{50} для циклонов ЦН-11 и ЦН-15 с раскручивающим устройством с рециркуляцией потока были определены при анализе экспериментальных данных, полученных для оптимального режима работы при улавливании мучной пыли с медианным диаметром частиц $d_m = 29$ мкм и $\lg \sigma_4 = 0,415$ по рекомендациям НИИОГАЗ.

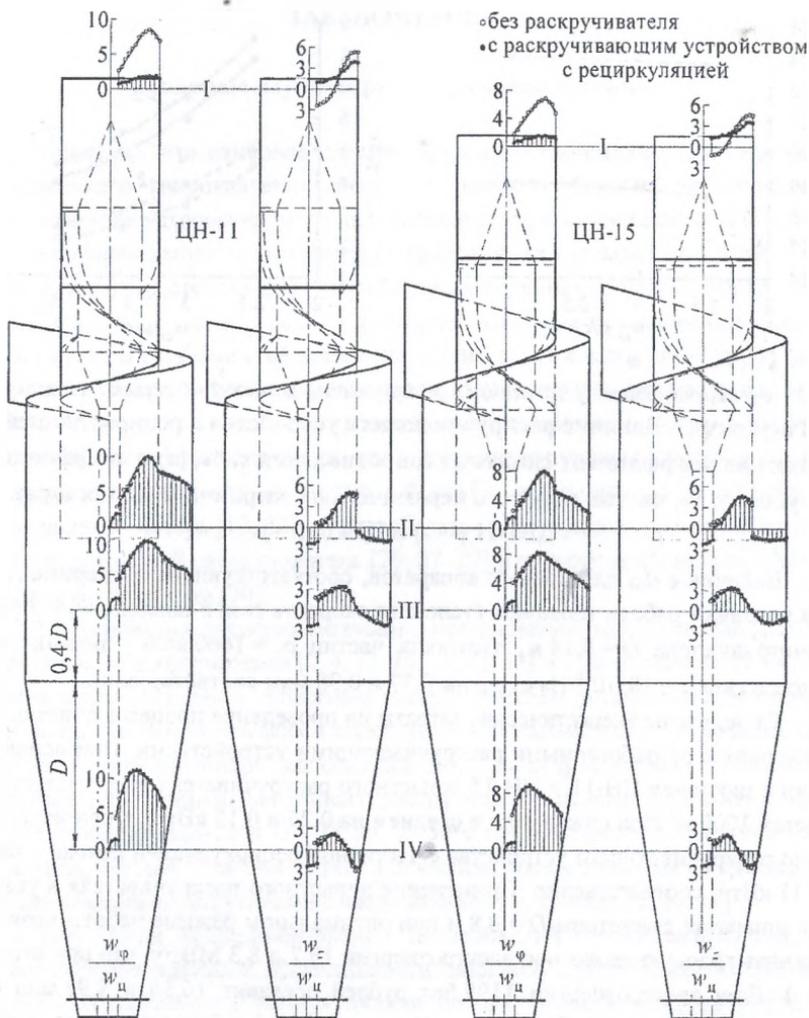
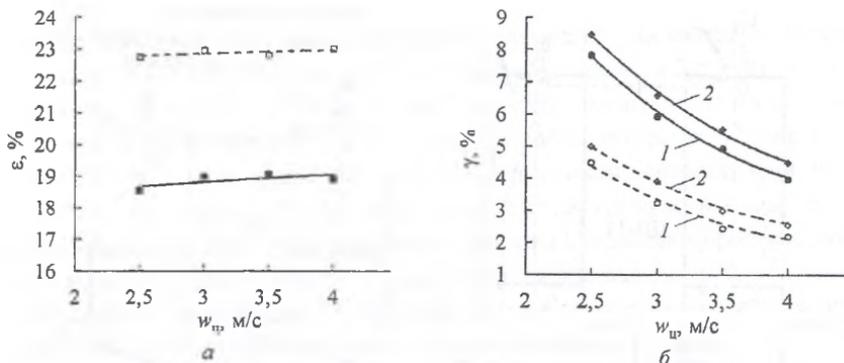


Рисунок 9 – Влияние раскручивающего устройства с рециркуляцией потока на распределение скоростей в циклонах ЦН-11 и ЦН-15

Таблица 2 – Эффективности очистки в циклонах

Тип и параметры пыли	Полный коэффициент очистки в циклонах η , %			
	Без раскручивающего устройства		С раскручивающим устройством с рециркуляцией потока	
	ЦН-11	ЦН-15	ЦН-11	ЦН-15
Керамическая ($d_m = 15,6 \pm 0,1$ мкм)	97	94,4	97,5	95
Мучная ($d_m = 29$ мкм, $\lg \sigma_{\text{ч}} = 0,415$)	99,65	99,4	99,7	99,47



1 – с раскручивающим устройством с рециркуляцией потока; 2 – без раскручивателя
Рисунок 10 – Влияние раскручивающего устройства с рециркуляцией потока на коэффициент снижения сопротивления $\epsilon, \%$, (а) и коэффициент уноса $\gamma, \%$, частиц молотого керамического кирпича (б) в циклонах ЦН-11 (---) и ЦН-15 (—)

Величины d_{50} для данных аппаратов, соответствующие экспериментальным условиям работы циклонов (условная скорость газа в циклоне $w_{г} = 3,5$ м/с, диаметр циклона $D = 0,24$ м, плотность частиц $\rho_{ч} = 1460$ кг/м³, динамическая вязкость газа $\mu = 18 \cdot 10^{-6}$ Па·с) равны 0,77 и 0,98 мкм соответственно.

Определены энергетические затраты на проведение процесса очистки газа в циклонах с разработанными раскручивающими устройствами. При использовании в циклонах ЦН-11 и ЦН-15 лопастного раскручивателя энергозатраты на очистку 1000 м³ газа снижаются в среднем на 0,25 и 0,15 кВт·ч, а при использовании раскручивающего устройства с частичной рециркуляцией потока – на 0,2 и 0,11 кВт·ч соответственно. Применение лопастного раскручивателя в указанных аппаратах диаметром $D = 0,8$ м при оптимальном режиме работы позволит получить годовую экономию электроэнергии 13,7 и 8,3 МВт·ч, что при стоимости 1 кВт·ч электроэнергии 1195 бел. рублей составит 16,36 и 9,93 млн бел. рублей соответственно. Использование лопастного раскручивающего устройства с рециркуляцией потока приведет к несколько меньшей годовой экономии денежных средств за счет снижения потребления электроэнергии (12,97 и 6,99 млн бел. рублей), однако вследствие большей эффективности очистки, общая экономия денежных средств может быть выше. В то же время снижение гидравлического сопротивления, а следовательно и сети, позволит использовать вентилятор с меньшим создаваемым давлением и соответственно мощностью двигателя, что даст дополнительный эффект в виде экономии на стоимости вентилятора. Срок окупаемости дополнительных затрат на раскручивающее устройство составит менее года.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Показано, что наиболее перспективными устройствами для снижения гидравлического сопротивления циклонов являются статические лопастные раскручивающие устройства, устанавливаемые внутри выхлопной трубы и позволяющие существенно снизить потери давления, не оказывая при этом негативного влияния на степень очистки газов от взвешенных частиц [7, 10, 13, 15].

2. Результаты теоретических и экспериментальных исследований аэродинамики потока и особенностей движения частиц пыли в выхлопной трубе циклонов, позволившие получить математическую зависимость для расчета потерь давления в циклонах вследствие вращательного движения потока на выходе, учитывающую коэффициент гидравлического сопротивления аппарата и распределение скоростей газа в выхлопной трубе, выполнить количественную оценку данных потерь [12, 22] и разработать конструкции раскручивающих устройств: лопастной раскручиватель [20, 27–29] и раскручивающее устройство с рециркуляцией потока [30].

3. На основании экспериментальных исследований аэродинамики [12, 22], гидравлического сопротивления [2, 4, 11, 16, 18, 21, 23] и эффективности [9, 24, 26] циклонов с разработанным лопастным раскручивателем установлены оптимальные значения его геометрических и конструктивных параметров, обеспечивающие наибольшее снижение потерь давления при сохранении требуемой степени очистки. Показано, что применение данного раскручивателя позволяет снизить сопротивление циклонов ЦН-11 и ЦН-15 на 26–30% при сохранении эффективности улавливания, что дает больший эффект в снижении потерь давления по сравнению с существующими конструкциями раскручивающих устройств [3, 14, 19].

4. Результаты экспериментальных исследований аэродинамики, гидравлического сопротивления и эффективности циклонов с разработанным раскручивающим устройством с рециркуляцией потока, обеспечивающим внутреннюю рециркуляцию части потока с наибольшей концентрацией пыли из выхлопной трубы в бункер и уменьшение интенсивности вращения выходящего из аппарата потока. Установлено, что применение данного устройства в циклонах ЦН-11 и ЦН-15 позволяет снизить потери давления на 19–23% и уменьшить унос дисперсных частиц на 7–17%, при этом диаметр частиц, улавливаемых с эффективностью 50%, снижается на 4,5–5,5% [1, 5, 6, 17, 30].

5. Разработана методика расчета гидравлического сопротивления и эффективности очистки газов в циклонах с предложенными оригинальными раскручивающими устройствами [8, 25].

Рекомендации по практическому использованию результатов

1. Разработанные раскручивающие устройства (лопастной раскручиватель и раскручивающее устройство с рециркуляцией потока) с установленными значениями геометрических и конструктивных параметров рекомендуются для циклонов НИИОГАЗ типа ЦН-11 и ЦН-15.

2. При очистке газов, содержащих большое количество мелкодисперсной пыли, а также при улавливании слипающейся пыли вследствие снижения поверхности для отложения пыли и опасности зарастания каналов для прохода газового потока целесообразнее использовать однолопастной раскручиватель с диаметром сердечника ближе к нижнему значению из указанного диапазона.

3. Раскручивающее устройство с рециркуляцией потока рекомендуется использовать в циклонах при улавливании неслипающейся, слабослипающейся и среднеслипающейся пыли, а также капель жидкости.

4. Результаты промышленных испытаний на ОАО «Крион» и ОАО «Гродно Азот» подтверждают возможность эффективного использования разработанных раскручивающих устройств для очистки газов в циклонах на предприятиях химической, фармацевтической, пищевой и других отраслей промышленности. При использовании в циклонах ЦН-11 и ЦН-15 лопастного раскручивателя энергозатраты на очистку 1000 м^3 газа снижаются в среднем на 0,25 и 0,15 кВт·ч, а при использовании раскручивающего устройства с рециркуляцией потока – на 0,2 и 0,11 кВт·ч соответственно.

5. Предложенные раскручивающие устройства рекомендуются для применения и в других аппаратах циклонного типа, на выходе из которых поток закручен: прямоочных циклонах, вихревых пылеуловителях, циклонных брызгоотделителях, гидроциклонах.

6. Приоритет технических решений защищен четырьмя заявками на выдачу патентов на изобретения Республики Беларусь.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи

1. Мисюля, Д.И. Снижение гидравлического сопротивления циклонных аппаратов с помощью раскручивающего устройства / Д.И. Мисюля, В.В. Кузьмин, В.А. Марков // Хим. и нефтегазовое машиностроение. – 2010. – № 3. – С. 3–5.
2. Мисюля, Д.И. Устройство для снижения энергопотребления циклонов / Д.И. Мисюля, В.В. Кузьмин, В.А. Марков // Экология и промышленность России. – 2010. – № 9. – С. 20–22.
3. Мисюля, Д.И. Новая конструкция лопастного раскручивателя циклонного аппарата / Д.И. Мисюля, В.В. Кузьмин, В.А. Марков // Энергетика – Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 2010. – № 5. – С. 57–60.
4. Мисюля, Д.И. Энергосберегающее устройство для циклонных аппаратов / Д.И. Мисюля, В.В. Кузьмин, В.А. Марков // Энергосбережение и водоподготовка. – 2010. – № 5(67). – С. 41–43.
5. Мисюля, Д.И. Снижение гидравлического сопротивления циклонов / Д.И. Мисюля, В.В. Кузьмин, В.А. Марков // Журнал прикладной химии. – 2010. – Т. 83, вып. 10. – С. 1688–1691.
6. Мисюля, Д.И. Разработка и исследование раскручивающего устройства для снижения сопротивления циклонов / Д.И. Мисюля, В.В. Кузьмин, В.А. Марков // Труды БГТУ. Сер. III, Химия и технология неорганических веществ. – 2010. – Вып. XVIII. – С. 202–205.
7. Мисюля, Д.И. Снижение потерь энергии в циклонах / Д.И. Мисюля // Труды БГТУ. Сер. III, Химия и технология неорганических веществ. – 2010. – Вып. XVIII. – С. 223–228.
8. Кузьмин, В.В. Снижение энергетических и экономических затрат при использовании циклонов НИИОГАЗ / В.В. Кузьмин, Д.И. Мисюля, В.А. Марков // Энергоэффективность. – 2011. – № 2. – С. 14–16.
9. Мисюля, Д.И. Влияние раскручивающего устройства на эффективность очистки в циклонах / Д.И. Мисюля, В.В. Кузьмин, В.А. Марков // Промышленная энергетика. – 2011. – № 4. – С. 37–39.
10. Мисюля, Д.И. Пути снижения энергопотребления циклонов / Д.И. Мисюля, В.В. Кузьмин, В.А. Марков // Альтернативная энергетика и экология. – 2011. – № 4 (96). – С. 74–88.
11. Мисюля, Д.И. Определение оптимальных геометрических параметров лопастного раскручивателя для циклонов ЦН-15 / Д.И. Мисюля, В.В. Кузьмин, В.А. Марков // Химическая технология. – 2011. – № 7. – С. 423–426.
12. Мисюля, Д.И. Определение потерь давления, связанных с вращательным движением потока на выходе из циклона / Д.И. Мисюля // Известия вузов. Химия и химическая технология. – 2011. – Т. 54, № 10. – С. 123–126.
13. Мисюля, Д.И. Конструктивные особенности раскручивающих устройств для циклонов / Д.И. Мисюля, В.В. Кузьмин, В.А. Марков // Труды БГТУ. – 2011. – № 3: Химия и технология неорганических веществ. – С. 153–161.

14. Мисюля, Д.И. Применение лопастного раскручивателя в циклонных пылеуловителях / Д.И. Мисюля, В.В. Кузьмин, В.А. Марков // Труды БГТУ. – 2011. – № 3: Химия и технология неорганических веществ. – С. 162–169.

15. Кузьмин, В.В. Резервы снижения энергозатрат в системах газоочистки и вентиляции / В.В. Кузьмин, Д.И. Мисюля, В.А. Марков // Энергетика – Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 2011. – № 6. – С. 66–72.

Материалы конференций и форумов

16. Энергосбережение при проведении процессов разделения в циклонах / Д.И. Мисюля, Ю.Л. Русакович, М.И. Шалухо, В.В. Кузьмин // Качество продукции, технологий и образования: материалы V всерос. науч.-практ. конф., Магнитогорск, 12 апр. 2010 г. / ГОУ ВПО «МГТУ им. Г.И. Носова»; редкол.: Н.И. Барышникова (отв. ред.), С.В. Маньков. – Магнитогорск, 2010. – С. 198–200.

17. Мисюля, Д.И. Разработка и исследование устройства для снижения сопротивления циклонов / Д.И. Мисюля, Ю.Л. Русакович, В.В. Кузьмин // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 22–23 апреля 2010 г.: в 3 ч. / М-во образования Респ. Беларусь, М-во образования и науки Рос. Федерации, Федеральное агентство по образованию, Могилев. обл. исполн. ком., НАН Беларуси, ГУ ВПО «Белорус.-Рос. ун-т»; редкол.: И.С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. – Могилев, 2010. – Ч. 2. – С. 135–138.

18. Мисюля, Д.И. Снижение энергопотребления циклонов / Д.И. Мисюля, Ю.Л. Русакович, М.И. Шалухо // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 22–23 апреля 2010 г.: в 3 ч. / М-во образования Респ. Беларусь, М-во образования и науки Рос. Федерации, Федеральное агентство по образованию, Могилев. обл. исполн. ком., НАН Беларуси, ГУ ВПО «Белорус.-Рос. ун-т»; редкол.: И.С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. – Могилев, 2010. – Ч. 2. – С. 139–142.

19. Мисюля, Д.И. Снижение энергозатрат при очистке газа в циклонах / Д.И. Мисюля, Ю.Л. Русакович // Инженерно-педагогическое образование в XXI веке: материалы VI респ. науч.-практ. конф. молодых ученых и студентов БНТУ, Минск, 22–23 апреля 2010 г.: в 3 ч. / М-во образования Респ. Беларусь, БНТУ, Инженерно-педагогический факультет БНТУ. – Минск, 2010. – Ч. 3. – С. 101–105.

20. Шалухо, М.И. Устройство для снижения потерь давления в циклонных аппаратах / М.И. Шалухо, Д.И. Мисюля, Ю.Л. Русакович // Новые материалы и технологии их обработки: сб. науч. работ XI респ. студенческой науч.-техн. конф. / М-во образования Респ. Беларусь, БНТУ, Гос. предприятие «Научно-технологический парк БНТУ “Политехник”». – Минск, 2010. – С. 279–280.

21. Русакович, Ю.Л. Разработка раскручивающего устройства для снижения энергопотребления циклонов / Ю.Л. Русакович, Д.И. Мисюля, В.В. Кузьмин // Первый шаг в науку – 2010: сборник материалов междунар. форума сту-

денческой и учащейся молодежи, Минск, 3–6 мая 2010 г. / НАН Беларуси; ред. группа: Н.М. Писарчук [и др.]. – Минск, 2010. – С. 474–476.

22. Шалухо, М.И. Исследование аэродинамики потока в выхлопной трубе циклона ЦН-15 / М.И. Шалухо, Д.И. Мисюля // 61-я научно-техническая конференция студентов и магистрантов: сб. науч. работ: в 4 ч. / УО «БГТУ». – Минск, 2010. – Ч. 2. – С. 303–305.

23. Русакович, Ю.Л. Устройство для снижения энергозатрат при циклонной очистке газа / Ю.Л. Русакович, Д.И. Мисюля // 61-я научно-техническая конференция студентов и магистрантов: сб. науч. работ: в 4 ч. / УО «БГТУ». – Минск, 2010. – Ч. 2. – С. 305–308.

24. Мисюля, Д.И. Энергосбережение при циклонной очистке газа / Д.И. Мисюля, В.В. Кузьмин, В.А. Марков // Ресурсо- и энергосберегающие технологии и оборудование, экологически безопасные технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 24–26 ноября 2010 г.: в 2 ч. / УО «БГТУ»; редкол.: И.М. Жарский (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2010. – Ч. 2. – С. 142–145.

25. Кузьмин, В.В. Снижение энергозатрат в системах газоочистки и вентиляции / В.В. Кузьмин, Д.И. Мисюля // Белорусский промышленный форум – 2011. Технологии. Оборудование. Качество. 14-й международный симпозиум: сборник материалов форума, Минск, 17–20 мая 2011 г. / Департамент по энергоэффективности Государственного комитета по стандартизации РБ. – Минск, 2011. – С. 139–140.

26. Шалухо, М.И. Разработка раскручивающего устройства для циклонов ЦН-11 / М.И. Шалухо, Д.И. Мисюля // 62-я научно-техническая конференция студентов и магистрантов: сб. науч. работ: в 3 ч. / УО «БГТУ». – Минск, 2011. – Ч. 2. – С. 396–399.

Заявки на выдачу патентов на изобретения Республики Беларусь

27. Центробежный сепаратор: заявка а 20091120 Респ. Беларусь, МПК (2009) В 04 С 5/00 / Д.И. Мисюля, В.В. Кузьмин, В.А. Марков, Ю.Л. Русакович, С.В. Капора; заявитель УО «БГТУ». – заявл. 23.07.2009; опубл. 28.02.2011 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2011. – № 1. – С. 19.

28. Циклон: заявка а 20100148 Респ. Беларусь, МПК (2009) В 04 С 5/00 / Д.И. Мисюля, В.В. Кузьмин, В.А. Марков; заявитель УО «БГТУ». – заявл. 04.02.2010; опубл. 30.10.2011 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2011. – № 5. – С. 17.

29. Циклон: заявка а 20100531 Респ. Беларусь, МПК (2009) В 01 D 45/00 / В.В. Кузьмин, Д.И. Мисюля, В.А. Марков; заявитель УО «БГТУ». – заявл. 08.04.2010. (Положительный результат предварительной экспертизы от 06.07.2010).

30. Центробежный пылеуловитель: заявка а 20100866 Респ. Беларусь, МПК (2009) В 04 С 5/00 / Д.И. Мисюля, В.В. Кузьмин, В.А. Марков, Ю.Л. Русакович, М.И. Шалухо; заявитель УО «БГТУ». – заявл. 03.06.2010. (Положительный результат предварительной экспертизы от 01.09.2010).

РЭЗІЮМЭ

Місюля Дзмітрый Іванавіч

Зніжэнне гідраўлічнага супраціўлення і вынасу дысперсных часцінак у цыклонах з дапамогай статычных раскручвальных прылад

Ключавыя словы: цыклон, раскручвальная прылада, рэцыркуляцыя, аэрадынаміка, страты ціску, гідраўлічнае супраціўленне, эфектыўнасць ачысткі, вынас часцінак, энергазатраты.

Мэта работы: зніжэнне гідраўлічнага супраціўлення і вынасу дысперсных часцінак у цыклонах з дапамогай статычных раскручвальных прылад, а таксама распрацоўка методыкі разліку гідраўлічнага супраціўлення і эфектыўнасці ачысткі газу ў цыклонах з дадзенымі прыладамі.

Метады даследавання: рэкамендаваная НДІАГАЗ методыка вызначэння гідраўлічнага супраціўлення цыклонаў і адобраная Галоўпрамбудпраектам Дзяржбуда СССР «Адзіная методыка параўнальных выпрабаванняў пылеўлоўнікаў для ачысткі вентыляцыйнага паветра»; сканавальная электронная мікраскапія; лазерная дыфракцыя.

Распрацаваны дзве канструкцыі раскручвальных прылад: лопасцевы раскручвальнік і раскручвальная прылада з рэцыркуляцыйнай патоку. Устаноўлена, што прымяненне лопасцевага раскручвальніка дазваляе знізіць супраціўленне цыклонаў ЦН-11 і ЦН-15 адпаведна на 28–30 і 26–27,5% пры захаванні эфектыўнасці ўлоўвання. Раскручвальная прылада з рэцыркуляцыйнай патоку забяспечвае ўнутраную рэцыркуляцыю частцы патоку з найбольшай канцэнтрацыяй пылу з выхlapной трубы ў бункер і памяншэнне інтэнсіўнасці кручэння патоку, які выходзіць з апарата. Устаноўлена, што прымяненне дадзенай прылады дазваляе знізіць страты ціску ў цыклонах ЦН-11 і ЦН-15 у сярэднім на 23 і 19% і павысіць ступень ачысткі – вынас пылу памяншаецца на 10–17 і 7–12% (дыяметр часцінак, якія улоўваюцца з эфектыўнасцю 50%, зніжаецца ў сярэднім на 4,5 і 5,5%) адпаведна. Прапанавана методыка разліку гідраўлічнага супраціўлення і эфектыўнасці цыклонаў з распрацаванымі раскручвальнымі прыладамі. Пры выкарыстанні ў цыклонах ЦН-11 і ЦН-15 лопасцевага раскручвальніка энергазатраты на ачыстку 1000 м³ газу зніжаюцца ў сярэднім на 0,25 і 0,15 кВт·г, а пры выкарыстанні раскручвальнай прылады з рэцыркуляцыйнай патоку – на 0,2 і 0,11 кВт·г адпаведна.

Вынікі прамысловых выпрабаванняў на ААТ «Крыён» і ААТ «Гродна Азот» пацвярджаюць магчымасць эфектыўнага выкарыстання распрацаваных раскручвальных прылад для ачысткі газу ў цыклонах.

Галіна выкарыстання: хімічная, фармацэўтычная, харчовая і іншыя галіны прамысловасці.

РЕЗЮМЕ

Мисюля Дмитрий Иванович

Снижение гидравлического сопротивления и уноса дисперсных частиц в циклонах с помощью статических раскручивающих устройств

Ключевые слова: циклон, раскручивающее устройство, рециркуляция, аэродинамика, потери давления, гидравлическое сопротивление, эффективность очистки, унос частиц, энергозатраты.

Цель работы: снижение гидравлического сопротивления и уноса дисперсных частиц в циклонах с помощью статических раскручивающих устройств, а также разработка методики расчета гидравлического сопротивления и эффективности очистки газов в циклонах с данными устройствами.

Методы исследования: рекомендованная НИИОГАЗ методика определения гидравлического сопротивления циклонов и одобренная Главпромстрой-проектом Госстроя СССР «Единая методика сравнительных испытаний пылеуловителей для очистки вентиляционного воздуха»; сканирующая электронная микроскопия; лазерная дифракция.

Разработаны две конструкции раскручивающих устройств: лопастной раскручиватель и раскручивающее устройство с рециркуляцией потока. Установлено, что применение лопастного раскручивателя позволяет снизить сопротивление циклонов ЦН-11 и ЦН-15 соответственно на 28–30 и 26–27,5% при сохранении эффективности улавливания. Раскручивающее устройство с рециркуляцией потока обеспечивает внутреннюю рециркуляцию части потока с наибольшей концентрацией пыли из выхлопной трубы в бункер и уменьшение интенсивности вращения выходящего из аппарата потока. Установлено, что применение данного устройства позволяет снизить потери давления в циклонах ЦН-11 и ЦН-15 в среднем на 23 и 19% и повысить степень очистки – унос пыли уменьшается на 10–17 и 7–12% (диаметр частиц, улавливаемых с эффективностью 50%, снижается в среднем на 4,5 и 5,5%) соответственно. Предложена методика расчета гидравлического сопротивления и эффективности циклонов с разработанными раскручивающими устройствами. При использовании в циклонах ЦН-11 и ЦН-15 лопастного раскручивателя энергозатраты на очистку 1000 м³ газа снижаются в среднем на 0,25 и 0,15 кВт·ч, а при использовании раскручивающего устройства с рециркуляцией потока – на 0,2 и 0,11 кВт·ч соответственно.

Результаты промышленных испытаний на ОАО «Крион» и ОАО «Гродно Азот» подтверждают возможность эффективного использования разработанных раскручивающих устройств для очистки газов в циклонах.

Область применения: химическая, фармацевтическая, пищевая и другие отрасли промышленности.

SUMMARY

Misiulia Dmitry Ivanovich

Reducing pressure drop and ablation of the disperse particles in cyclone separators by means of static untwisting devices

Keywords: cyclone separator, untwisting device, recirculation, aerodynamics, pressure losses, pressure drop, efficiency of clearing, ablation of particles, power inputs.

The work purpose: reducing pressure drop and ablation of disperse particles in cyclones by means of static untwisting devices, and also working out of a design procedure of pressure drop and efficiency of gas clearing in cyclones with the given devices.

Research methods: recommended NIIOGAS a technique of definition of cyclones pressure drop and approved by Glavpromstrojproektom of Gosstroy of the USSR «The uniform technique of comparative tests of dedusters for clearing of ventilating air»; scanning electronic microscopy; laser diffraction.

Two designs of untwisting devices are developed: blade untwisting device and the untwisting device with stream recirculation. It is established that application developed blade untwisting device allows to lower resistance of cyclones CN-11 and CN-15 accordingly on 28–30 and 26–27,5% at preservation of separation efficiency. The untwisting device with stream recirculation provides internal recirculation of a part of a stream with the greatest concentration of a dust from an exhaust pipe in the bunker and reduction of intensity of rotation of a stream leaving the device. It is established that application of the given device allows to lower pressure losses in cyclones CN-11 and CN-15 on the average on 23 and 19% and to raise clearing degree – dust ablation decreases on 10–17 and 7–12% (diameter of the particles caught with efficiency of 50%, decreases on the average on 4,5 and 5,5%) accordingly. The design procedure of pressure drop and efficiency of cyclones with the developed untwisting devices is offered. Application in cyclones CN-11 and CN-15 blade untwisting device power inputs on clearing 1000 m³ gas decrease on the average on 0,25 and 0,15 kW·h, and using of the untwisting device with partial recirculation of a stream – on 0,2 and 0,11 kW·h accordingly.

Results of industrial tests for Open Society «Krypton» and Open Society «Grodno Nitrogen» confirm possibility of an effective utilization of the developed untwisting devices for clearing of gases in cyclones.

The area of the dissertation results application: chemical, pharmaceutical, food and other industries.

Научное издание

Мисюля Дмитрий Иванович

**СНИЖЕНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ
И УНОСА ДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ В ЦИКЛОНАХ С ПОМОЩЬЮ
СТАТИЧЕСКИХ РАСКРУЧИВАЮЩИХ УСТРОЙСТВ**

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.17.08 – Процессы и аппараты химических технологий

Ответственный за выпуск Д.И. Мисюля

Подписано в печать 24.11.2011. Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная.

Гарнитура Таймс. Печать офсетная. Усл. печ. л. 1,5. Уч.-изд. л. 1,5.

Тираж 60 экз. Заказ 445.

Издатель и полиграфическое исполнение:

УО «Белорусский государственный технологический университет».

ЛИ № 02330/0549423 от 08.04.2009.

ЛП № 02330/0150477 от 16.01.2009.

Ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск.