

На правах рукописи

Разва Александр Сергеевич

ОЦЕНКИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЦИКЛОННЫХ
ПОТОКОВ И РАЗРАБОТКА НОВЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ
ИНЕРЦИОННЫХ ПЫЛЕУЛОВИТЕЛЕЙ

05.17.08 - Процессы и аппараты химических технологий

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2009

Работа выполнена в **Томском политехническом университете**

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор Логинов Владимир Степанович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Сечин Александр Иванович

кандидат технических наук, доцент
Ситников Артур Степанович

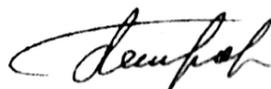
Ведущая организация: **Ангарская государственная техническая академия, г. Ангарск**

Защита диссертации состоится «29» декабря 2009 года в «14.00» часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.269.08 при **Томском политехническом университете** по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Томского политехнического университета.

Автореферат разослан « » ноября 2009г.

Ученый секретарь совета
по защите докторских и кандидатских
диссертаций Д 212.269.08,
кандидат технических наук, доцент



Петровская Т.С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Одной из основных проблем XXI века является загрязнение окружающей среды побочными продуктами химических производств. Надежность и эффективность работы систем газоочистки процессов и аппаратов химических технологий зависят от физико-химических свойств частиц, термодинамических параметров гетерогенной среды. Концентрация твердых частиц в газах и дисперсный состав зависят от параметров проведения технологического процесса, особенностей оборудования, например, от способа измельчения, сушки, методов переработки, конструктивных характеристик аппаратов, совершенства организации технологического процесса, вида технологического аппарата и режима его работы. Для многих технологических процессов характерны нестационарные режимы (переменные во времени концентрации компонент и расходы газов при изменении расхода дисперсного материала).

Наиболее распространенные в настоящее время групповые и батарейные циклоны имеют эффективности пылеотделения не более 70-80%. Основная причина низкой сепарации частиц в батарейном циклоне заключается в отсутствии условий осаждения частиц в пылесборнике. Попытки реконструкции батарейных циклонов путём изменения геометрии элементов (НИИОГАЗ, ЦКТИ) не привели к значительному повышению эффективности сепарации частиц.

Поэтому работа по выявлению гидродинамических параметров циклонных запылённых потоков, механизмов структурообразования дисперсной среды с учётом турбулентного переноса частиц является актуальной.

Диссертационная работа выполнена по плану НИР Томского политехнического университета по теме «Оценки гидродинамических параметров циклонных потоков и разработка новых технических решений инерционных пылеуловителей» и в рамках гранта Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 06–08–00054а).

Целью настоящей работы является разработка методов и средств совершенствования систем обеспыливания газов инерционными аппаратами.

При проведении исследований решались основные задачи:

- исследование характеристик потока в циклонном пылеуловителе;
- исследование характеристик дисперсной фазы в вихревой камере и ее влияние на поток;
- исследование факторов формирования слоя в приемнике циклонного пылеуловителя;
- обоснование новых технических решений элементов инерционных пылеуловителей, повышающих надежность и эффективность;
- уточнение модели турбулентного движения аэрозоля в циклонном концентраторе для определения фракционной эффективности концентрирования дисперсной фазы в аппарате с сужающимся корпусом;

– исследование характеристик разработанного промышленного пылеуловителя, альтернативного групповому циклону.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Установлено, что интенсивность вихря (по Смульскому И.И. – это разность давлений между периферией и осью) в циклонных пылеуловителях изменяется от максимального значения в верхней части циклона до нуля в пылеприемнике. В сепарационном объеме противоточного циклона происходит концентрирование и агломерирование частиц, в приемнике – затухание вихря и укладка потоком агломератов в слой. Концентрация пыли более 3 г/м^3 влияет на интенсивность вихря. Интенсивность вихря, деленная на характерный радиус циклона, представляет уровень центростремительных ускорений.

2. Установлено, что концентрации частиц в противоточном циклоне в окружном направлении распределены неравномерно. Причем при входной концентрации полидисперсной пыли более 10 г/м^3 эта неравномерность достигает более 300 %. Это свидетельствует об образовании сгустков пыли вблизи вогнутой криволинейной поверхности.

3. Установлено, что уровень центростремительных ускорений при отводе части газа с отсепарированной пылью в коническом циклоне возрастает. В циклонном концентраторе с сужающимся корпусом фракционная эффективность обеспыливания возрастает, что уменьшает унос частиц в 2–3 раза по сравнению с прямоточным.

4. Установлено, что уровень центростремительных ускорений в циклоне уменьшается прямо пропорционально концентрации, а число актов взаимодействий частиц увеличивается пропорционально квадрату концентрации. Поэтому в противоточном циклоне эффективность пылеулавливания с увеличением концентрации частиц в потоке не падает.

Практическая значимость

1. Разработан метод оценки определения перепадов давлений, окружных скоростей в циклоне, в приемнике циклона на запыленном потоке, позволяющий предотвратить забивание частицами датчиков и повысить точность и надежность измерений.

2. Уточнена модель турбулентного движения аэрозоля в циклонном концентраторе для определения фракционной эффективности концентрирования дисперсной фазы в аппарате с сужающимся корпусом, что позволило разработать аппарат с более эффективным процессом обеспыливания газов.

3. Разработана и проверена в промышленных условиях более эффективная система обеспыливания газов. Получены патент на изобретение и акт испытания.

Достоверность результатов

Обоснованность и достоверность полученных результатов подтверждена применением приемников давлений, не нарушающих структуру потока и его скоростные характеристики, а также подтверждается испытаниями

реализованных разработанных технических решений в производственных условиях.

Положения, выносимые на защиту

1. Сопоставление характеристик потоков в технологических вихревых камерах и циклонных пылеуловителях. Аэродинамические характеристики цилиндрического и конического противоточных циклонов на запыленном потоке.
2. Результаты анализа существующих гипотез формирования жгутов, оценки параметров сгусткообразований.
3. Уточнение модели турбулентного движения аэрозоля в циклонном концентраторе с сужающимся корпусом для определения фракционной эффективности обеспыливания газов.
4. Новые технические решения по повышению эффективности процесса обеспыливания воздуха в аспирационных установках, работающих в режимах нестационарных по концентрациям, дисперсному составу и расходу потока.

Личный вклад автора. Постановка проблемы и задач исследований, обсуждение результатов выполнены с участием научного руководителя д.ф.-м.н. В.С. Логинова. Под руководством научных консультантов к.т.н. Василевского М.В., к.т.н. Зыкова Е.Г. автором были проведены теоретические и экспериментальные исследования процессов сепарации частиц в инерционных аппаратах, осуществлена разработка промышленных систем пылеулавливания.

Апробация работы

Содержание и основные результаты исследований рассмотрены и доложены на российских, международных и региональных конференциях и семинарах:

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 12, 13, 14-й Всероссийской научно-технической конференции «Энергетика. Экология, надежность, безопасность», ТПУ, Томск, 2006, 2007, 2008; Международной научно-практической конференции «Современные техника и технологии в медицине, биологии и экологии» - ЮРГТУ, Новочеркасск, 2006; Международной научно-практической конференции «Современные энергетические системы и комплексы и управление ими»- ЮРГТУ, Новочеркасск, 2007; Девятом Всероссийском студенческом научно-техническом семинаре: «Энергетика: экология, надежность, безопасность» - Томск, ТПУ, 2007; Всероссийской научной конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики» - Томск, НИИ ПММ ТГУ, 2008; XIII, XIV Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых «Современные техника и технологии», ТПУ, Томск, 2007, 2008;

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 24 работы, включая 6 статей в центральной печати, получено 2 патента РФ.

Объем и структура работы.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, общих выводов, пяти приложений. Её содержание изложено на 165 страницах, включая 35 рисунков, 24 таблицы и списка цитируемой литературы состоящего из 168 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность проблемы, ее научная, практическая значимость, сформулированы цель и задачи исследований.

Первая глава посвящена обзору исследований по аэромеханическим процессам в инерционных пылеотделителях.

Концепции исследователей аэромеханических процессов в закрученных потоках, механизмы сепарации частиц, поведение дисперсной фазы, а также библиографии в области обеспыливания газов приведены в справочных руководствах Дж. Перри; А.А. Русанова; общедоступных публикациях В.А.Шваба; В.Страуса; А.Гупта, Д.Лили, Н.Сайреда; А.Н.Штыма; Э.П.Волчкова, В.И.Терехова; И.И.Смутьского, Е.А. Штокмана и др.

Течение газовой фазы в большинстве аппаратов определяется экспериментально. Вводятся различные обобщенные параметры, составленные из конструктивных соотношений аппаратов, которые, однако, подходят для однонаправленных закрученных потоков, но мало пригодны для противоточных аппаратов, с переменным расходом газа по длине аппарата.

При моделировании аэромеханических процессов в инерционных аппаратах не учитываются явления структурообразования дисперсной среды, поэтому диапазоны методов моделирования находятся в узком диапазоне скоростей потока и при условии неналипания частиц на стенки аппарата.

Влияния дисперсной фазы на гидродинамические параметры потока в аппаратах оценивают по изменению сопротивления циклона. В частности, по изменению сопротивления циклона судят о поведении вращательной компоненты.

Имеющийся в литературе анализ условий формирования слоя в пылеприемнике циклона показал, что механизм образования слоя определяется затуханием крутки полидисперсной среды в приемном устройстве, причем определяющую роль играет фактор диспергирования слоя потоком, в случае повышенных скоростей в приемнике.

Имеются сведения о влиянии относительной влажности воздуха на образования отложений пыли в циклонах, однако оценки влияния аутогезионных свойств материала на формирование отложений в аппаратах отсутствуют.

Имеются противоречивые сведения по влиянию процессов в приосевой зоне циклона на эффективность и гидравлическое сопротивление. Из приосевой зоны (даже в выходном сечении газывыводного патрубка) происходит частичный отток пыли в сепарационное пространство, и в результате частицы оказываются уловленными. Поэтому технические решения циклонов с

раскручивателями потока реализуют в аппаратах меньшую эффективность сепарации.

В публикациях встречается много противоречий в трактовке причин снижения эффективности обеспыливания газов в групповых и батарейных золоуловителей. Основное внимание обращается на качество изготовления элемента, монтажа системы, а также на равномерность потока в элементе. Одни авторы считают, что использование многозаходных элементов невыгодно, т.к. приводит к большей гидравлической неравномерности в целом. Другие считают, наоборот, что многозаходные элементы выгоднее, поскольку в самом элементе выдерживается большая равномерность потока, при этом предлагается использовать элементы большего диаметра с пропускной способностью в 4-5 раз превышающей расход в традиционном элементе (при этом уменьшается эффект батарейности, т.е. гидравлической неравномерности между элементами). В 2004–2005 М.В. Василевским, Е.Г. Зыковым были разработаны методы расчета турбулентного движения аэрозоля в вихревом разгрузителе –концентраторе, прямоточном циклонном концентраторе для определения фракционной эффективности концентрирования дисперсной фазы в этих элементах. Это позволило создать малогабаритные газоочистители, являющимися альтернативой обеспыливанию газов в батарейных циклонах. Эти установки прошли промышленную проверку (Е.Г. Зыков).

Во второй главе проводится анализ параметров потока в инерционных пылеуловителях.

Имеется множество конструктивных форм циклонов отличающихся геометрией ввода газа и организацией вихря в головной части, геометрией сепарационного пространства, геометрией канала вывода концентрата пыли в пылеприемник. Основное отличие циклонных пылеуловителей от вихревых камер в том, что в первых осуществляется перевод дисперсной фазы из аэрозольного состояния в насыпной слой, во вторых – интенсифицирование технологических процессов (горение, сушка и др.). Поэтому интенсивность вихря в циклонных аппаратах уменьшается по мере распространения вихря в сторону выхода пыли, а в вихревых камерах она незначительно меняется по длине. В циклоне вихрь формируется в головной части, распространяется в сепарационной. В сепарационной части он разделяется на два транзитных вихря. Первый транзитный вихрь перетекает в выхлопную трубу, второй транзитный вихрь проходит в приемник, уменьшая крутку и перетекает в приосевую область, перемешиваясь с медленным центральным вихрем. Выходящий из приемника вихрь присоединяется к первому транзитному вихрю. Такое течение характерно для течений с самоэжекцией потоков. В приемнике, в его нижней части, интенсивность вихря равна нулю. Поскольку приемник является частью циклонного пылеуловителя, следовательно, в пылеуловителе имеется зона нулевой интенсивностью вихря, тогда как в вихревых камерах такая зона отсутствует.

Обобщающие кривые распределений скоростей, давлений для камер под напором оказываются независимыми от расхода, если они отнесены к базовым

значениям P_k – давление на стенке корпуса и V_Δ – окружная скорость вблизи стенки корпуса. Коэффициент сопротивления входа определяется по И.И. Смольскому соотношением $\xi'_{вх} = \frac{P_{вх} - P_k}{0.5\rho V_{вх}^2}$. Сопротивление камеры связано с

коэффициентом сопротивления камеры соотношением $\xi_k = R_l^2 [1 + P_k / (0.5\rho V_\Delta^2)]$. Отношение $V_\Delta/V_{вх} = \alpha$ по разным источникам может быть больше и меньше единицы. Величина α зависит от конструкции ввода и геометрических соотношений сепарационного пространства. А.Н. Штым указывает несколько факторов, определяющих снижение момента количества движения в рабочем объеме вихревой камеры (ВК): расширение струи на входе при малых значениях ширины входных сечений, влияние силы трения газа о поверхность камеры, влияние эжекционных потоков, проникающих внутрь камеры из пространства вне камеры, куда истекает газ. Эжекционный газ влияет на течение в рабочем объеме при отношении диаметра газовыводного отверстия к диаметру камеры более 0.3. По А.Н. Штыму величина α равна единице, если отношение площади входа к поверхности рабочего объема $F_{вх}/F_{пов} > 0.012$. В другом случае при меньших значениях этого отношения $\alpha = 20(F_{вх}/F_{пов})^{0.68}$. Однако имеются противоречия в оценке распределения гидродинамических параметров. В опытных данных распределения циркуляций в рабочем объеме по разным источникам не превышает величины входной циркуляции. Если же скорость за сопловым аппаратом оказывается больше, чем на выходе из сопел, значит, циркуляция скорости вблизи стенки должна быть выше по сравнению с входной. В исследованиях принимается, что циркуляция максимальна на границе ядра потока, обращенной к поверхности. В циклонных пылеуловителях циркуляция максимальна вблизи поверхности в верхней части циклона.

Анализ распределений полей скоростей в противоточных циклонах, в отличие от ВК, показал отсутствие подобия полей скоростей в разных сечениях. Однако для цилиндрического циклона с $F_{вх}/F_{вых} = 0,29$, $F_{вх}/F_{пл} = 0,08$, $F_{вх}/F_{пов} = 0,0105$ относительные величины в сечениях оказались одинаковыми. Это говорит о том, что силы трения газа о поверхность меняют уровень полей моментов скоростей (циркуляций), но при этом сохраняется подобие распределения. Отметим, что относительный радиус максимальных окружных скоростей оказался неизменным по высоте циклона.

В цилиндрическом циклоне, в отличие от вихревых камер, вход потока осуществляется в головную часть с внутренней трубой для вывода газа. В этом канале газ распространяется между корпусом и выходной трубой, происходит формирование вихря, который затем распространяется в сепарационном объеме. Максимальное значение момента количества движения имеет место на границе пристенной зоны, составляющую 3% от радиуса циклона. Момент импульса потока входа – это момент скорости, умноженный на весовой расход. При большом моменте импульса потока, распространяющегося в стесненном объеме, при входе в сепарационный объем, поток разветвляется на две части. Большая часть потока вверху циклона в виде кольцевой полосы проходит в выходную трубу, остальная часть распространяется по сепарационному объему.

Параметр крутки в упрощенном виде представим как

$$\Phi_y = \frac{R_{ex} V_{ex} G}{GW_x \sqrt{R_H^2 - R_1^2}} = \frac{\pi R_{ex} R_H \sqrt{(1 - \bar{R}_1^2)}}{F_{ex}} \approx \frac{\sqrt{1 - \bar{R}_1^2}}{\bar{F}_{вх}}, \quad \text{где } \bar{R}_1 = R_1 / R_H. \quad \text{Другой параметр,}$$

связывающий крутку потока и аксиальную скорость в выходной трубке

$$\frac{Q}{\pi R_1} = \frac{V_{вх} F_{ex}}{\pi V_{ex} R_H R_1} = \frac{\bar{F}_{ex}}{R_1}, \quad \text{где } Q \text{—расход газа. } \Phi'_{вых} = \bar{R}_1 / \bar{F}_{вх}, \quad R_1, R_H \text{—радиусы выходного}$$

патрубка и корпуса, W_x —средняя аксиальная скорость.

В коническом циклоне значение радиуса максимальной скорости уменьшается к каналу вывода пыли, и значение циркуляции, рассчитанной по максимальной окружной скорости, также уменьшается. При этом центробежные факторы, рассчитанные по максимальным окружным скоростям и соответствующим им радиусам, по высоте меняются незначительно. Однако уровень центробежных ускорений, приходящийся на единицу площади прохода, в конусе с уменьшением сечения увеличивается и пылевыводном отверстии возрастает в десятки раз.

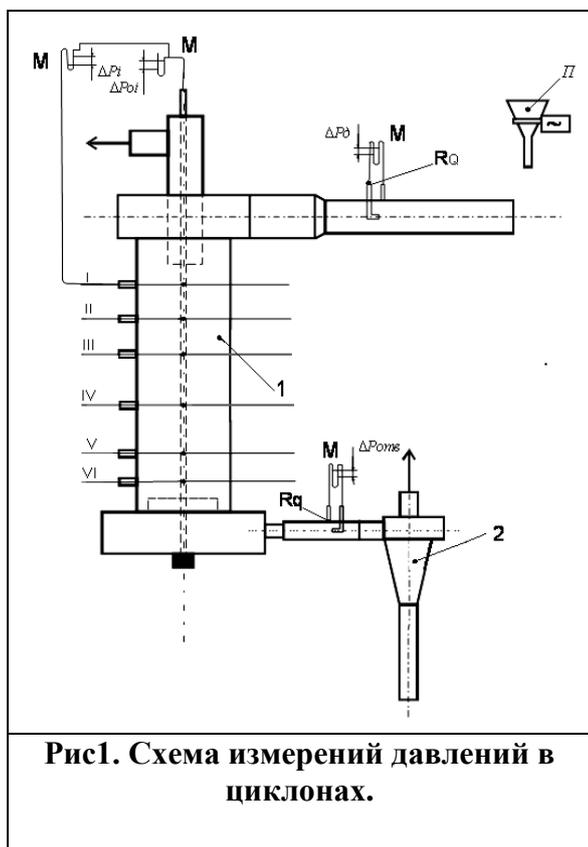


Рис1. Схема измерений давлений в циклонах.

На рис. 1 приведена схема измерения давлений в цилиндрическом циклоне (1). Диаметр корпуса 102 мм, диаметр выходного патрубка чистого воздуха—34 мм, диаметр пылевыводного отверстия конического циклона — 29 мм, диаметр отражателя в нижней части цилиндрического циклона — 43 мм. Отсчет расстояний проводился от пылевыводных сечений. Использовался микропорошок М40. Дозатор представлял собой виброворонку (II) с различными размерами выходных сечений. Порошок представляет собой несвязный материал с размером частиц 40 мкм обладающий хорошей сыпучестью.

Для уменьшения колебаний давлений проводился отвод некоторой части воздуха с пылью в выносной циклон (2). Определялось влияние отвода на распределении давлений.

На рис.2 показаны значения давлений в коническом циклоне. Для большей ясности метки разнесены по высоте, хотя все они принадлежат одному и тому же сечению.

Анализ полученных распределений показывает, что малые концентрации частиц, характерные для систем обеспыливания газов, оказывают заметное влияние на распределение давлений, причем на оси разрежения по

абсолютному значению уменьшается в сторону пылевыводного сечения в отличие от вихревых камер.

Существенное значение имеет величина отводимого с пылью воздуха в выносной пылеосадитель. С увеличением относительного значения отводимого с пылью воздуха разрежение на оси в нижней части увеличивается, градиенты разрежений и радиальных перепадов давлений в осевом направлении уменьшаются. Пульсации давлений в потоке воздуха конического циклон при подаче пыли много больше, чем в цилиндрическом.

Существенное значение имеет величина отводимого с пылью воздуха в выносной пылеосадитель. С увеличением относительного значения отводимого с пылью воздуха разрежение на оси в нижней части увеличивается, градиенты разрежений и радиальных перепадов давлений в осевом направлении уменьшаются. Пульсации давлений в потоке воздуха конического циклон при подаче пыли много больше, чем в цилиндрическом.

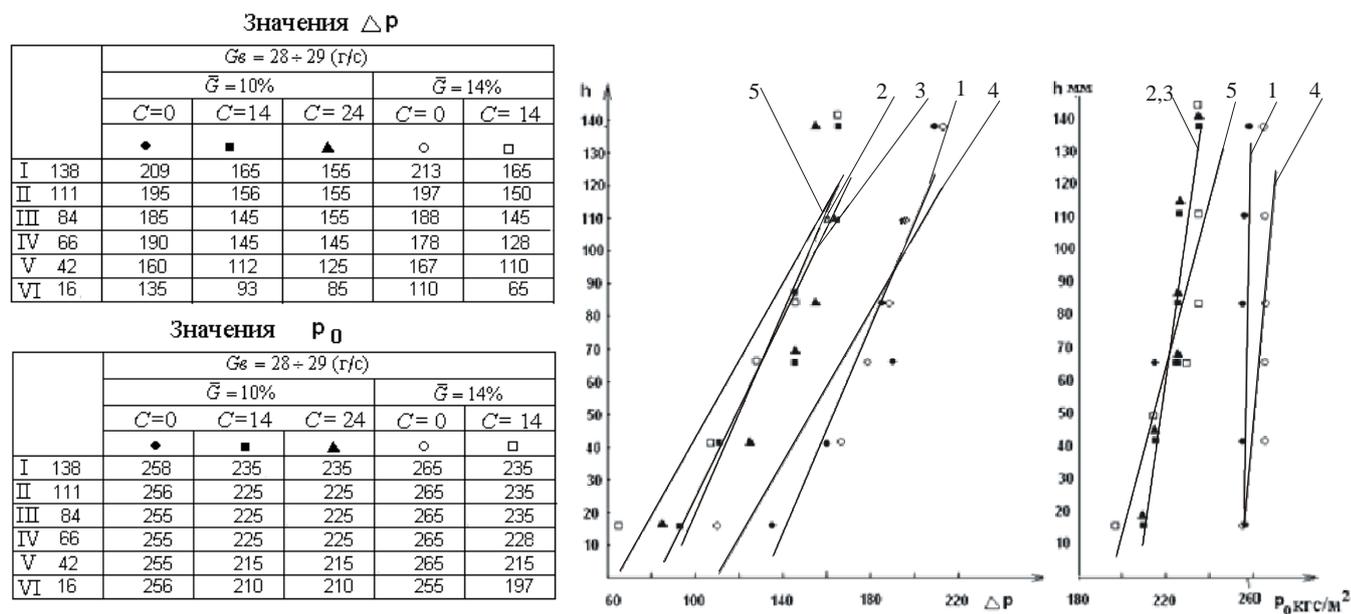


Рис. 2. Распределение давлений в коническом циклоне ($\text{кгс}/\text{м}^2$) по высоте циклона h (мм)

Радиальный перепад давления (P_a) определяется уровнем крутки потока

$$\Delta P = \int_0^R \rho \frac{W_\varphi^2}{r} dr; W_\varphi = W_{ax} \left(\frac{R}{r} \right)^n \text{ при } R > r > r_m; W_\varphi = W_{ax} r \left(\frac{R}{r_m} \right)^n \text{ при } r < r_m,$$

Здесь r_m —радиус максимального значения окружной скорости в конкретном сечении. Приведенные уравнения позволяют вычислить значение показателя степени по данным измерения перепада давлений на периферии и оси.

Интенсивность вихря (по И.И. Смольскому интенсивность вихря—это перепад давления между осью и корпусом), отнесенная к скоростному напору максимальной окружной скорости, является коэффициентом интенсивности вихря, и он представляет аналог коэффициента сопротивления циклона, который зависит от концентрации пыли. По справочным данным для циклонов

с развитой поверхностью коэффициент сопротивления начинает меняться, начиная с концентрации 5 г/м^3 .

В третьей главе представлены оценки процессов концентрирования частиц в циклонных пылеуловителях.

В процессе выделения пыли из газонесущего потока дисперсная среда из аэрозольного состояния с порозностью $\varepsilon_n > 0.999$ переходит в состояние насыпного слоя с $0.95 > \varepsilon_n > 0.4$. Рассмотрено течение аэрозоля в простейшем криволинейном канале без осаждения и с осаждением частиц на стенку. Расчет показывает, что в задаче без осаждения частиц основное перераспределение концентрации частиц по длине канала осуществляется на полувитке от входа и в дальнейшем меняется незначительно. На вогнутой поверхности концентрация частиц более 5 мкм при радиусе кривизны менее 0.5 м увеличивается в десятки раз.

В конусе циклона, в области вывода пыли, концентрация частиц более 3 мкм вблизи стенки увеличивается в десятки раз. Это способствует интенсификации коагуляционных эффектов.

Неоднородности концентраций, возникающие при повороте потока в пристеночной области, приводят к неоднородности распределения напряжения трения на стенке в потоке. В локальные области, где напряжения трения оказываются «завышенными», подтекает окружающий газ с содержащимися в нем частицами и неоднородность увеличивается. Частицы, находящиеся вне жгута, движутся быстрее, нагоняют его, присоединяются к нему, участвуя в циклах сепарации и диспергации в области движения жгута. В пристеночной области сгущений поток ламинаризуется, интенсивность вихрей Тейлора – Гертлера возрастает и эффект жгутообразования усиливается. Поэтому в окружном направлении отставание жгута от газа будет большим, чем в аксиальном направлении.

Для малых концентраций, при которых жгуты транспортируются потоком при любом пространственном расположении циклона, можно сделать оценки скорости, радиуса жгута, исходя из распределений скоростей газа в области жгутов и имеющихся сведений о сопротивлении нитевидных, волокнистых тел. Трение жгута о поверхность определяется аналогично оценке трения взвесей в трубах. Вводится понятие минимальной скорости переноса, при которой на поверхности нет накапливания проскальзывающих частиц. При этом динамическая скорость (скорость трения) выражается через напряжение сдвига и плотность смеси. В работе приведены уравнения для оценки размера жгута в зависимости от степени попадания пыли в жгут.

Приведенные уравнения позволяют определить C_* и r_s . Оценки показывают, что при малых концентрациях $K_{\text{вх}} = (1 \dots 10) \cdot 10^{-3} \text{ кг/кг}$ потока и частицах менее 5 мкм , величина r_s составляет $100 \dots 300 \text{ мкм}$, т.е. достигает размеров частиц, эффективно выделяющихся из потока в приемнике. Таким образом, причина улавливания мелких частиц в циклонах – их связывание жгутами и транспортировка в приемник в жгутообразном состоянии. При сверхмалых концентрациях мелких частиц видимо происходит периодическое

накопление частиц в объеме, жгутообразование и осаждение в приемнике. При этом наблюдаются пульсации давления в приемнике. Процесс жгутообразования может быть косвенно обнаружен по изменению интенсивности вихря.

Были проведены исследования двухфазного потока в конусе циклона. Для определения времени прохода материала через циклон и сопоставления его со временем пребывания газа были проведены измерения скорости воздуха на входе в аппарат при отводе всего воздуха через пылевыводное отверстие, расход сыпучего материала. Проводилось мгновенное отсоединение циклона от коллектора разрежения, определялось количество пыли выпавшей в циклоне. Визуально было видно что пыль в конусе движется в виде полосовых жгутов. Количество витков, их длина, определялась визуально, а также расчетом. Скорость воздуха в витках определялась с учетом ускорения потока в конусе и усреднялась по длине витка. Определялось время прохода воздуха через конус циклона, как объем конуса, деленный на расход, а также время как длина витка, деленная на скорость жгута. Определялось время пребывания материала, как масса, выпавшая в циклоне при отсечке потока, деленная на весовой расход. Опыты проводились на порошке М40 (корунд). Расход материала составлял 1,1 г/с, расход воздуха 9–17 г/с, скорость воздуха во входном сечении 7 – 13 м/с. Отношение времени прохождения материала ко времени прохода воздуха в зависимости от концентрации и скорости воздуха находилось в диапазоне $30 \div 2$. В противоточном циклоне при малых концентрациях частиц сгустки обнаруживаются по мерцанию светового луча и по распределению концентраций частиц в окружном направлении.

Был изготовлен прозрачный разборный циклон типа ЦН–11 со вставками, позволяющими проводить отбор части запыленного воздуха из цилиндрической, конической частей при полном обходе отбора в окружном направлении. В противоточном циклоне в каждом сечении, нормальном к оси, расходы воздуха в нисходящем и восходящем движении одинаковы. В предварительных опытах при малых концентрациях частиц в цилиндрической части визуально жгуты не были обнаружены. По-видимому, происходило размывание сгустков вблизи стенки из-за взаимодействия нисходящего и восходящего вихрей. Более выраженными сгусткообразования оказались при прямооточном выводе воздуха через пылевыводное отверстие циклона.

Визуально видно, что образуется несколько нитей, причем очевидно в нитях группируются частицы большего размера.

Для того чтобы определить параметры сгусткообразований (распределение пыли М40 в окружном направлении) в противоточном циклоне, с помощью поворотной секции были отобраны пробы воздуха с различной концентрацией частиц (или количеством отведенной пыли по отношению к количеству введенной пыли) по окружности циклона на фиксированной высоте, равной 1.5 диаметру от ввода. Оказалось, что распределение концентраций по окружности неравномерно (имеются всплеск и провалы концентраций). Количества выводимой пыли по окружности в цилиндрической части для

больших и малых входных концентраций составляют 500 и 200% соответственно, в конической части –80 и 50% .

Относительный выход цементной пыли представлен на рис. 3, 4

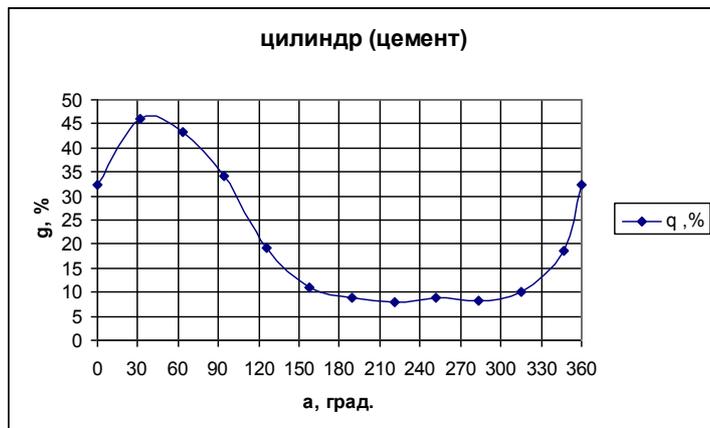


Рис.3. Относительное количество полифракционной пыли, выводимое с периферии цилиндрической части циклона 15%-ым количеством воздуха в зависимости от угловой координаты (направление отсчета по направлению вращения потока, начало отсчета–сопряжение ввода с камерой):
◆–концентрация 11–19 г/м³.

Сопоставление схем противоточного циклона с прямоточным, в котором весь воздух отводился через пылевыводное отверстие, показало, что существенное влияние на размыв сгустков и формирование жгутов в конической части имеет возвратный вихрь. В противоточном циклоне, в конической части, наблюдалось большее количество жгутов, чем в прямоточном.

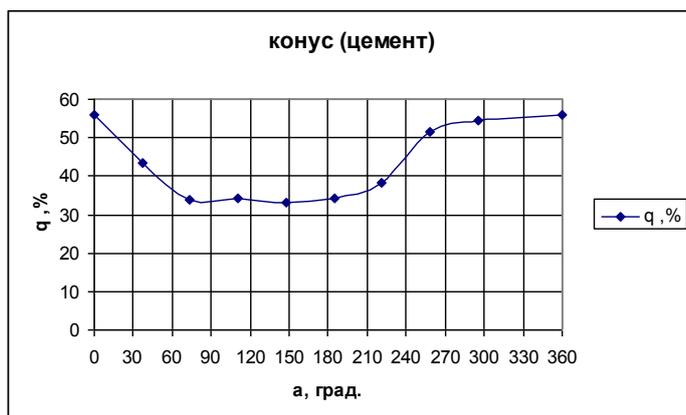


Рис.4. Относительное количество полифракционной пыли, выводимое с периферии конической нижней части циклона 15%-ым количеством воздуха в зависимости от угловой координаты
◆–концентрация 11–19 г/м³.

Оценки показывают, что размеры жгутов могут соответствовать размерам крупных частиц. Таким образом, при малых концентрациях в противоточном циклоне наблюдается формирование и распад сгусткообразований. В конической части количество жгутов намного выше, чем в цилиндрической, успокоение вихрей, содержащих сгустки пыли происходит в приемнике. Там же материал проходит стадию уплотнения, при котором на пыль начинает воздействовать сила тяжести.

В четвертой главе приведены данные испытаний модельных установок обеспыливания приведен расчет противоточного пылеконцентратора по уточненной методике и приведены данные промышленных испытаний аппаратов.

Исследовательский стенд представляет собой вихревой разгрузитель (ВР), способный компоноваться в виде двух схем: либо с прямоточным

цилиндрическим концентратором (ПЦК), либо с противоточным цилиндрическим концентратором (ЦК). Для осуществления подачи материала средней связности использован специально сконструированный вибродозатор, позволяющий проводить равномерную подачу пыли в поток. Установка работает под разрежением. Разрежение создаётся центробежным вентилятором ВЦ-5-35, 3000 об/мин с производительностью $Q=1000 \text{ м}^3/\text{час}$ при разрежении 3000 Па. В качестве тестовой пыли использовалась пыль цемента М 400 с медианным размером частиц $\delta_{50}=23 \text{ мкм}$, дисперсией $\sigma_q=3.1$, плотностью $\rho_q=2900 \text{ кг/м}^3$. В качестве рабочего потока использовался атмосферный воздух помещения лаборатории. Опыты проводились при нормальных условиях. Расход воздуха через установку определялся по входному коллектору путём измерения статического разрежения.

В рамках проведения исследований инерционных цилиндрических пылеконцентраторов было осуществлено сравнение эффективностей сепарации частиц по двум различным схемам: прямоточным пылеконцентратором и противоточным. Обе схемы имеют выносные противоточные циклонные пылеуловители, основные и дополнительные фильтры.

При проектировании промышленного воздухоочистителя основное внимание было уделено разгрузке потока в вихревой камере перед поступлением потока в противоточный циклонный пылеконцентратор. Вихревая камера сообщается через щелевые проходы с нижним приемником пыли, в котором осаждаются сгустки пыли и крупные частицы. Часть газа с концентратом пыли выводится в выносной циклон. Разгруженный от пыли закрученный поток поступает в противоточный пылеконцентратор с сужающимся корпусом. В таком элементе уровень окружных скоростей повышен, а турбулентный перенос частиц понижен, что увеличивает эффективность обеспыливания газов. Для предотвращения налипания мелкой пыли, выводимой из противоточного концентратора, в выносном циклоне, в циклон подается часть газа с крупной пылью. Расчет эффективности концентрирования дисперсной фазы при турбулентном движении аэрозоля в вихревой камере проводился по методике Василевского–Зыкова. Метод расчета фракционной эффективности при турбулентном движении аэрозоля в прямоточном циклоне также был разработан М.В. Василевским и Е.Г. Зыковым. Этот метод в работе переработан для расчета процесса концентрирования частиц в противоточном циклоном пылеконцентраторе. При этом использовались результаты экспериментальных исследований, приведенных в предыдущих разделах (параметры для оценки распределения окружных скоростей при различных коэффициентах отвода пыли).

В 2007–2008 годах проводились работы по аспирированию конвейерных систем известняка на Топкинском цементном заводе.



Рис.5. Фрагмент разработанной установки обеспыливания воздуха системы аспирации узла пересыпки транспортеров известняка

Анализ работы аспирационных систем показал, что изменение гранулометрического состава дисперсной фазы происходит как на стадии конвейерного перемещения при пересыпках дисперсного материала с транспортера на транспортер, так и в процессе движения двухфазного потока вблизи криволинейных поверхностей в самом циклоне. Это является причиной образования отложений пыли на поверхностях циклонов, изменения конфигурации потоков и снижения эффективности обеспыливания. В ходе решения задачи обеспыливания воздуха в условиях образования отложений в

промышленных системах аспирации конвейерного транспорта известняка нами использован опыт разработки пылеуловителя для очистки дымовых газов котлов слоевого сжигания твердого топлива. Промышленный вихревой пылеуловитель, был установлен за котлом КЕ 10/14 котельной ОАО «Шахта Заречная» (г.Полысаево, Кемеровская область). Эффективность батарейного циклона на котле слоевого сжигания топлива составляла 69%, эффективность нового вихревого пылеуловителя 95%, гидравлическое сопротивление до 1500 Па.

На рис. 5 представлен фрагмент разработанной установки обеспыливания воздуха в системе аспирации транспортеров, на рис. 6 – схема потоков воздуха разработанной установки обеспыливания системы аспирации узла пересыпки транспортеров известняка.

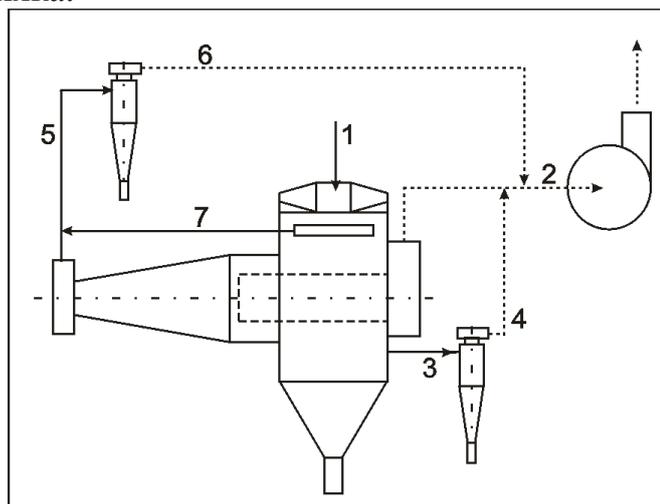


Рис. 6. Схема потоков воздуха разработанной установки обеспыливания системы аспирации узла пересыпки транспортеров известняка

Установка хорошо вписывается в небольшие объемы с заданной конфигурацией. В приведенной схеме системы обеспыливания воздуха имеются приспособления, позволяющие изменять состав дисперсной компоненты на входе в циклоны. Крупные сгустки и частицы, содержащиеся в

потоке 1 улавливаются в вихревой камере. Часть крупных частиц из вихревой камеры отводится в выносной циклон потоком 7 для исключения налипания в нём мелких частиц. Поток 3 поддерживается неизменным, причем концентрация частиц в нем меняется в небольшом диапазоне. Поток 5 после второй ступени концентрирования также стабилен. Это позволяет использовать выносные циклоны с максимальной эффективностью. В процессе эксплуатации выяснилось, что система хорошо настраивается, регулируется, однако при внезапном изменении параметров воздуха и поверхностных свойств частиц залипание материала на поверхности циклонов все же происходит. Анализ состояния проблемы диагностики работоспособности аппарата показал, что в настоящее время методы и средства контроля структурирования закрученного потока с дисперсной фазой в промышленных циклонах отсутствуют, что требует проведения дальнейших разработок в этом направлении. В диссертации представлены акты испытаний и протокол рассмотрения работоспособности установки обеспыливания воздуха на конвейерной пересыпке известняка, система имеет эффективность сепарации 94.8%.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Малые концентрации частиц, характерные для систем обеспыливания газов, оказывают заметное влияние на распределение давлений, причем на оси разрежения по абсолютному значению уменьшается в сторону пылевыводного сечения в отличие от вихревых камер. Аналогичны распределения в осевом направлении радиальных перепадов давления.
2. Несимметричность распределения концентраций в окружном направлении цилиндрической части циклона составляет сотни процентов. Ожидаемого всплеска концентраций (при полном попадании пыли в жгут) не обнаружено. Для полидисперсного материала перераспределение частиц в окружном направлении более существенно, чем для монодисперсной пыли. Для полидисперсного аэрозоля (цемент) процессы жгутообразования происходят более интенсивно, чем для монодисперсного аэрозоля.
3. Характер поведения дисперсной фазы для малых концентраций и мелких частиц в закрученных потоках отличается от течений дисперсной фазы с высокими концентрациями или крупными частицами. Во втором случае существенное значение имеет сила тяжести, тогда как при малых концентрациях сила тяжести не существенна. Получены оценки параметров дисперсной фазы, если она движется в виде жгутов. Экспериментальные данные свидетельствуют о том, что при малых концентрациях (менее 0.02 кг/м^3) происходит размыв сгустков и процесс жгутообразования менее выражен по сравнению с повышенными концентрациями (более 0.2 кг/м^3). В противоточном циклоне, в конической части, наблюдалось большее количество жгутов, чем в прямоточном. Оценки показывают, что размеры жгутов могут соответствовать размерам крупных частиц. Таким образом, при малых концентрациях в противоточном циклоне наблюдается формирование и распад сгусткообразований; в конической части количество жгутов намного выше, чем

в цилиндрической, успокоение вихрей, содержащих сгустки пыли происходит в приемнике.

4. На работу противоточного циклона влияет неравномерность концентрации, дисперсности, расхода. Высокая эффективность сепарации может быть получена, если противоточный циклон работает в оптимальных для него условиях, причем одиночные высокоэффективные циклоны большого диаметра не вписываются по высоте в технологические помещения многих производств.

5. Схема с противоточным концентратором и отводом в выносной циклон воздуха не менее 15% от общего расхода является наиболее эффективной по данным экспериментальных исследований.

6. В промышленной установке обеспыливания воздуха двойная разгрузка потока от пыли в вихревой камере с выводом концентрата пыли в выносной циклон позволила оптимизировать работу третьей ступени выполненной в виде противоточного циклонного концентратора. Уровень центроостремительных ускорений в выносных циклонов на 300% выше, чем в концентраторах, и таким образом эффективность выносных циклонов не меньше, чем эффективность обеспыливания в трех ступенях разгрузки и концентрирования. В установке предусмотрен канал для ввода 2–3% газа с крупной пылью в выносной циклон противоточного концентратора для предотвращения залипания мелкой пыли на поверхности аппарата.

7. Испытание промышленной установки очистки воздуха от известняка на Топкинском цементном заводе подтвердило эффективность разработанной схемы. Установка может быть использована для обеспыливания газов в других производствах.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Зыков Е.Г., Разва А.С., Василевский М.В. Образование отложений в вихревых камерах // Материалы двенадцатой Всероссийской науч.-техн. конференции "Энергетика: экология, надежность, безопасность." - Томск: Изд-во ТПУ, -2006. С. 315-318.

2. Зыков Е.Г., Разва А.С., Василевский М.В. Исследование характеристик инерционных пылеотделителей // Материалы двенадцатой Всероссийской науч.-техн. конференции "Энергетика: экология, надежность, безопасность." - Томск: Изд-во ТПУ, -2006. С. 348-353.

3. Василевский М.В., Разва С.А., Зыков Е.Г., Логинов В.С. Надежность работы циклонов в аспирационных сетях // Современная техника и технологии в медицине, биологии и экологии: Материалы Международной научно-практической конференции. - Новочеркасск: ЮРГТУ, 2006. - С 32-36.

4. Некрасова К.В., Разва А.С., Зыков Е.Г., Василевский М.В. Определение связности сыпучих материалов // Энергетика: экология, надёжность, безопасность: Материалы докладов тринадцатой всероссийской научно-технической конференции - Томск, 2007. - Томск: ТПУ, 2007. - с. 234-238.

5. Е.Г. Зыков, М.В. Василевский, А.С. Разва, К.В. Некрасова. Об испытаниях и оценке надежности производственных систем обеспыливания газов

- //Материалы тринадцатой Всеросс.науч.-техн. конференции "Энергетика: экология, надежность, безопасность."–Томск: Изд-во ТПУ,- 2007. –С.218–222.
6. А.С. Разва, К.В. Некрасова, Е.Г. Зыков, М.В. Василевский. О трансформации дисперсной фазы в циклонном пылеуловителе //Материалы тринадцатой Всеросс.науч.-техн. конференции "Энергетика: экология, надежность, безопасность."–Томск: Изд-во ТПУ,-2007. –С.241–244.
7. Василевский М.В., Зыков Е.Г., Разва А.С. Особенность поведения дисперсной фазы в циклонных аппаратах. //Современные энергетические системы и комплексы и управление ими: Материалы VII Междунар. науч.-практ. конф. г. Новочеркасск, 2007. ч.2 с.32–36.
8. Разва А.С. Исследование сепарационных характеристик циклонного пылеуловителя //Теплотехника, экологические проблемы теплоэнергетики, теплофизика: Сборник статей студентов и аспирантов теплоэнергетического факультета Томского политехнического университета, 2007. - т. - № . - с. 85-89.
9. М.В. Василевский, Е.Г. Зыков, В.С. Логинов, А.С. Разва. Очистка воздуха от аэрозольных частиц в установках напорного пневмотранспорта цемента. // Цемент и его применение, 2007, № 6.– С.133–134.
10. Разва А.С. Исследование сепарационных характеристик циклона на связных пылях //Современная техника и технологии: XIII международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых - Томск, ТПУ, 26-30 марта 2007. - Томск: Изд. ТПУ, 2007. - с. 161-162.
11. Некрасова К.В., Разва А.С. О связности пыли и ее влиянии на образование отложений в циклонном аппарате //Энергетика: экология, надёжность, безопасность: Труды IX Всероссийского научно-технического семинара в 2-х томах. Т. 2 Теплоэнергетическое , экологическое и гуманитарное направление - Томск, ТПУ, 2007. - Томск: Изд. ТПУ, 2007. - с. 387-390.
12. Разва А.С., Зыков Е.Г., Некрасова К.В. Вихревой пылеуловитель с предварительной разгрузкой потока //Современные техника и технологии: Труды XIV Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых в 3-х томах - Томск, ТПУ, 2008. с. 398-400.
13. Некрасова К.В., Разва А.С., Зыков Е.Г., Василевский М.В.. Анализ взаимодействия дисперсного тела с наклонной поверхностью //Энергетика: экология, надёжность, безопасность : Материалы XIV Всероссийской научно-технической конференции - Томск, ТПУ. 2008. с. 142-145.
14. Некрасова К.В., Разва А.С., Зыков Е.Г., Василевский М.В. Распределение давлений в циклонном двухфазном потоке //Энергетика: экология, надежность, безопасность: Материалы докладов четырнадцатой всероссийской научно-технической конференции - Томск, ТПУ, 2008. - с. 146-150.
15. Василевский М.В., Зыков Е.Г. Разва А.С. Обеспыливание воздуха циклонными аппаратами в пневмотранспортных установках// Безопасность жизнедеятельности 2008, №1.–с. 46–49
16. Василевский М.В., Зыков Е.Г., Разва А.С., Логинов В.С. Обеспыливание воздуха циклонами в аспирационных сетях // Безопасность жизнедеятельности 2008, №2.– с. 2–6.

17. Василевский М.В., Зыков Е.Г., Логинов В.С., Разва А.С., Снежко В.Д. Очистка газов от золы за котлом КЕ-10/14 // Промышленная энергетика, 2008, № 1.– С.49-52.
18. Василевский М.В., Разва А.С., Зыков Е.Г., Некрасова К.В. О механизме формирования слоя из отсепарированных частиц в циклонном пылеуловителе //Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики: Материалы VI Всероссийской научной конференции - Томск, ТГУ, 2008. - с. 348-349.
19. Василевский М.В., Некрасова К.В., Зыков Е.Г., Разва А.С. Оценка связности дисперсного материала методом экструзии //Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики: Материалы VI Всероссийской научной конференции - Томск, ТГУ, 2008. - с. 346-347.
20. Василевский М.В., Некрасова К.В., Зыков Е.Г., Разва А.С. О механизме формирования отложений из сепарирующихся частиц на поверхности циклона //Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики: Материалы VI Всероссийской научной конференции - Томск, ТГУ, 2008. - с. 344-345.
21. Василевский М.В., Некрасова К.В., Разва А.С., Зыков Е.Г. Моделирование процесса отложений пыли на поверхностях циклонного газоочистителя //Энергетика: экология, надежность, безопасность: Материалы докладов четырнадцатой всероссийской научно-технической конференции, 2008. – Томск: ТПУ, с. 150-154.
22. М.В. Василевский, К.В. Некрасова, А.С. Разва, Е.Г. Зыков Оценка связности дисперсного материала из агрегированных частиц //Заводская лаборатория, 2009, т. 75, №5, с. 32–36.
23. М.В. Василевский, Е.Г. Зыков, В.С. Логинов, А.С. Разва, К.В. Некрасова, А.М. Литвинов, А.Ф. Глушко, В.А. Кузнецов. Устойчивость обеспыливания воздуха инерционными аппаратами в аспирационных сетях конвейерных систем.// Цемент и его применение, 2009, №1, с. 17–19.
24. Василевский М.В., Разва А.С., Зыков Е.Г. Некрасова К.В. О механизме формирования слоя из отсепарированных частиц //Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики : Материалы VI Всероссийской научной конференции - Томск, НИИ ПММ ТГУ, 2009. - с. 348-349.
25. Пылеотделитель: Патент №2325953 РФ / М.В. Василевский, Е.Г. Зыков, А.С. Разва, В.С. Логинов.– Бюл. №16, 2008.
26. Батарейный циклон: Патент 2366516 /Василевский М.В., Зыков Е.Г., Логинов В.С., Разва А.С., Некрасова К.В – Бюл. №25, 2009.

