

Зыков Евгений Геннадьевич

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБЕСПЫЛИВАНИЯ ГАЗОВ ПРИ
МОДЕРНИЗАЦИИ ПРОМЫШЛЕННЫХ СИСТЕМ ПЫЛЕ- И
ЗОЛОУЛАВЛИВАНИЯ С ИНЕРЦИОННЫМИ АППАРАТАМИ**

Специальности: 05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика

01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в Томском политехническом университете

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук,
доцент Логинов В.С.

Официальные оппоненты:

Доктор технических наук, профессор

Пузырев Е.М.

Доктор технических наук, профессор

Росляк А.Т.

Ведущая организация:

Научно-исследовательский институт прикладной механики и математики
при Томском государственном университете (г. Томск)

Защита состоится «_30_» декабря 2005 года в 15-00 часов на заседании
диссертационного совета К 212.269.04 в Томском политехническом университете по
адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, корпус 4, ауд. 406.

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

Автореферат разослан «29» ноября 2005г.

Ученый секретарь

диссертационного Совета К 212.269.04

Заворин А.С.

Актуальность работы

Стремительное развитие научно-технического прогресса на рубеже XX/XXI веков привело к значительному увеличению потребления энергоресурсов. На фоне увеличивающегося потребления каменного угля остро встает вопрос о защите атмосферного воздуха от загрязнения твердыми сажными и зольными частицами.

Надежность и эффективность работы систем газоочистки зависит от физико-химических свойств частиц, термодинамических параметров пылегазовой среды. Концентрация твердых частиц в дымовых газах, дисперсность уноса из котла зависит от технологических параметров проведения процесса сжигания топлива, особенностей оборудования, например, от вида топлива, способа пылеприготовления, методов его сжигания, конструктивных характеристик топочных устройств, совершенства ведения топочного процесса, вида топливоиспользующей установки и режима ее работы. Энергетические установки имеют переменный режим работы, т.е. переменные концентрации, расходы дымовых газов при изменении расхода топлива. Для котлов со слоевым сжиганием топлива при механической загрузке, а также в топках с шурующей планкой, характерна переменная во времени концентрация частиц в потоках дымовых газов, которая вызвана неравномерной подачей топлива. При проектировании и модернизации пыле- и золоулавливающего оборудования часто компоновочные соображения (размещение оборудования) являются основным звеном в принятии решения выбора метода обеспыливания и аппаратурного оформления необходимой системы газоочистки.

Наиболее эффективным осадителем является противоточный циклонный аппарата (ЦА) с собственным приемником пыли, в котором транспортирующий в него пыль поток газа в объеме замедляет движение и формируется слой, содержащий частицы, размером менее 10 мкм. Однако процессы сепарации в ЦА не являются устойчивыми при колебаниях концентрации частиц, термодинамических параметров потока и дисперсности пыли. Под устойчивостью здесь понимается сохранение условий эффективной очистки газов при изменяющихся параметрах потока (нестационарности концентрации, дисперсии пыли, физико-химических параметров среды).

Одиночный ЦА на большие расходы имеет относительно большие размеры. Групповые циклоны (ГЦ) и батарейные циклоны (БЦ) имеют меньшую высоту, а в элементах этих аппаратов реализуются большие центростремительные ускорения. В целом эффективность обеспыливания в них ниже, чем в одиночном противоточном циклоне, т.к. в пылеприемниках отсутствуют условия для формирования слоя из уловленных частиц.

Применяемые системы пыле- и золоулавливания с инерционными аппаратами работают с проектной эффективностью в узком диапазоне скоростей, концентраций, термодинамических параметров несущей среды. Энергетические установки, оборудованные БЦ, ГЦ, либо одиночными циклонами, не имеющие регулирующих приспособлений, осуществляют выброс золы, выше допустимого, что сказывается на общем уровне загрязнения атмосферного воздуха в районе размещения установок.

Об актуальности решения этих вопросов свидетельствует финансовая поддержка Федерального агентства по образованию Российской Федерации по ведомственной научной программе «Развитие научного потенциала высшей школы», подпрограмме 3: «Развитие инфраструктуры научно-технической и инновационной деятельности высшей школы и ее кадрового потенциала» – код проекта № 400, в свете которых выполнена работа.

Целью настоящей работы является разработка методов и средств совершенствования процесса обеспыливания дымовых газов при модернизации промышленных систем пыле- и золоулавливания с инерционными аппаратами.

Формулировка задач исследования

Для достижения цели исследования ставятся и решаются следующие задачи:

1. Анализ процесса обеспыливания газов и сравнительная оценка эффективности сепарации частиц в различных типах инерционных пыле- и золоуловителей. Выяснение причин нарушения устойчивости процесса сепарации пыли в противоточных циклонных аппаратах (ЦА), БЦ и ГЦ.
2. Оценка эффективности сепарации частиц с учетом турбулентной диффузии в инерционных аппаратах:
 - а) в криволинейном канале и вихревом разгрузителе-концентраторе (ВРК) с учетом конструктивных соотношений.
 - б) в прямоточном циклонном концентраторе (ПЦК) с учетом конструктивных соотношений и количества отводимого пылеконцентрата.
3. Разработка технических решений при проектировании систем обеспыливания в условиях нестационарности концентраций.
4. Разработка технических решений и инженерных методов расчета новых систем пыле- и золоулавливания на энергетических установках различной мощности.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Выполнена сравнительная оценка эффективности сепарации частиц в различных типах инерционных пыле- и золоуловителей.
2. Впервые показана возможность использования диффузионной модели процесса турбулентного переноса применительно к расчету сепарации частиц в криволинейных каналах и вихревых осадителях.
3. Получены новые выражения, показывающие зависимость эффективности сепарации частиц в ВРК и ПЦК от геометрических размеров аппаратов и количества отводимого с пылеконцентратом газа.

К наиболее значимым **практическим результатам** можно отнести:

1. Новый инженерный метод расчета установки пыле- и золоулавливания для очистки отходящих дымовых газов от промышленных теплоэнергетических установок различной мощности.
2. Расширена область применения результатов работы при проектировании систем обеспыливания в условиях нестационарности концентраций и при работе с нестационарными потоками, позволяющих повысить эффективность обеспыливания газов в инерционных аппаратах.
3. Результаты работы используются в учебных процессах кафедр теплофизики и гидромеханики, экологии и безопасности жизнедеятельности Томского политехнического университета.

Достоверность результатов

Обоснованность и достоверность полученных результатов подтверждена проверкой адекватности разработанных в диссертации моделей физическим процессам в конкретных аппаратах, а также подтверждается испытаниями реализованных разработанных технических решений в производственных условиях.

Положения, выносимые на защиту

1. Сравнительная оценка эффективности сепарации частиц в различных типах инерционных пыле- и золоуловителей теплоэнергетических установок.
2. Применение диффузионной модели движения аэрозоля применительно к расчету эффективности сепарации частиц в инерционных аппаратах.
3. Новые технические решения по повышению эффективности процесса обеспыливания дымовых газов в теплоэнергетических установках, работающих в режимах нестационарных по концентрациям, дисперсному составу и расходу газовых потоках.
4. Инженерный метод расчета промышленного золоуловителя для очистки отходящих дымовых газов от теплоэнергетических установок различной мощности.

Личный вклад автора. Постановка проблемы и задач исследований, обсуждение результатов выполнены с участием научного руководителя д.ф.-м.н. Логинова В.С. Под непосредственным руководством научного консультанта к.т.н. Василевского М.В. автором были разработаны модели, проведены расчеты процессов сепарации частиц с учетом турбулентной диффузии в инерционных аппаратах; осуществлено проектирование, наладка и испытание разработанных промышленных систем пыле- и золоулавливания.

Апробация работы

Содержание и основные результаты исследований в период с 2001. по 2004г. рассмотрены и доложены на российских, международных и региональных конференциях и семинарах: Международный научный симпозиум им. академика М.А. Усова (г. Томск: ТПУ, 2001, 2002, 2003, 2004 г.г.); Всероссийская научно-техническая конференция: «Энергетика: экология, надежность, безопасность» (г. Томск: ТПУ, 2002, 2003, 2004 г.г.); Всероссийская научно-практическая конференция по проблемам природопользования и охраны окружающей среды (г. Томск, 2003г.); Университетская научно-практическая отчетная конференция студентов факультетов ЕНМФ и ФТФ (г. Томск: ТПУ, 2003г.); Всероссийская научная конференция: «Экономике России – энергию молодых» (г. Томск, 2003г.); IX Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых: «Современные техника и технологии» (г. Томск: ТПУ, 7-11 апреля 2003г.); Международная конференция «Сопряженные задачи механики, информатики и экологии» (Томский госуниверситет, 5-10 июля 2004г.); 8-й международный симпозиум KORUS-2004; IV Всероссийская научная конференция «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики» (Томский госуниверситет, 5-7 октября 2004г.).

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 24 работы, включая 2 статьи в центральной печати, получен патент РФ.

Объем и структура диссертации.

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, трех приложений и списка цитируемой литературы (125 наименований). Она содержит 175 страниц текста, включая 5 примеров, 38 рисунков и 21 таблицу.

Основное содержание работы

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

Первая глава посвящена обзору литературы по типам аппаратов, гидромеханике и характеристикам течений, эффективности обеспыливания инерционных пыле- и золоуловителей. Имеется большой опыт исследований аэромеханических процессов в вихревых камерах различного назначения, представленный в работах В.А.Шваба, А.Н. Штыма, Э.Н. Сабурова, Э.П. Волчкова, И.И. Смутьского. Анализ литературных данных показывает о большом многообразии конструкций инерционных пылеотделителей, созданных к настоящему времени. Но до сих пор нет четких рекомендаций по выбору конкретной конструкции пылеотделителя, обеспечивающей эффективную очистку при различных условиях эксплуатации аппарата.

Существуют специализированные инерционные аппараты по разгрузке потоков (разгрузитель-пылеуловитель НИИ ПММ), так и обеспыливаю газы (ЦН-11, СК-ЦН-33, СК-ЦН-34, СК-ЦН-34М). Разработка этих аппаратов ведется в основном, опираясь на методы расчета с использованием экспериментальных данных в предположении, что фракционная эффективность описывается интегральной нормально-логарифмической функцией. Отсутствие моделей расчета эффективности сепарации частиц в системах пыле- и золоулавливания в зависимости от геометрических размеров и отводимого пылеконцентрата не позволяет создавать новые конструкции газоочистителей, способных производить высокоэффективное обеспыливание дымовых газов в реальных промышленных условиях.

На основе анализа опубликованного в литературе теоретического и экспериментального материала поставлены задачи настоящего исследования.

Во второй главе дан анализ гидродинамической устойчивости потоков в противоточных циклонных аппаратах, приводится оценка эффективности сепарации частиц с учетом турбулентной диффузии в криволинейном канале, ВРК, ПЦК. Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что увеличение количества витков сепарационного канала не приводит к повышению эффективности сепарации частиц. Получены выражения, показывающие зависимость эффективности сепарации в ВРК и ПЦК от геометрических размеров аппаратов и количества отводимого пылеконцентрата.

Представлен анализ гидродинамической устойчивости потоков в противоточном циклонном аппарате (ЦА). Получены расчетные соотношения для определения перепада давления по высоте циклона на фиксированной линии тока, в зависимости от показателя степени в уравнение распределения окружных скоростей.

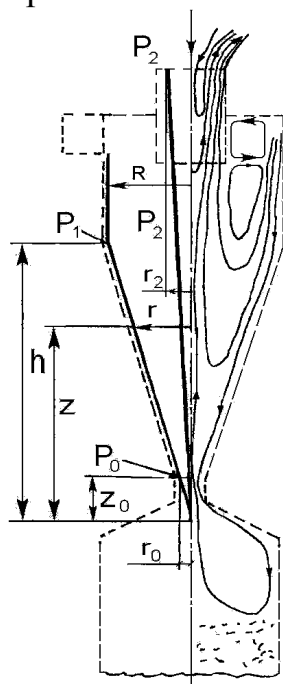


Рис. 1. Схема Рис. 1. Схема линий тока газа в противоточном коническом циклоне

Перепады давления по радиусу в безразмерном виде запишется следующим образом:

$$\overline{\Delta P_{1-2}} = \overline{P_1} - \overline{P_2} = \frac{\overline{r_2}^{-2n_R - 1}}{2n_R}, \quad (1)$$

а выражение перепада давления по высоте ЦА для выделенной линии тока имеет вид

$$\overline{\Delta P_{1-0}} = \frac{\overline{z_0}^{-2n - 1}}{2n}, \text{ при } n \neq 0; \overline{\Delta P_{1-0}} = -\ln \overline{z_0}, \text{ при } n = 0. \quad (2)$$

Здесь n_R показатель степени в уравнение распределения окружных скоростей для верхней части циклона, а n – показатель степени в уравнении распределения окружных скоростей для выделенной гипотетической линии тока по высоте циклона.

Для конического ЦА (рис. 1), n_R меняется в диапазоне $0,47 \div 0,35$. Примем среднее значение $n_R = 0,41$. Для незапыленного потока $n_R = 0,41$, $\overline{\Delta P_{1-2}} = 1,97$, $\overline{\Delta P_{1-0}} = 5,28$, тогда $n = n_R = 0,41$. Для запыленного потока $n_R = 0,41$, $\overline{\Delta P_{1-2}} = 1,97$, $\overline{\Delta P_{1-0}} = 0,99$, и $n = -0,5$.

Крутка потока зависит от запыленности газа: с увеличением запыленности крутка падает, изменяется перепад давления по высоте ЦА, что снижает интенсивность аксиального потока в пылевыводное отверстие и изменение количества потока в пылеприемник, устойчивость газоочистки снижается. Зная перепад давления по высоте ЦА, можно прогнозировать крутку потока: в случае выравнивания давления по высоте, получаем информацию о том, что эффективность циклона близка к нулю.

Приводится оценка эффективности сепарации частиц с учетом турбулентной диффузии в криволинейном канале. На рис. 2 представлен криволинейный канал – пылеуловитель.

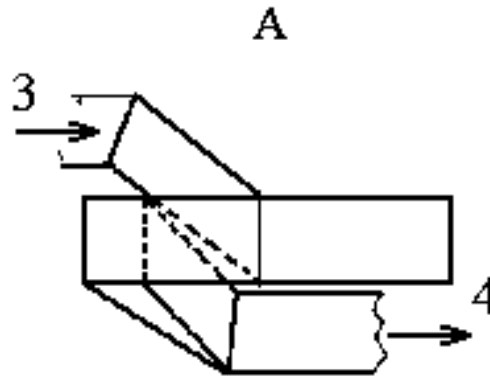
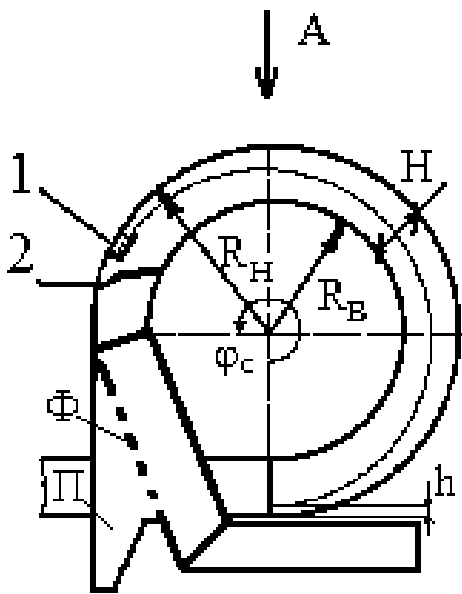


Рис. 2. Криволинейный канал – пылеуловитель

П – пылеприемник, Ф – фильтр; 1 – расчетные распределения концентрации частиц без учета турбулентного перемешивания; 2 – расчетные распределения концентрации частиц с учетом турбулентного перемешивания; 3 – входящий запыленный поток, 4 – выходящий очищенный поток.

П
ри
повор
оте
потока
пыль
конце
нтрир
уется
у
внешн
ей
стенки
,
поступ
ает с
небольш
ой
частью
ю газа
в

пылеприемник П. В приемнике эта часть газа фильтруется через фильтр Ф и проходит обратно в газоход. Показана линия траектории частицы, которая во входном сечении криволинейного канала находится на расстоянии h от внешней стенки, а после поворота на угол φ_c попадает в приемник П с некоторой частью газа, показаны также расчетные распределения концентраций частиц без учета турбулентного перемешивания и с учетом этого влияния

Рассмотрим турбулентное течение аэрозоля в криволинейном канале высотой H , шириной B и средним радиусом $R_C \gg H$.

Уравнение переноса частицы при турбулентном движении аэрозоля имеет вид

$$\frac{\partial}{R_C \partial \varphi} (\bar{C} \bar{V}_\varphi + \bar{C}' V'_\varphi) + \frac{\partial}{\partial X} (\bar{C} \bar{V}_x + \bar{C}' V'_x) = 0, \quad (3)$$

где $\bar{V}_x = \Delta U$ – скорость движения частицы относительно газа в поперечном направлении, м/с; $\bar{C} \bar{V}_\varphi$, $\bar{C}' V'_\varphi$ – осредненная и диффузионная скорость потока частиц в окружном направлении; $\bar{C} \bar{V}_x$, $\bar{C}' V'_x$ – осредненная и диффузионная скорость потока частиц в поперечном направлении; R_C – средний радиус канала, м; X – расстояние от внутренней стенки канала, φ – координата в окружном направлении, рад; \bar{C} , C' – осредненная и пульсационная концентрация частиц в потоке.

Осредненная скорость потока частиц в окружном направлении больше диффузионного потока в этом же направлении $\bar{C} \bar{V}_\varphi \gg \bar{C}' V'_\varphi$, поэтому определяющее значение имеет поток в поперечном направлении. Коэффициент турбулентной диффузии частиц равен коэффициенту турбулентной диффузии газа, и диффузионная скорость потока частиц в поперечном направлении противоположна

градиенту концентрации в этом же направлении $\overline{C'V'_x} = -\varepsilon \frac{\partial C}{\partial X}$, где ε – коэффициент турбулентной диффузии. Тогда уравнение переноса (3) запишется в следующем виде

$$\frac{\partial}{R_c \partial \varphi} (\overline{C V_\varphi}) + \frac{\partial}{\partial X} (\overline{C V_x} - \varepsilon \frac{\partial C}{\partial X}) = 0. \quad (4)$$

Концентрация частиц на входе постоянна и равномерна по всему сечению канала. Суммарный поток в радиальном направлении вблизи стенок за счет центробежных сил и турбулентной диффузии частиц равен нулю (условие непроницаемости стенки). С учетом этого граничные условия имеют вид (знак осреднения $\bar{\quad}$ опускаем)

$$C(0, x) = C_{BX}, \left(C \Delta U - \varepsilon \frac{dC}{dX} \right) \Big|_{x=0} = 0, \left(C \Delta U - \varepsilon \frac{dC}{dX} \right) \Big|_{x=1} = 0. \quad (5)$$

При расчете приняты следующие допущения. Частицы не взаимодействуют между собой, имеют сферическую форму, высота газохода много меньше радиуса искривления $R_c \gg H$, распределение тангенциальных скоростей вдоль канала и по радиусу равномерно, для частиц и газа одинаковы ($W_\varphi = V_\varphi$), радиальная скорость газа равна нулю $W_r = 0$, тогда радиальная скорость частицы $\overline{V_x} = \Delta U = \tau \frac{V_\varphi^2}{R_c}$.

Введем безразмерные параметры $w_0 = \frac{W_0 H}{\varepsilon}$; $r_c = \frac{R_c}{H}$; $x = \frac{X}{H}$; $\varphi_p = \varphi \frac{W_0}{r_c}$, (φ_p – в радианах); $c = C/C_{BX}$, $\alpha = \Delta U H / \varepsilon$, где W_0 – скорость газа на входе, м/с; $\varepsilon = 0,5 (1/4) \chi (\lambda / 8)^{0,5} W_0 (R_H - R_B)$, $\chi = 0,4$ – константа турбулентности, $\lambda = 0,01 \div 0,05$ – коэффициент трения.

Решение уравнения (4) с граничными условиями (5) найдено классическим способом – методом разделения переменных (метод Фурье).

Общее решение выражения распределения концентрации частиц в криволинейном канале имеет вид.

$$C(\varphi, x) = \frac{\alpha e^{\alpha x}}{e^\alpha - 1} + \alpha e^{\frac{\alpha x}{2}} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{1 - e^{-\frac{\alpha}{2}} \cos \beta_n - \alpha \frac{e^{\frac{\alpha}{2}} \cos \beta_n - 1}{e^\alpha - 1}}{\frac{\alpha^2}{4} + \beta_n^2} \right] \left(\cos \beta_n x + \frac{\alpha}{2 \beta_n} \sin \beta_n x \right) \rightarrow$$

$$\rightarrow \cdot \exp \left[- \left(\frac{\alpha^2}{4} + \beta_n^2 \right) \varphi \right]. \quad (6)$$

где $\beta_n = \pi n$, $n = 1, 2, 3, \dots$

Фракционная эффективность сепарации частиц для условно «стационарного» движения потока запишется в виде

$$\eta_i = 1 - \frac{1}{x_0} \int_0^{x_0} c_{cp} dx = 1 - \frac{1}{x_0} \frac{\exp(\alpha x_0) - 1}{\exp(\alpha) - 1}. \quad (7)$$

Анализ выражения (6) показал, что для мелких частиц процесс разделения концентрации частиц аэрозоля в криволинейном канале завершается на $3/4$ витка. В то время как при расчете эффективности по методу траекторий, процесс разделения происходит непрерывно с увеличением количества витков. При этом эффективности оказываются настолько высокими, что улавливаются частицы менее 1 мкм . Согласно этому методу расчета была сконструирована модель многовиткового сепаратора, не подтвердившая расчет эффективности сепарации частиц по методу траекторий.

Результаты расчета фракционной эффективности сепарации частиц по выражению (7) в криволинейном канале средним радиусом $0,4 \text{ м}$ представлен на рис. 3. Расчет по (6) показывает, что неучет турбулентного перемешивания при расчете эффективности сепарации частиц может привести к завышенным значениям эффективности сепарации в криволинейном канале, что в свою очередь может привести к созданию неоправданных конструкций инерционных аппаратов.

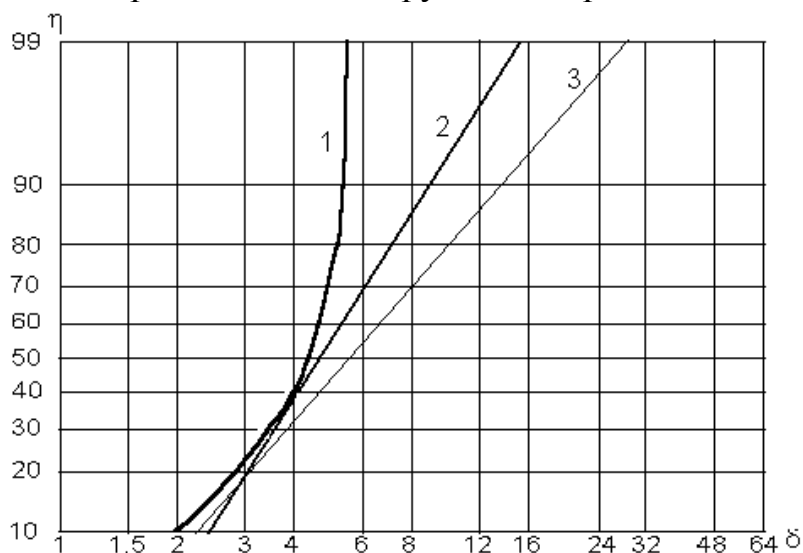


Рис. 3. Фракционная эффективность разделения аэрозоля в канале средним радиусом $0,4 \text{ м}$:
 1 – расчет по методу траекторий (полвитка),
 2 – расчет с учетом перемешивания частиц,
 3 – эксплуатационная кривая эффективности дымососа пылеуловителя ДП-8.

Рассмотрим схему расчета эффективности сепарации частиц с учетом турбулентной диффузии для вихревого разгрузителя-концентратора (ВРК). В аппаратах типа ВРК или инерционные пылеуловители улиточного типа, разгрузка потока от пыли происходит в приёмнике-накопителе, в котором эффект выделения усиливается за счет предварительного концентрирования частиц в криволинейном канале аппарата и придания дополнительного количества движения частицам вниз суммированием с гравитационным воздействием. Подобные инерционные пылеуловители применяются в качестве разгрузителей потока от пыли, в качестве самостоятельных осадителей крупных частиц. Выделение частиц происходит при

повороте потока, причем 5÷10 % потока с концентратом пыли проходит в приемник. Также применяют подобные аппараты в качестве концентраторов, с отводом части газа в другой пылеуловитель, обычно противоточный ЦА.

На рис. 4. представлена расчетная схема ВРК. Газ поступает в достаточно длинную вихревую камеру длиной L с радиусом выхода R_1 и радиусом корпуса R_2 , с радиальным переносом закрученного течения к центру: газ частично с концентратом пыли поступает в приемник и в сепарационный объем, который находится между цилиндрическими поверхностями с радиусами R_2 и $R_{\text{я}}$, далее в радиальном направлении проходит через поверхность с радиусом R_1 в приосевую область и выходит из сепаратора. На рис. 4 обозначено: 1 – входящий запыленный поток, 2 – отвод пылеконцентрата в выносной пылеосадитель.

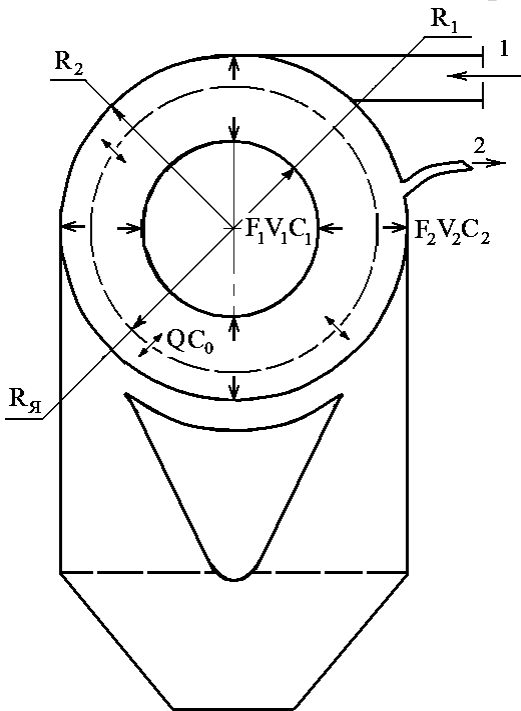


Рис. 4. Расчетная схема ВРК

Течение будем считать осесимметричным, плоским. Схема распределения потоков частиц, которая реализуется в сепараторе следующая: ввод аэрозольных частиц осуществляется через поверхность $2\pi R_{\text{я}} L$, где $R_{\text{я}}$ – радиус ядра потока. На цилиндрических поверхностях с радиусами R_1, R_2 (площадью F_1, F_2) стрелками показано направление потоков частиц, выносимых из аппарата и выделяющихся из газа. $\bar{C}_1 \bar{V}_1, \bar{C}_2 \bar{V}_2$ – потоки частиц в радиальном направлении за счет турбулентной диффузии и сил инерции. Поток частиц за счет сил инерции $\bar{C}_2 \bar{V}_2$ осесимметрично организован по всей поверхности $2\pi R_{\text{я}} L$, а в погранслое частицы переносятся в приемник или отводятся в выносной циклон. Здесь Q – расход газа, C_0 – концентрация частиц i -го размера в поступающем газе с расходом Q .

Запишем уравнение переноса дисперсной фазы фиксированной фракции в цилиндрической системе координат. Течение газа принимается осесимметричным, стационарным.

$$\frac{d}{dR} R \left(C \Delta U - \varepsilon \frac{dC}{dR} \right) = \frac{QC_0}{2\pi R_{\text{я}} L}. \quad (8)$$

Поток $\bar{C}_2 \bar{V}_2$ направлен к стенке и положителен, т.к. определяется инерционными силами. Поток $\bar{C}_1 \bar{V}_1$ направлен внутрь потока и отрицателен, поскольку организован силами рассеяния.

Таким образом, граничные условия имеют вид (знак осреднения $\bar{\quad}$ опускаем)

$$\left(C \Delta U - \varepsilon \frac{dC}{dR} \right) \Big|_{R=R_2} = C_2 V_2; \quad \left(C \Delta U - \varepsilon \frac{dC}{dR} \right) \Big|_{R=R_1} = -C_1 V_1. \quad (9)$$

Приняты следующие допущения. Частицы не взаимодействуют между собой, имеют сферическую форму, присутствие частиц не влияет на движение газа, распределение тангенциальных скоростей для частиц и газа одинаковы ($W_{\varphi} = V_{\varphi}$), осредненная

скорость частиц в окружном направлении много больше диффузионного потока в этом же направлении $\overline{C} \overline{V}_\varphi \gg \overline{C}' \overline{V}'_\varphi$. Определяющее значение имеет поток в радиальном направлении, коэффициент турбулентной диффузии частиц равен коэффициенту турбулентной диффузии газа, диффузионная скорость потока частиц в радиальном направлении обратно пропорциональна градиенту концентрации в этом же направлении. Динамическая скорость равна скорости турбулентной диффузии $V_{*1} = \sqrt{W_{\varphi 1} W_{r1}} = V_1$, т.к. динамическая скорость определяет интенсивность турбулентной диффузии в ядре; $g \tau \leq V_2 \leq \Delta U_2$, $V_2 = \eta_2 \Delta U_2$ условие уменьшения скорости отвода частиц из ядра потока из-за возврата части пыли из приемника в сепарационный объем. Здесь ΔU – осредненная скорость частицы относительно газа в радиальном направлении, ΔU_2 – скорость газа в окрестности стенки R_2 в радиальном направлении за счет сил инерции; ε – коэффициент турбулентной диффузии.

Распределение ΔU по R аппроксимируем зависимостью $\Delta U = A_K/R$, где A_K находится из условия равенства силовых функции аппроксимации и реальных сил

$$\int_{R_1}^{R_2} \frac{A_K}{R} R dR = \int_{R_1}^{R_2} \Delta U R dR, \text{ т.е. } A_K = \frac{1}{R_2 - R_1} \int_{R_1}^{R_2} \Delta U R dR.$$

Уравнение (8) с граничными условиями (9) решаются в безразмерном виде, причем $\alpha = \frac{\Delta U_{\Pi} R_{Я}}{\varepsilon}$, $r = R/R_{Я}$, $c = C/C_0$, $q = \frac{Q}{2\pi \varepsilon L}$. Здесь Q – расход газа, ΔU_{Π} –

реальная скорость частицы относительно газа. Величина ε – коэффициент турбулентной вязкости газа, рассчитывается по методу профессора В.А. Шваба. $\varepsilon = (0.01 + 0.56M) R_2 W_{ВХ} \xi M$, $M = (F_{ВХ} / 2\pi R_2 L \xi)^{0.5}$, $n = [M / (0.01 + 0.56M)] - 1$, $W_{\varphi 2} / W_{ВХ} = \xi$ – коэффициент падения скорости (или коэффициент сохранения скорости).

Относительная величина прохода частиц в унос после интегрирования определится как

$$\varepsilon_y = \frac{c_1 \varrho_{*1} r_1}{q(r_2 - r_1)} = \frac{\left\{ \left(1 - \frac{r_1}{r_2}\right) (1 - \eta_2) \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^\alpha + \eta_2 \frac{r_1}{r_2} \frac{1}{\alpha - 1} \left[1 - \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^{\alpha-1}\right] \right\}}{\left[\eta_2 \left(\frac{\alpha}{\varrho_{*1} r_1} + 1\right) + \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^\alpha (1 - \eta_2) \right] \left(1 - \frac{r_1}{r_2}\right)}. \quad (10)$$

Выражение (10) представляет фракционный унос аэрозольных частиц из ядра турбулентным диффузионным потоком.

Фракционная эффективность улавливания частиц в ВРК в зависимости от коэффициента отвода частиц из ядра потока представлена на рис. 5. Пунктиром представлена эффективность улавливания частиц рассчитанная по методу траекторий. Положим, что $\eta_2 = 0.3$ соответствует уносу при одном приемнике ВРК, $\eta_2 = 1.0$ соответствует уносу при отводе концентрата в выносной ЦА и осаждении в приемнике ЦА.

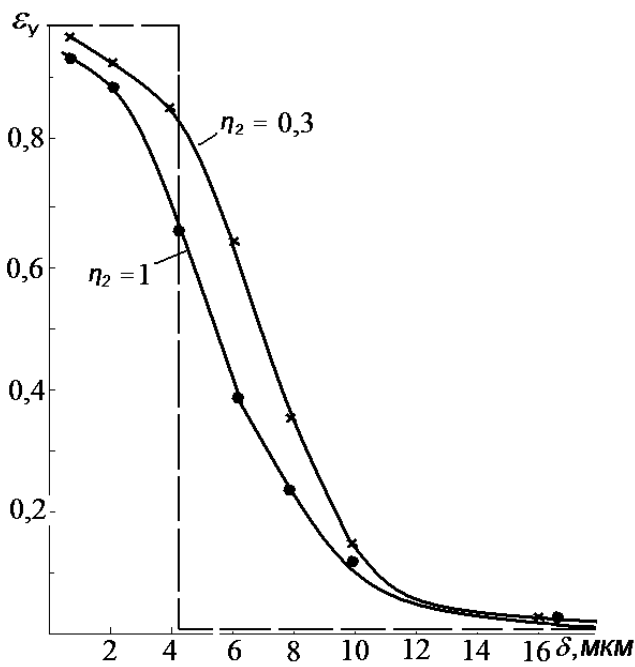


Рис. 5. Фракционный унос пыли из вихревого пылеуловителя

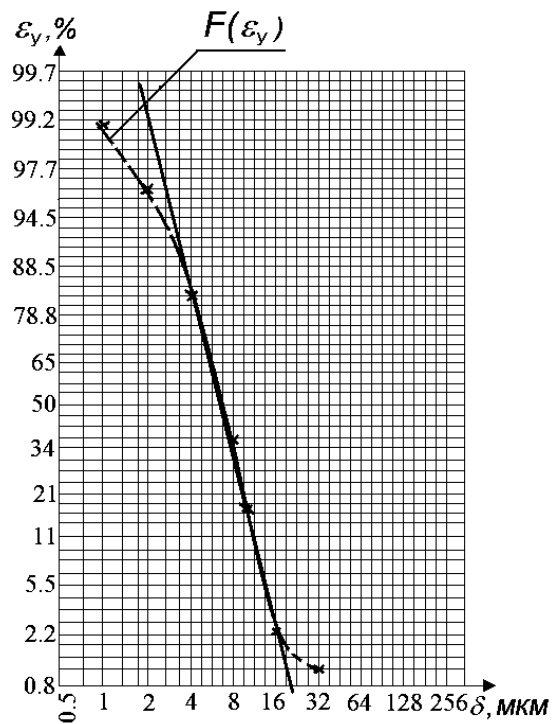


Рис. 6. Фракционный унос пыли из вихревого пылеуловителя

На рис. 6 представлена фракционная эффективность сепарации частиц при коэффициенте отвода частиц из ядра потока равном 0,3 в вероятностно-логарифмических координатах. Пунктиром представлен фракционный унос частиц, рассчитанный по (10) при $\eta_2 = 0.3$; прямой представлена аппроксимационная кривая, проведенная через точки δ_{16} и δ_{84} (мкм), соответствующие размеру частиц, улавливаемых с эффективностью 16 % и 84 % соответственно.

Предлагается по аппроксимационной кривой и фракционному распределению пыли найти общий коэффициент очистки газа по известному соотношению. Расчет ведется в предположении, что фракционное распределение пыли также описывается вероятностно-логарифмической функцией. Расчеты показывают, что унос с учетом диффузионного переноса при очистке от пыли цемента оказывается в 3 раза большим значения уноса, рассчитанного по методу траекторий.

Таким образом, разработанный метод расчета эффективности сепарации частиц в вихревых и циклонно-вихревых камерах позволяет проводить расчеты с учетом конструктивных размеров аппарата.

Рассмотрен процесс сепарации частиц с учетом турбулентной диффузии в прямоточном циклонном концентраторе (ПЦК). Для него известна модель сепарации с учетом турбулентного переноса, но при расчетах использовалась упрощенная схема движения газов, что привело к завышенным значениям эффективности при расчете аппаратов с большим значением крутки потока и относительным размером выхлопного патрубка меньше 0,7.

Метод расчета использован такой же, как и в известных работах, однако в полученных выражениях для эффективности учтено количество отводимых с пылью

газов, а результат расчетов для меньших относительных значений диаметра выхлопного патрубка в большей мере соответствуют экспериментальным данным.

Процессы сепарации частиц в ПЦК будут определяться скоростью в центральном потоке газа W_1 и скоростью в периферийном потоке газа W_2 , который в свою очередь будет зависеть от количества газов, отводимых из циклона в дополнительный пылеотделитель $Q_{отв}$.

Выражение эффективности ПЦК при $\nu > 2$, $\nu R_{\pi}^{2\nu+2} \approx 0$, будет иметь вид

$$\eta_G \approx \frac{K(1 - R_{\pi}^{2\nu+2})}{(1 - R_{\pi}^2) \left\{ (1 - K)R_1^{2\nu} + \frac{K}{(1 - R_{\pi}^2)} [1 - R_{\pi}^{2\nu+2}] \right\}}. \quad (11)$$

В расчетах использовались следующие безразмерные величины: $\bar{R} = \frac{R}{R_2}$, $\bar{R}_1 = \frac{R_1}{R_2}$,

$\bar{R}_{\pi} = \frac{R_{\pi}}{R_2}$; $Q_{отв}/Q_{вх} = K$; $2\nu = \frac{\Delta U R_2}{\varepsilon}$. Здесь R_1, R_2, R_{π} – радиус выхлопного

патрубка, наружный радиус корпуса, радиус пылевыводного отверстия ПЦК; ΔU – скорость частицы относительно газа; W_{π} – средняя скорость потока запыленного газа в ПЦК; $\nu = f(Stk, W_{\pi} R_2 / \varepsilon)$ представляет собой функцию, изменяющуюся от скорости частиц относительно газа.

Расчеты эффективности сепарации частиц в ПЦК по разработанной уточненной модели удовлетворительно совпадают с экспериментальными данными. Полученное выражение позволяет провести анализ работы проточных сепараторов в зависимости от конструктивных соотношений и количества отводимого пылеконцентрата, наметить пути повышения эффективности сепарации пыли.

В третьей главе представлена установка газоочистки с противоточными циклонами, позволяющая проводить устойчивую, эффективную очистку воздуха в производственных установках в условиях нестационарности потоков (пневмотранспорт цемента). Пневмотранспорт тонкодисперсных материалов и технологические линии переработки дисперсных материалов посредством напорного пневмотранспорта относятся к производственным процессам с нестационарностью рабочего потока. Материал, при рабочих режимах, движется в транспортной линии поршнями (пробками). При этом в промежутки времени поступления поршня количество входящего воздуха минимально, а в промежутках между поршнями – максимально.

В результате проведения тестовых испытаний обнаружилось, что эффективность циклона СК-ЦН-34 диаметром 90 мм не превышает 40 %, при этом в условиях нестационарности потоков выделяющаяся в приемнике пыль в определенный момент времени подхватывалась потоком и уносилась из циклона. Для повышения устойчивости процесса газоочистки применили следующие технические решения: устройства для успокоения жгутов пыли, транзит – приемники, устройства для регулирования потоков. Применение устройств для успокоения жгутов пыли и транзит – приемников позволило произвести лучшее концентрирование потоков, привело к затуханию крутки потока, успокоению жгутов и устойчивому формированию слоя частиц. Использование устройств для

регулировки потоков позволило работать при различных технологических режимах. Разработанная автором схема газоочистной установки приведена на рис. 7. Она получила применение в производственных условиях завода ЖБИ-27 г. Томск.

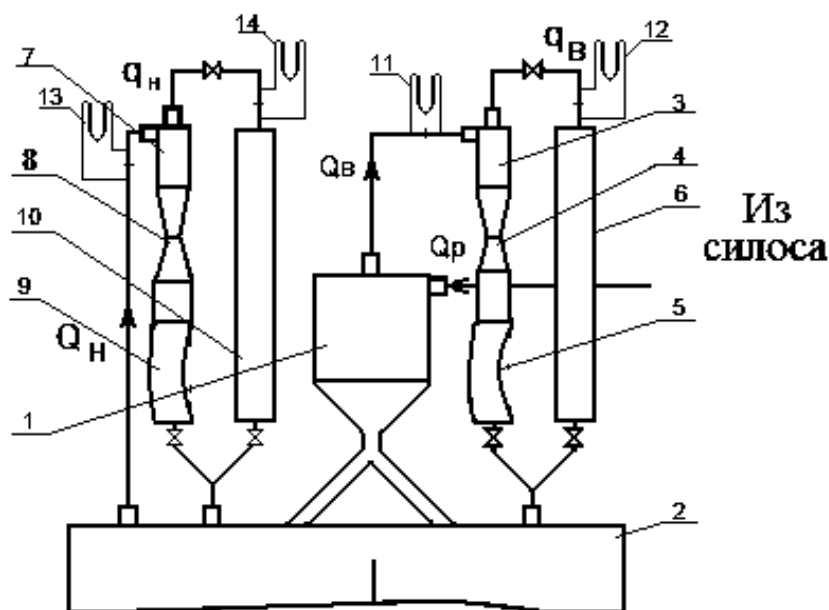


Рис. 7. Схема газоочистной установки

Принцип работы установки следующий. Воздух из разгрузителя 1 с высокой концентрацией частиц проходит в приемник 2, где освобождается от сгустков частиц и далее в циклон 7. Из циклона 7 воздух с меньшим содержанием частиц выводится в рукавный фильтр 10, а воздух с повышенной концентрацией частиц через успокоитель потока 8 поступает в фильтрующий приемник 9. Воздух из разгрузителя 1 с меньшей концентрацией частиц проходит в циклон 3 и далее разделяется на два потока: поток с меньшей концентрацией частиц направляется на фильтрацию в рукавный фильтр 6, а другой поток через успокоитель потока 4 поступает в фильтрующий приемник 5. При таком соотношении потоков, процесс транспортировки материала и очистки воздуха проходит стабильно и эффективно: зависания материала в разгрузителе не наблюдается, сопротивление системы очистки возрастает незначительно; вынос пыли в фильтры 6 и 10 составляет менее 0,003 % от количества пыли поступившей в разгрузитель.

Получены новые технические решения по повышению эффективности очистки газов в групповых циклонах. В работе приведены различные схемы, рекомендуемые для применения в зависимости от удобства компоновки, расходов газа и запыленности очищаемой среды. Наиболее рациональной из них является схема газоочистки, представленная на рис. 8, в которой приняты следующие обозначения: 1 – входящий запыленный поток, 2 – вихревой сепаратор-осадитель, 3 – групповой циклон, 4 – выносной циклон, 5 – дымосос, 6 – очищенный газ.

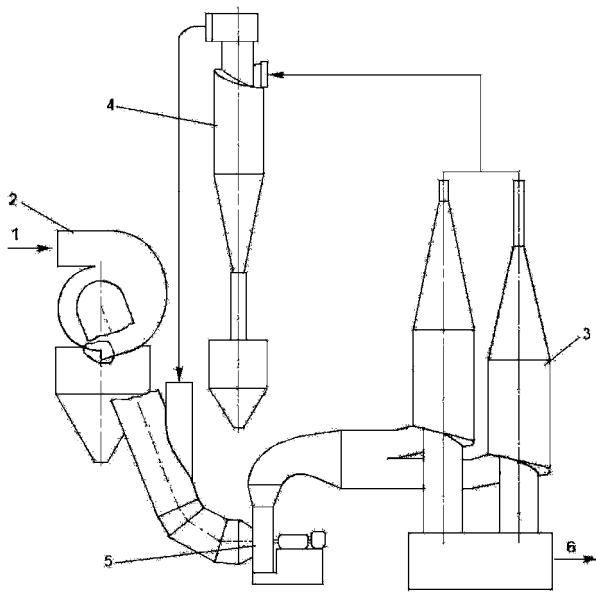


Рис. 8. Схема очистки газов с рециркуляцией

$$\eta_i = 1 - (1 - \eta_Q)(1 - \eta_p) / [1 + \eta_q k - \eta_Q(1 - \eta_q)]$$

сгустков частиц, с одновременным снижением исходной запыленности газов, а также осуществлять концентрирование потоков. Разгрузка потока осуществляется в аппаратах – разгрузителях типа криволинейные каналы, спирально-вихревые камеры, а концентрирование потоков осуществляется в пылеконцентраторах, типа ПЦК, ВРК.

Представлены результаты обследования промышленных батарейных циклонов (БЦ). Сделан анализ выбросов от котлоагрегатов КЕ 10/14 котельной ОАО «Шахта Заречная» (г. Полысаево Кемеровская область) на основании осуществленных отборов проб.

Представлены работы по проектированию системы пыле- и золоулавливания с повышенной устойчивостью процесса газоочистки на котельной ОАО «ш. Заречная». За основу системы газоочистки из удобства компоновки принята схема ВРК (с регулировкой потока) и ПЦК, снабженные выносными ЦА с транзит-приемниками. При разработке ВРК были использованы технические решения НИИ ПММ г. Томск.

На рис. 9 приведено компоновочное решение предлагаемой системы пыле- и золоулавливания.

Под схемой приведена расчетная формула для определения фракционной оценки эффективности сепарации частиц. Здесь $\eta_i, \eta_Q, \eta_q, \eta_p$ – фракционные эффективности очистки газа в системе, элементе группового аппарата, выносном циклоне – осадителе, вихревом разгрузителе; $k = q/Q$ – количество отводимых с пылеконцентратом газов через выносной циклон; q, Q – расходы газа через выносной циклон и через концентратор.

Таким образом, чтобы процесс газоочистки в противоточных циклонах проходил устойчиво, необходимо осуществлять подготовку потока – разгрузку от крупных примесей и

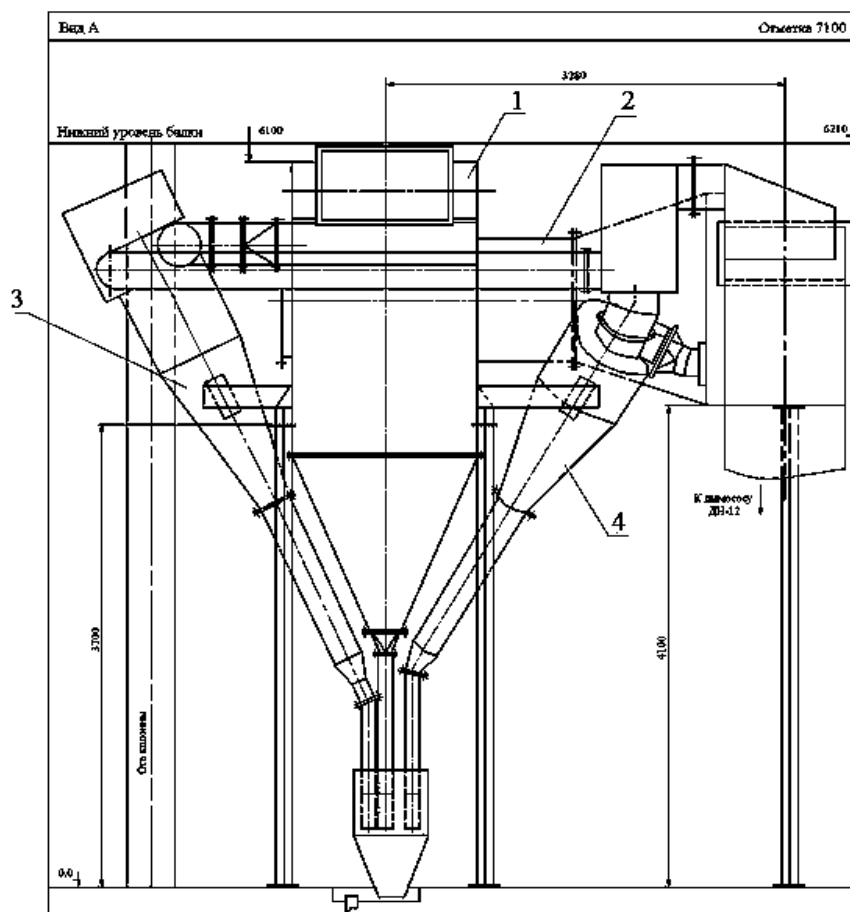


Рис. 9. Компоненка системы пыле- и золоулавливания

Принцип работы установки следующий: запыленный газовый поток поступает в ВРК 1, снабженный собственным пылесборным бункером, где происходит осаждение крупных частиц. Неотсепарированные в пылесборном бункере ВРК частицы концентрируются на стенке и выводятся в выносной циклон ВРК 3, где происходит осаждение частиц. Очищенный газ из циклона присоединяется к основному очищенному потоку. Очищенный от крупных частиц в ВРК поток поступает в ПЦК 2. Здесь тонкая пыль концентрируется и выводится в выносной циклон ПЦК 4, где происходит осаждение частиц. Очищенный газ из циклона присоединяется к основному очищенному потоку. Основной очищенный от пыли поток из ПЦК поступает на вход дымососа. Концентрат из ВРК и ПЦК отводится в противоточные ЦА, снабженные транзит-приемниками для успокоения жгутов пыли, где происходит уменьшение крутки потока, затухание несущего вихря и успокоение жгутов пыли. В транзит-приемниках происходит непрерывное затухание потоков, что способствует формированию насыпного слоя, содержащего частицы размером менее 10 мкм. Благодаря применению циклонов с транзит-приемниками происходит высокоэффективная сепарация тонкой пыли, а благодаря применению регулирующих устройств на ВРК осуществляется настройка работы оборудования в зависимости от режима работы котла.

Выражение фракционной эффективности сепарации частиц на представленной схеме имеет следующий вид

$$\eta_i = 1 - (1 - \eta_0) [1 - \eta_3 \{ \eta_2 - \eta_1 \eta_2 + \eta_1 \}], \quad (12)$$

где η_0 , η_1 , η_2 , η_3 – эффективность осаждения частиц в пылесборном бункере ВРК; эффективность концентрации частиц в ВРК; эффективность выделения частиц из газа в ПЦК и ЦА.

На рис. 10 приведена эксплуатационная кривая эффективности разработанной системы пыле- и золоулавливания. Точками представлены значения фракционной эффективности системы пыле- и золоулавливания, рассчитанные по (12) с использованием (10) и (11); прямой представлена аппроксимационная кривая, проведенная через точки δ_{16} и δ_{84} (мкм), соответствующие размеру частиц, улавливаемых с эффективностью 16 % и 84 % соответственно.

Проведенные расчеты с использованием полученных уравнений фракционной эффективности для ВРК (10) и ПЦК (11) показали, что эффективности сепарации составляет 96,8 %. Выполненные натурные замеры эффективности показали, что эффективность установки составляет 94,6 %.

Таким образом, подтвердилась возможность использования полученных выражений фракционной эффективности сепарации частиц для ВРК и ПЦК при проектировании систем пыле- и золоулавливания с устойчивыми процессами сепарации частиц для теплоэнергетических установок.

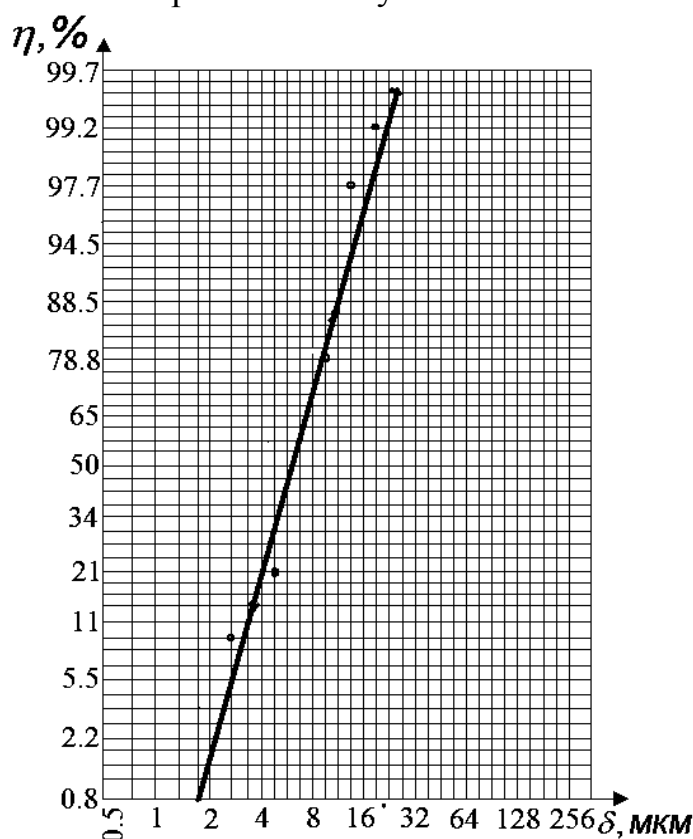


Рис. 10. Эксплуатационная кривая системы пыле- и золоулавливания

Основные результаты и выводы

В результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Разработан метод совершенствования процесса обеспыливания дымовых газов при модернизации промышленных систем пыле- и золоулавливания с инерционными аппаратами.

2. В результате литературного обзора был проведен анализ процесса обеспыливания газов и выполнена сравнительная оценка эффективности сепарации частиц в различных типах инерционных пыле- и золоуловителей. Выявлены причины нарушения устойчивости процесса сепарации пыли в одиночных противоточных циклонных аппаратах, батарейных и групповых циклонах.

3. Уточнена зависимость для оценки эффективности сепарации частиц с учетом турбулентной диффузии в криволинейном канале и вихревом разгрузителе-концентраторе с учетом конструктивных соотношений.

4. Получено новое уточняющее выражение для оценки эффективности сепарации частиц с учетом турбулентной диффузии в прямоточном циклонном концентраторе с учетом конструктивных соотношений и количества отводимого пылеконцентрата.

5. Разработаны и внедрены технические решения для обеспыливания газов в условиях нестационарности потоков в условиях производства завода ЖБИ-27 г. Томск.

6. На основе совокупности результатов работы предложен новый инженерный метод расчета систем пыле- и золоулавливания на энергетических установках различной мощности. Он был использован при разработке системы очистки отходящих дымовых газов от котла КЕ-10/14 котельной ОАО «Шахта Заречная» г. Полысаево Кемеровской области.

Основное содержание работы отражено в следующих публикациях:

1. Василевский М.В., Зыков Е.Г. О формировании слоя частиц в приёмнике центробежного пылеуловителя // Энергетика: экология, надёжность, безопасность. Материалы докладов десятой Всерос. научно- техн. конф. – Томск: Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2004. – С.399-403.

2. Василевский М.В., Зыков Е.Г. О характеристиках потоков с дисперсной фазой в вихревой камере // Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики: Доклады Всерос. науч. конф. – Томск: Из-во Томск. ун-та, 2004. – С.289-290.

3. Зыков Е.Г., Василевский М.В. Устойчивость потоков в циклонных аппаратах пыле- и золоулавливающих систем // Энергетика: экология, надёжность, безопасность. Материалы докладов 9-й всероссийской научно-технической конференции. – Томск: Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2002. – Том.2. – С.99-102.

4. Зыков Е.Г., Василевский М.В. Очистка воздуха от аэрозольных частиц в установках пневмотранспорта тонкодисперсных материалов // Энергетика: экология, надёжность, безопасность. Материалы докладов 9-й всероссийской научно-технической конференции. – Томск: Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2002. – Том.2. – С.102-108.

5. Василевский М.В., Зыков Е.Г. Методы повышения эффективности систем обеспыливания газов с групповыми циклонными аппаратами в малой энергетике // Промышленная энергетика, 2004. – № 9. – С. 54-57.

6. Василевский М.В., Зыков Е.Г., Логинов В.С. Устойчивость газоочистки в циклонном пылеуловителе // Изв. РАН Энергетика, 2005. – №5. – С.114-124.

7. Способ очистки воздуха от аэрозольных частиц в установках напорного пневмотранспорта дисперсных материалов: Патент №2250798 РФ / М.В. Василевский, Е.Г. Зыков, В.С. Логинов. – Бюл. № 12. – 6 с.

8.Василевский М.В., Зыков Е.Г. Расчет эффективности очистки газа в инерционных аппаратах: Учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2005.– 86 с.

Подписано к печати ____ .11.2005г.

Формат 60x84/16. Бумага офсетная.

Печать RISO. Усл.печ.л. 0,93. Уч.-изд.л. 0,84.

Тираж 100 экз. Заказ № _____. Цена свободная.

Издательство ТПУ. 634050, г.Томск, пр. Ленина, 30.