

**На правах рукописи**

**АСЛАМОВА ВЕРА СЕРГЕЕВНА**

**Процесс сепарации в высокопроизводительных  
прямоточных циклонах и методы их расчета**

**05.17.08 – Процессы и аппараты химических технологий**

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

**Томск, 2009**

Работа выполнена в **Ангарской государственной технической академии**

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
**Иванчина Эмилия Дмитриевна**

доктор физико-математических наук, профессор  
**Бубенчиков Алексей Михайлович**

доктор технических наук, профессор  
**Комарова Лариса Федоровна**

Ведущая организация – **Московский государственный университет инженерной экологии.**

Защита диссертации состоится «28» апреля 2009 г. в 14.00 часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.269.08 при **Томском политехническом университете** по адресу: 634034, г. Томск, пр. Ленина, 30.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Томского политехнического университета.

Автореферат разослан «      » \_\_\_\_\_ 2009 г.

Ученый секретарь совета  
по защите докторских и кандидатских  
диссертаций Д 212.269.08,  
канд. техн. наук, доцент

**Петровская Т. С.**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность проблемы.** Проблема инженерной защиты атмосферного воздуха от техногенных выбросов промышленных предприятий в мире и в России чрезвычайно актуальна. По данным ООН ежегодно в атмосферу выбрасывается 2,5 млн т пыли. По прогнозам министерства природных ресурсов РФ с 2030 г. первенство в топливно-энергетическом балансе в России займут уголь и атомная энергетика, что потребует конструктивного и технологического совершенствования пылеочистного оборудования.

В отечественной промышленности для очистки газа от пыли в основном используются низкоэффективные, малопроизводительные противоточные циклоны. Высокую эффективность очистки могут обеспечить высокопроизводительные прямоточные циклоны с промежуточным отбором пыли (ПЦПО), основными преимуществами которых являются: возможность стабильного и эффективного разделения в широком диапазоне варьирования расхода газа и концентрации пыли при сравнительно небольшом гидравлическом сопротивлении.

Одной из причин ограниченного использования прямоточных циклонов (ПЦ) является отсутствие критериев масштабного перехода от лабораторных моделей к производственным установкам.

Экспериментальное измерение компонент скорости потока в ПЦПО трудно реализуемо из-за конструктивных особенностей аппаратов, отсутствия доступных и надежных измерительных приборов. Поэтому для конструирования новых и эффективного использования известных аппаратов необходимо совершенствовать методы расчета газодинамики и процесса пылеулавливания в прямоточных циклонах.

Определяющими характеристиками циклонных пылеуловителей являются эффективность пылеулавливания и гидравлическое сопротивление. Потери давления в циклоне определяют, в основном, экспериментально и представляют в виде регрессионной зависимости от геометрических параметров циклона и критерия Рейнольдса. Сопоставление экспериментальных значений гидравлического сопротивления с расчетными показало, что существующие методики не учитывают особенности конструкций ПЦПО и сложность газодинамической обстановки, возникающей в этих аппаратах.

Известные методы расчета эффективности циклонов, основанные на аппроксимации фракционной эффективности циклонных пылеуловителей и дисперсного состава пыли эмпирико-вероятностными функциями, также не отвечают требуемой точности для широкого круга конструктивных и технологических параметров. При этом наиболее важными факторами, нуждающимися в детальном исследовании и уточнении, являются масштабный переход к другому типоразмеру циклона и влияние на процесс пылеулавливания технологических параметров, таких как размер частиц пыли, ее концентрация и плотность, скорость запыленного потока.

Научная **проблема** заключается в создании адекватного математического описания газодинамики и процесса сепарации применительно к прямоточным циклонам. В связи с отсутствием таких подходов эта проблема, несомненно, является актуальной. Решение проблемы позволяет разработать конструкции эффективных высокопроизводительных прямоточных пылеуловителей и надежные методы их расчета, что имеет большое народнохозяйственное значение в части повышения эффективности и экологичности многих химико-технологических систем.

Исследования проводились в рамках Государственных бюджетных тем: «Синтез систем разделения жидких гомогенных и гетерогенных смесей» (1996...2000 г.г., номер государственной регистрации НИР: 01.9.70010082); «Исследование термической и гидродинамической неустойчивости пограничных слоев» (2001...2005 г. г., номер государ-

ственной регистрации НИР: 01.200.118631).

**Цель работы** – разработка способов интенсификации и повышения эффективности пылеулавливания прямоточных циклонов и надежных методов их расчета на основе моделирования и изучения закономерностей гидрогазодинамических и сепарационного процессов.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Определить поля окружной и осевой компонент скорости по численному решению краевой задачи закрученного осесимметричного периодического течения вязкой несжимаемой жидкости с переменной закруткой.

2. Установить закономерности движения частиц пыли в ПЦПО, учитывающие влияние эффектов Магнуса и рикошета частиц.

3. Разработать:

- математическую модель движения частиц пыли в ПЦПО и получить регрессионные зависимости пути сепарации уловленных и уносимых частиц;

- вероятностную модель фракционной эффективности ПЦПО, учитывающую стохастический характер движения дисперсной фазы;

- подход к систематизации экспериментальных данных по эффективности пылеулавливания циклонов;

- новые методы прогнозирования эффективности пылеулавливания циклонов;

- новый метод оценки гидравлического сопротивления ПЦПО на основе характеристик пограничного слоя;

- новые промышленные высокоэффективные газоочистные установки на основе оптимизации конструкций циклона ПЦПО и его технологических показателей;

- алгоритмы и автоматизированную систему технологического расчета циклонов.

4. Сопоставить разработанные методы оценок эффективности и гидравлического сопротивления с известными и экспериментальными результатами.

**Научная новизна** выполненных исследований заключается в разработке физико-математической модели движения полидисперсной газопылевой системы в виде многопараметрических регрессионных уравнений с последующей оценкой их адекватности экспериментальным данным для различных технологических условий и конструктивных параметров прямоточного циклона с промежуточным отбором пыли. Получена математическая модель процесса разделения газа и частиц пыли, на основе которой обоснована и рассчитана оптимальная конструкция прямоточного циклона и условия его работы при промышленной эксплуатации. Доказано, что разработанный технологический моделирующий комплекс позволяет не только решать оптимизационные задачи на стадии проектирования, но и прогнозировать показатели работы при промышленной эксплуатации циклонов.

1. Применительно к прямоначальному циклону с промежуточным отбором пыли поставлена и решена краевая задача осесимметричного ламинарного периодического закрученного течения вязкой несжимаемой жидкости в переменных момент импульса, «функция тока-вихрь» в условиях изменяющейся закрутки потока. На основе численного решения рассчитаны поля осевой и тангенциальной компонент скорости, линии тока равного уровня и установлено существование обратных осевых и тангенциальных пристенных потоков.

2. Предложена математическая модель движения частиц пыли в закрученных потоках, учитывающая влияние броуновского движения на вязкость газопылевого потока и влияние эффекта Магнуса на движение частиц. Введено понятие «путь сепарации частицы пыли», которое определяет осевую протяженность траектории частицы до стенки ци-

клона. Установлены многопараметрические регрессионные зависимости пути сепарации уловленных и уносимых частиц и вероятностная модель фракционной эффективности прямоточного циклона, учитывающие технологические и конструктивные параметры.

3. Определен характер движения частицы пыли в прямоточном циклоне с промежуточным отбором под действием центробежной силы и аэродинамического сопротивления газового потока. Получены траектории движения частиц пыли разного диаметра при различных точках входа в циклон и формулы для расчета минимального диаметра частиц, улавливаемых промежуточным и основным отборами пыли. Рассчитаны теоретические эффективности сепарации промежуточного отбора и циклона в целом, которые сопоставлены с экспериментальными значениями. На основе скачкообразной модели движения частиц объяснены причины снижения экспериментальной эффективности пылеулавливания циклона по сравнению с расчетной тем, что не все отраженные от стенки частицы попадают в область отборов пыли. Основной причиной отрыва крупных частиц размером более 40 мкм является их отражение от стенки циклона. Для частиц размером менее 22 мкм, которые слабо увлекаются турбулентными пульсациями, взвешивание частиц обусловлено их закручиванием при ударах о стенку и возникающим в связи с этим эффектом Магнуса.

4. Установлены оптимальные значения конструктивных и режимных параметров прямоточного циклона с промежуточным отбором пыли, при которых достигается максимальная эффективность очистки при меньших энергозатратах и большей пропускной способностью, чем у противоточных циклонов и аппаратов со встречными закрученными потоками.

5. Впервые для процесса сепарации предложен декомпозиционный подход к систематизации экспериментальных данных, на основе которого разработаны методы статистического описания сепарационных характеристик циклонов любых типов и только прямоточных циклонов, обобщающие эмпирические зависимости для относительного уноса пыли от технологических и конструктивных параметров: диаметра циклона, масс-медианного диаметра частиц пыли, концентрации и плотности пыли, скорости газа, пригодные для прогнозирования эффективности сепарации циклонов при масштабном переходе и смене режимов работы.

6. Для конфузорно-диффузорной сепарационной камеры прямоточного циклона с промежуточным отбором пыли на основе характеристик пограничного слоя выполнена теоретическая оценка гидравлического сопротивления.

#### **Практическая значимость**

1. Разработан и реализован на практике процесс сепарации с применением прямоточных циклонов с промежуточным отбором пыли, обеспечивающих эффективную очистку запыленных газов промышленных предприятий с меньшими, чем для противоточных циклонов и со встречными закрученными потоками, материальными и энергетическими затратами. Конструкции циклонов защищены А.С. СССР № 1386309 и патентом РФ № 61156 на полезную модель.

2. На основе характеристик пограничного слоя предложен метод оценки гидравлического сопротивления прямоточного циклона с промежуточным отбором пыли, погрешность которого не превышает 10 %.

3. Разработаны универсальный для всех типов циклонов статистический метод (положительное решение на патент РФ) для прогнозирования эффективности пылеулавливания и модель, учитывающая скоростной режим закрученного потока для прямоточных циклонов, при масштабировании конструктивных параметров и смене режимов работы.

4. На базе известных и авторских методов оценок эффективности и гидравлического сопротивления циклонов создана автоматизированная система технологического расчета и прогнозирования сепарационных характеристик циклонов при промышленной эксплуатации, позволяющая оптимизировать выбор наилучшего пылеуловителя для заданных режимов работы (свидетельство об отраслевой регистрации разработки № 8990).

#### **Реализация результатов исследования**

На основе выполненных исследований разработан и внедрен на Новомальтинском заводе стройматериалов прямоточный групповой циклон из трех элементов. Положительный эффект от внедрения оценивается большой социальной значимостью охраны окружающей среды.

Разработана и принята к внедрению на ООО «Сибсиликон» компании «НИТОЛ» (г. Усолье-Сибирское) пылеочистная установка, состоящая из прямоточного циклона с промежуточным отбором пыли и барабанного зернистого фильтра, для очистки выбросов от кристаллического кремния после измельчения. Внедрение установки позволит повысить эффективность очистки до 98,5 %, снизить потери кремния, улучшить экологическую обстановку на производстве. Ожидаемый экономический эффект составит свыше 1,5 млн руб. в год.

Автоматизированная система технологического расчета циклонов внедрена в учебный процесс Ангарской государственной технической академии, Томского политехнического университета, Иркутского государственного университета путей сообщений и Восточно-Сибирского технологического университета (г. Улан-Удэ) на кафедрах «Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов», «Общая химическая технология», «Безопасность жизнедеятельности и экология» и «Промышленная экология и защита в чрезвычайных ситуациях».

#### **Положения, выносимые на защиту:**

- краевая задача осесимметричного периодического течения вязкой несжимаемой жидкости в переменных момент импульса и «функция тока-вихрь» с изменяющейся закруткой потока применительно к прямоточному циклону с промежуточным отбором пыли и явление возникновения обратных пристенных осевых и тангенциальных потоков;
- вероятностная модель расчета фракционной эффективности прямоточного циклона;
- количественные оценки влияния эффектов Магнуса и рикошета частиц;
- новый подход к систематизации экспериментальных данных;
- универсальный метод расчета эффективности пылеулавливания циклонов;
- статистический метод прогнозирования эффективности пылеулавливания прямоточных циклонов с учетом режима движения потока;
- метод расчета гидравлического сопротивления прямоточного циклона с промежуточным отбором пыли;
- новые способы интенсификации процесса сепарации в прямоточных циклонах;
- система автоматизированного технологического расчета циклонов.

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались и обсуждались на ежегодных научно-технических конференциях «Современные технологии и научно-технический прогресс» в Ангарской государственной технической академии, Всесоюзной конференции «Аэрозоли и их применение в народном хозяйстве» (Юрмала, 1987), на научно-практической конференции «Очистка газовых выбросов промышленных предприятий» (Тольятти, 1990), Республиканском научно-техническом семинаре «Безопасность жизнедеятельности и экологические проблемы в регионах Сибири и Дальнего Востока» (Благовещенск, 1992), International conference «Fundamental and applied prob-

lems of environmental protection» (Tomsk, 1995), Международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях» (Смоленск, 2001; Казань, 2005; Ярославль, 2007; Саратов, 2008), Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Новые экологобезопасные технологии для устойчивого развития регионов Сибири» (Улан-Удэ, 2005), конференции РФФИ «Фундаментальная наука в интересах развития критических технологий» (Владимир, 2005), Международной конференции «Химия, химическая технология и биотехнология на рубеже тысячелетий» (Томск, 2006), Всероссийских ежегодных научных конференциях с международным участием «Актуальные вопросы защиты окружающей среды и безопасность территорий регионов России» (Улан-Удэ, 2005...2008), научно-практической конференции «Безопасность регионов – основа устойчивого развития России» (Иркутск, 2007), Международной научно-практической конференции «Экология и безопасность жизнедеятельности» (Пенза, 2007), Всероссийской научно-технической Интернет-конференции «Современные проблемы экологии и безопасности» (Тула, 2007), Всероссийской конференции по математике и механике (Томск, 2008), Международном научно-методическом симпозиуме «Современные проблемы многоуровневого образования» (Дивноморское, 2008).

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 75 работ, в том числе 8 статей, опубликованных в журналах, рекомендованных ВАК, монография, получены 2 авторских свидетельства СССР, патент на полезную модель, положительное решение на выдачу патента на изобретение и свидетельство отраслевой регистрации разработки. Без соавторов опубликовано 9 работ. В работах, опубликованных в соавторстве, личный вклад автора состоит в формулировании проблемы, постановке задач, создании теоретических основ для их решения, а также в участии в процессе исследования на всех этапах.

**Структура и объем работы.** Диссертация включает введение, восемь глав, выводы, список использованной литературы (397 наименований), условные обозначения и 4 приложения. Содержание изложено на 377 страницах, 111 рисунках, 46 таблицах.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность проблемы и приведена общая характеристика диссертации с тезисным изложением основных положений и результатов работы, обозначены цель и задачи исследования.

**В главе 1** выполнен сравнительный анализ существующих конструкций прямооточных циклонов. Установлены преимущества и способы совершенствования прямооточных циклонов с промежуточным отбором пыли ПЦПО (рис. 1) и прямооточного циклона с эжектированием газа (рис. 2), разработанных автором.

Приведена классификация существующих математических моделей движения закрученных потоков. В результате обзора выбраны дивергентная форма уравнений Навье-Стокса в переменных «функция тока-вихрь», тип разностных схем и метод численного решения.

**В главе 2** приведена постановка краевой задачи осесимметричного ламинарного закрученного течения вязкой и несжимаемой жидкости в ПЦПО без учета гравитационной силы. Вблизи стенок циклона в пределах пограничного слоя концентрированный газопылевой поток можно считать вязкой несжимаемой жидкостью.

Будем рассматривать часть циклона, ограниченную сечениями АВ и CD (рис. 3). На участке EF изменяется закрутка потока за счет расширения потока в зоне промежуточного отбора (ПО) пыли. Интенсивность закрутки потока будем характеризовать локальным параметром закрутки, который приблизительно равен тангенсу угла наклона потока в области пристенного течения:  $tg\gamma = w/u$ , где  $w$ ,  $u$  – окружная и осевая компоненты ско-

рости. В рассматриваемом циклоне закрутка потока создается осевым направляющим аппаратом (ОНА).

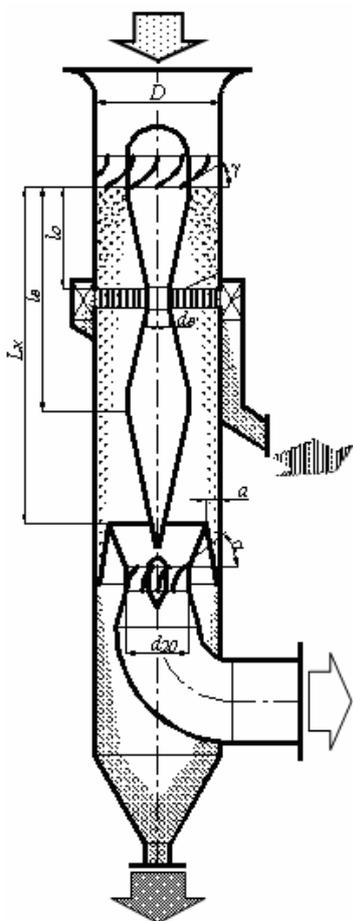


Рис. 1. Прямоточный циклон ПЦПО

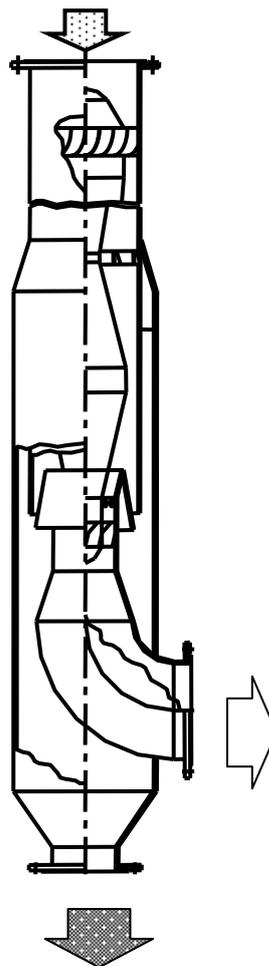


Рис. 2. Циклон ПЦПО с эжектированием газа

Вследствие прилипания частиц жидкости к неподвижным стенкам циклона их осевая и радиальная компоненты скорости будут равны нулю. Это равносильно требованию равенства нулю нормальных и касательных производных функции тока на стенке. Тогда граничные условия запишутся следующим образом:  $u = 0, v = 0, w = w_0$  на BE и FC;  $u = 0, v = 0, w = w_1$  на EF;  $w_0 = \text{const}, w_1 = \text{const}$ , где  $w_0, w_1$  – величины окружной компоненты скорости около стенки циклона после аксиального лопаточного аппарата и промежуточного отбора соответственно. Из-за симметричности сепарационных устройств граничные условия на оси аппарата ( $r = 0$ ):  $\partial u / \partial r = 0, v = 0, w = 0$  на AD.

Ламинарное движение устойчиво лишь при малых значениях критерия Рейнольдса. В нашем случае закрученность потока порождает малые возмущения, которые не затухают, а приводят к возникновению колебательного движения жидкости.

На основное поступательное движение жидкости накладывается нестационарное периодическое движение. На сечениях AB и CD (рис. 3) будем задавать условия периодичности, обусловленные наличием закрутки потока на входе в сепарационную камеру и раскрутки потока при входе в про-

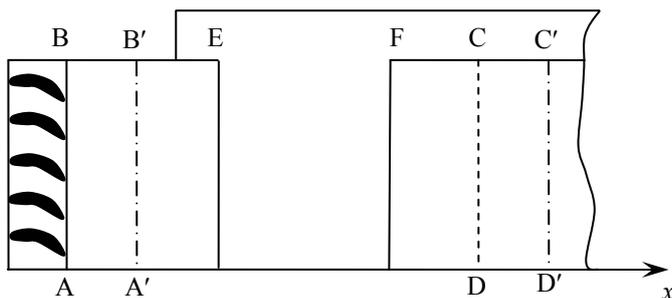


Рис. 3. Часть цилиндрического корпуса циклона ПЦПО

межуточный отбор (участок EF), для осевой составляющей скорости в виде:  
 $u(x_A, r, \varphi) = u(x_D, r, \varphi), \frac{\partial u(x_A, r, \varphi)}{\partial x} = \frac{\partial u(x_D, r, \varphi)}{\partial x}$ . Аналогично записываются условия периодичности для радиальной и окружной компонент скорости.

Опыт численного решения уравнений Навье-Стокса показывает, что лучшими разностными схемами являются дивергентные. Поэтому составлены уравнения для функций тока  $\Psi$ , вихря скорости  $\Omega$ , момента импульса  $\Phi$  в дивергентной форме.

Уравнение (1) для момента импульса  $\Phi$  единицы массы жидкости относительно оси симметрии  $x$  получено для установившегося движения из уравнения баланса для бесконечно малого элементарного объема единичной массы с учетом закона сохранения, согласно которому изменение момента импульса элемента в единицу времени равно моменту приложенных сил.

$$\frac{1}{\text{Re}} \cdot \left[ r \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial \Phi}{\partial r} - 2\Phi \right) \right] - \frac{\partial}{\partial x} \left( \Phi \frac{\partial \Psi}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left( \Phi \frac{\partial \Psi}{\partial x} \right) = 0, \text{ где } \text{Re} = \frac{\rho \cdot U_0 \cdot R}{\mu}. \quad (1)$$

При выводе использованы связи компонент скорости с функцией тока  $\Psi$  и касательных напряжений с моментом импульса

$$u = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \Psi}{\partial r}, v = -\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \Psi}{\partial x}; \tau_{r\varphi} = \mu \cdot r \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{w}{r} \right) = \mu \cdot \left( \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \Phi}{\partial r} - \frac{2 \cdot \Phi}{r^2} \right), \tau_{x\varphi} = \mu \frac{\partial w}{\partial x} = \frac{\mu}{r} \cdot \frac{\partial \Phi}{\partial x},$$

безразмерные координаты ( $U_0$  – среднерасходная скорость потока,  $R$  – радиус сепарационной камеры циклона):

$$u' = \frac{v_x}{U_0}; v' = \frac{v_r}{U_0}; w' = \frac{v_\varphi}{U_0}; x' = \frac{x}{R}; r' = \frac{r}{R}. \text{ Далее для удобства штрихи опущены.}$$

Запишем уравнение движения несжимаемой жидкости в форме Ламба-Громеки

$$-\vec{u} \times \vec{\omega} = -\nabla \left( \frac{1}{2} u^2 + P \right) - \frac{1}{\text{Re}} \cdot (\nabla \times \vec{\omega}), \quad (2)$$

где  $\nabla = \vec{i} \frac{\partial}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial}{\partial r} + \vec{k} \frac{\partial}{\partial \varphi}$  – оператор Гамильтона.

Применим к обеим частям уравнения (2) оператор  $rot$  и, учитывая, что  $rot \ grad \left( P + \frac{1}{2} u^2 \right) = 0$ , получим  $rot(\vec{u} \times \vec{\omega}) = \frac{1}{\text{Re}} \cdot rot \ rot \ \vec{\omega}$ ,

$$(3)$$

где  $rot \ \vec{\omega} = \nabla \times \vec{\omega}$ . В координатной форме уравнение для окружной компоненты  $\omega_\varphi$  угловой скорости  $\omega$  имеет вид

$$\frac{\partial}{\partial x} (u \cdot \omega_\varphi) + \frac{\partial}{\partial r} (v \cdot \omega_\varphi) - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} (w^2) = \frac{1}{\text{Re}} \left\{ \frac{\partial^2 \omega_\varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial}{\partial r} \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \cdot \omega_\varphi) \right] \right\},$$

где компонента  $\omega_\varphi$  характеризует вращение частиц жидкости относительно оси, имеющей форму окружности (кольцевой вихрь).

Вводя функции  $\Psi, \Phi, \Omega = \frac{1}{r} \omega_\varphi$ , после умножения на  $\frac{\text{Re}}{r}$  получим

$$\frac{\partial^2 \Omega}{\partial x^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 \cdot \Omega) \right] - \frac{\text{Re}}{r} \frac{\partial}{\partial x} \left( \Omega \frac{\partial \Psi}{\partial r} \right) + \frac{\text{Re}}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \Omega \frac{\partial \Psi}{\partial x} \right) = -\frac{\text{Re}}{r^4} \frac{\partial}{\partial x} (\Phi^2). \quad (4)$$

Дивергентную форму уравнения для  $\Psi$  получили, исходя из введенного обозначения  $\Omega$ , связи окружной составляющей ротора с проекциями скорости  $rot_\varphi \vec{u} = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial r}$ :

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + r \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \Psi}{\partial r} \right) = -r^2 \cdot \Omega. \quad (5)$$

Зададим граничные условия для уравнений (1), (4), (5). На оси симметрии  $\frac{\partial \Psi}{\partial x} = 0$ ,

следовательно,  $\Psi = const$ . Положим, на AD:  $\Psi = 0$ ;  $\left( \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial r} \right) = \omega_\varphi = r \cdot \Omega = 0$ ;

на неподвижном участке EF стенки промежуточного отбора в силу ее непроницаемости  $\frac{\partial \Psi}{\partial r} = 0$ , следовательно,  $\Psi = const = 1$  на BE, EF, FC, так как в качестве характерной скорости принята средняя скорость в плане циклона.

Граничные условия для функции  $\Phi$ :

$$\Phi = 0 \text{ на AD, } \Phi = R_0 \text{ на BE, FC, } \Phi = R_{01} \text{ на EF,}$$

где  $R_0$  – параметр закрутки, который определяет значение окружной компоненты скорости на входе в сепарационную камеру циклона после ОНА,  $R_{01}$  – параметр раскрутки потока.

Условия периодичности на сечениях АВ и CD для функции  $\Psi$ :

$$\Psi(x_A, r, \varphi) = \Psi(x_D, r, \varphi), \quad \frac{\partial \Psi(x_A, r, \varphi)}{\partial x} = \frac{\partial \Psi(x_D, r, \varphi)}{\partial x}.$$

Подобно выглядят условия периодичности для функций  $\Phi$  и  $\Omega$ . На стенках циклона граничные условия для функции  $\Omega$  можно не определять, так как ее можно выразить через функцию  $\Psi$ . Поэтому систему из трех уравнений (1), (4), (5) можно свести к системе из двух уравнений.

Учитывая, что вихрь определен лишь внутри области, граничное условие для него будем ставить внутри основной области, отступив от входного сечения на один шаг. Поэтому введем вспомогательные сечения  $A'B'$ ,  $C'D'$ , параллельные сечениям АВ и CD (рис. 3). Тогда условия периодичности для функции  $\Psi$  запишутся:  $\Psi(x_{A'}, r, \varphi) = \Psi(x_{D'}, r, \varphi)$ ,  $\partial \Psi(x_{A'}, r, \varphi) / \partial x = \partial \Psi(x_{D'}, r, \varphi) / \partial x$ . Аналогично выглядят условия периодичности для функций  $\Phi$  и  $\Omega$ .

В меридиональной плоскости введем равномерную сетку с узлами

$$\omega_n = \{x_j = j \cdot \Delta x = j \cdot l; r_i = i \cdot \Delta r = i \cdot h; i = 0, M+1; j = 0, N+1; h = 1/(M+1)\}.$$

Обозначив левые части уравнений (4), (1), (5) соответственно через  $A\Omega$ ,  $B\Phi$ ,  $C\Psi$  и аппроксимируя на этой сетке уравнения со вторым порядком точности относительно  $\Delta x$  и  $\Delta r$ , получим следующие разностные уравнения

$$A_h \Omega = -\frac{\text{Re}}{r^4} \cdot (\Phi^2)_x^0; \quad B_h \Phi = 0; \quad C_h \Psi = -r^2 \cdot \Omega, \quad \text{где } (\Phi^2)_x^0 = (\Phi_{i,j+1}^2 - \Phi_{i,j-1}^2) / (2\Delta x).$$

Расписав операторы  $A_h \Omega$ ,  $B_h \Phi$ ,  $C_h \Psi$ , получим:

$$\begin{aligned} A_h \Omega &= \frac{1}{l^2} \Omega_{i,j+1} - \frac{2}{l^2} \Omega_{i,j} + \frac{1}{l^2} \Omega_{i,j-1} + \frac{(i+1)^2}{h(i+1/2)} \Omega_{i+1,j} - \frac{2i^3}{h(i^2-1/4)} \Omega_{i,j} + \\ &+ \frac{(i-1)^2}{h(i-1/2)} \Omega_{i-1,j} + \frac{\text{Re}}{4ih^2l} [\Omega_{i,j-1} (\Psi_{i+1,j-1} - \Psi_{i-1,j-1}) - \Omega_{i,j+1} (\Psi_{i+1,j+1} - \Psi_{i-1,j+1}) + \\ &+ \Omega_{i+1,j} (\Psi_{i+1,j+1} - \Psi_{i+1,j-1}) - \Omega_{i-1,j} (\Psi_{i-1,j+1} - \Psi_{i-1,j-1})] = -\frac{\text{Re}}{2i^4 h^4 l} (\Phi_{i,j+1}^2 - \Phi_{i,j-1}^2) \\ B_h \Phi &= \frac{1}{l^2} \Phi_{i,j+1} - \frac{2}{l^2} \Phi_{i,j} + \frac{1}{l^2} \Phi_{i,j-1} + \frac{(i-1/2)}{ih^2} \Phi_{i+1,j} - \frac{2}{h^2} \Phi_{i,j} + \frac{(i+1/2)}{ih^2} \Phi_{i-1,j} + \\ &+ \frac{\text{Re}}{4ih^2l} [\Phi_{i,j-1} (\Psi_{i+1,j-1} - \Psi_{i-1,j-1}) - \Phi_{i,j+1} (\Psi_{i+1,j+1} - \Psi_{i-1,j+1}) + \Phi_{i+1,j} (\Psi_{i+1,j+1} - \Psi_{i+1,j-1}) - \\ &- \Phi_{i-1,j} (\Psi_{i-1,j+1} - \Psi_{i-1,j-1})] \end{aligned}$$

$$-\Phi_{i-1,j}(\Psi_{i-1,j+1} - \Psi_{i-1,j-1}) = 0;$$

$$C_h \Psi = \frac{1}{l^2} \Psi_{i,j+1} - \frac{2}{l^2} \Psi_{i,j} + \frac{1}{l^2} \Psi_{i,j-1} + \frac{i}{h^2(i+1/2)} \Psi_{i+1,j} + \frac{i}{h^2(i-1/2)} \Psi_{i-1,j} - \frac{2i^2}{h^2(i^2-1/4)} \Psi_{i,j} = -h^2 i^2 \Omega_{i,j}$$

Здесь полуцелые индексы относятся к центру соответствующей ячейки, а целые – к ее граням. Граничные условия будем задавать в соответствии с поставленной задачей.

$$\Psi_{0,j} = 0; \Psi_{M+1,j} = 1, j = \overline{0, N+1}. \Phi_{0,j} = 0; \Phi_{M+1,j} = R_0, j = \overline{0, L} \text{ и } j = \overline{L1, N+1}.$$

$$\Phi_{0,j} = 0; \Phi_{M+1,j} = R_{01}, \text{ если } L < j < L1.$$

Граничные условия для  $\Omega$  задаем не на стенке циклона, а отступив от нее на один шаг сетки, учитывая условие прилипания  $\Psi_{M+1,j} = 1$ ,

$$\Omega_{M,j} = \left[ \frac{2M}{(M^2 - 1/4)h^4} + \frac{2}{h^2 M^2 l^2} \right] \Psi_{M,j} - \frac{1}{M(M+1/2)h^4} - \frac{1}{M(M-1/2)h^4} \Psi_{M-1,j} - \frac{1}{h^2 M^2 l^2} [\Psi_{M,j+1} + \Psi_{M,j-1}].$$

Разложим функцию  $\Psi$  по формуле Тейлора в окрестности точки  $(M+1, j)$ :

$$\Psi_{M,j} = \Psi_{M+1,j} - h \left( \frac{\partial \Psi}{\partial r} \right)_{M+1,j} + \frac{h^2}{2} \left( \frac{\partial^2 \Psi}{\partial r^2} \right)_{M+1,j} + 0(h^3);$$

$$\Psi_{M-1,j} = \Psi_{M+1,j} - 2h \left( \frac{\partial \Psi}{\partial r} \right)_{M+1,j} + 4 \frac{h^2}{2} \left( \frac{\partial^2 \Psi}{\partial r^2} \right)_{M+1,j} + 0(h^3).$$

Умножив первое разложение на 4 и вычтя из него второе, получим

$$4\Psi_{M,j} - \Psi_{M-1,j} = 3\Psi_{M+1,j} - 2h \left( \frac{\partial \Psi}{\partial r} \right)_{M+1,j}. \text{ С учетом условия } \left( \frac{\partial \Psi}{\partial r} \right)_{M+1,j} = 0 \text{ имеем}$$

$$\Psi_{M,j} = 0,25(3\Psi_{M+1,j} + \Psi_{M-1,j}). \quad (6)$$

Уравнение (5) для функции  $\Psi$  решается на полной сетке при условии:  $\Psi_{M+1,j} = 1$  на стенке циклона, после чего на каждой итерации вводится поправка для функции  $\Psi$  по формуле (6), а затем вычисляется граничное условие для  $\Omega$ . Особенность такой постановки граничного условия состоит в том, что условие прилипания реализуется на каждом временном шаге. При этом существенно, что условие прилипания и условие для функции  $\Omega$  ставятся на разных границах, так как использование этих двух условий по одной и той же границе переопределяет нашу задачу и при численном решении может привести к снижению точности.

Выведено достаточное условие устойчивости используемых разностных схем из физических соображений, заключающихся в том, что величина осевой компоненты скорости  $u_x$  намного превышает радиальную  $u_r$ :

$$Re_h = \max \{h \operatorname{Re} |u_x|, h \operatorname{Re} |u_r|\} \leq 2, \text{ где } Re_h - \text{сеточное число Рейнольдса.}$$

Для решения поставленной задачи по схеме продольно-поперечной прогонки была разработана программа на алгоритмическом языке Турбо Паскаль. Получены профили осевой и окружной компонент скорости, представленные на рис. 4, на котором уровень начальной завихренности, обусловленной неоднородностью закрутки потока в ОНА, определяется заданием величины параметра  $K = w_{\max} / u_{\max}$ , где  $w_{\max}, u_{\max}$  – максимальные тангенциальная и осевая компоненты скорости в ПЦ.

Из анализа профиля осевой компоненты скорости следует, что вблизи стенки существует возвратное течение, которое способствует вторичному уносу отсепарированных частиц. Осевая компонента скорости возвратного течения возрастает при удалении от

входного сечения. Поведение линий тока также свидетельствует о наличии вихревых зон вблизи стенок циклона. Результаты согласуются с выводами других авторов, а полученные профили скоростей позволили усовершенствовать конструкцию рассматриваемого циклона: промежуточный и основной отборы были объединены общим пылевым бункером, для уменьшения возвратных течений выполнен скос стенок бункера.

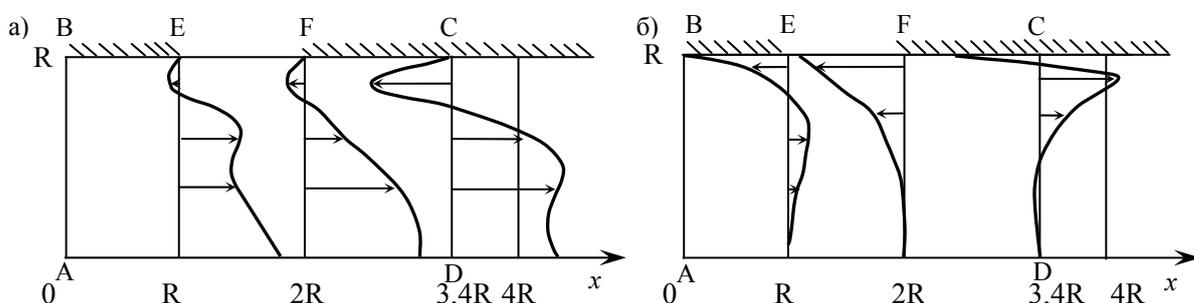


Рис. 4. Профили скоростей: а) осевой; б) окружной при  $K^2=1$ ,  $Re=6$ ,  $R=0,1$  м

В главе 3 представлена разработанная автором математическая модель сепарации частиц пыли в ПЦ с учетом влияния броуновского движения на вязкость газопылевого потока и влияния эффекта Магнуса на движение частиц.

Представим пылегазовую среду в циклоне в виде двухкомпонентного газа: собственно газа и «пылевого» газа. «Пылевой» газ состоит из «молекул» в виде частиц пыли. Частицы имеют диаметр  $d$  и плотность  $\rho_s$ . Частицы содержатся в газе с массовой концентрацией  $z$ . Предположим, что «пылевой» газ подчиняется законам кинетической теории газов. Тогда на основе этой теории получим вязкость «пылевого» газа:  $\mu_n = uz\bar{\lambda}/3$ , где  $u$  – средняя скорость движения частицы массой  $m = \pi d^3 \rho_s / 6$ ;  $n_0 = z / m = 6z / (\pi d^3 \rho_s)$  – численная концентрация частиц;  $\bar{\lambda} = (\sqrt{2} \cdot n_0 \sigma_c)^{-1} = d \rho_s / (6\sqrt{2} \cdot z)$  – средняя длина свободного пробега частицы с учетом распределения по относительным скоростям соударяющихся частиц;  $\sigma_c = \pi d^2$  – эффективная площадь частицы при столкновении. Примем  $u$ , равной средней скорости  $u_b$  броуновской частицы при прохождении ею расстояния, равного ее диаметру, на основании формулы Эйнштейна:  $u_b = kT / (\pi \mu_g d^2)$ , где  $k \approx 1,381 \cdot 10^{-23}$  – постоянная Больцмана.

Вязкость двухкомпонентной смеси определяется по аппроксимации Уилки кинетической теории Сюзерленда

$$\mu_{z-n} = y_z \mu_g / (y_z + y_n \cdot \Phi_{z-n}) + y_n \mu_n / (y_n + y_z \cdot \Phi_{n-z}), \quad (7)$$

где  $\Phi_{z-n} = \left[ 1 + (\mu_g / \mu_n)^{1/2} (M_n / M_z)^{1/4} \right]^2 / [8(1 + M_z / M_n)]^{1/2}$ ;

$$\Phi_{n-z} = \left[ 1 + (\mu_n / \mu_g)^{1/2} (M_z / M_n)^{1/4} \right]^2 / [8(1 + M_n / M_z)]^{1/2}; \quad y_n = z / \rho - \text{мольная (объемная)}$$

доля «пылевого» газа;  $y_z = 1 - y_n$  - мольная доля газа;  $M_z$  - молекулярная масса газа. Вязкость газопылевой среды может примерно в два и более раза превышать вязкость чистого газа  $\mu_g$ . Эффект повышенной вязкости можно объяснить торможением частиц при совместных столкновениях, которые вызывают закручивание частиц, что приводит к дополнительным затратам энергии при движении частиц, повышению внутренних сил трения в газопылевой среде и, соответственно, повышению вязкости среды при движении в ней частицы пыли.

Рассмотрим движение частицы в анизотропном по вязкости закрученном газопылевом потоке, в котором вязкость среды в осевом и тангенциальном направлениях равна вязкости чистого газа  $\mu_g$ , а для радиального направления (в направлении сепарации час-

тиц пыли) вязкость равна вязкости газопылевой среды  $\mu_{z-n}$ . Газ движется поступательно вдоль оси  $z$  и вращается. Профиль тангенциальной скорости газа  $U_z$  в случае потенциального безвихревого движения подчиняется уравнению:

$$U_z \cdot R^n = \xi, \quad (8)$$

где  $n$  – показатель степени, равный по опытным данным  $0,3 \dots 0,7$ ;  $\xi$  – константа.

Действующие силы: центробежная сила  $F_u = m \cdot U_u^2 / R$ ; сила тяжести  $G = m \cdot g$ ; силы сопротивления при движении в газовой среде в тангенциальном и осевом направлении (частицы движутся параллельно, без соударений, как одиночные частицы в чистом газе):  $T_t = 3\pi \cdot \mu_g \cdot k_\delta \cdot d \cdot (U_u - U_z)$ ;  $T_z = 3\pi \cdot \mu_g \cdot k_\delta \cdot d \cdot (W_u - W_z)$ , где  $k_\delta$  – коэффициент формы частицы; сила сопротивления при движении в газопылевой среде в радиальном направлении (с учетом столкновения между частицами):

$$T_r = 3\pi \cdot \mu_{z-n} \cdot k_\delta \cdot d \cdot (V_u - V_z).$$

Здесь  $U$ ,  $W$  и  $V$  – соответственно тангенциальная, осевая и радиальная компоненты скорости частицы (индекс  $u$ ) и газа ( $z$ );  $\mu_{z-n}$  определяется по формуле (7). Кроме этих сил рассмотрим также эффект Магнуса, заключающийся в появлении подъемной силы Жуковского при движении вращающейся частицы:

$$F_{ж} = \rho_g \cdot d \cdot (V_u - V_z) \cdot \Gamma,$$

где  $\Gamma = \int_l u \cdot dl = \pi \cdot d^2 \cdot \xi / (4 \cdot R^{1,5})$  – циркуляция скорости по контуру частицы;  $u = \omega \cdot d / 2$  –

линейная скорость вихря на поверхности частицы;  $\omega = |dU/dR| = \xi \cdot n \cdot R^{-n-1} = \xi / (2R^{1,5})$  – угловая скорость вращения частицы при наличии градиента тангенциальной скорости.

На основе действующих сил составим уравнения движения частицы в анизотропной по вязкости газопылевой среде в цилиндрической системе координат.

$$\begin{cases} \frac{\partial V_u}{\partial t} = \frac{U_u^2}{R} - \left( \frac{18\mu_{z-n}k_\delta}{d^2\rho_\delta} + \frac{6 \cdot \rho_g \cdot d \cdot \Gamma}{\pi \cdot d^3 \cdot \rho_\delta} \right) (V_u - V_z) = \frac{U_u^2}{R} - a \cdot (V_u - V_z); \\ \frac{\partial U_u}{\partial t} = \frac{18\mu_g k_\delta}{d^2\rho_\delta} \cdot (U_u - U_z) = b \cdot (U_u - U_z); \\ \frac{\partial W_u}{\partial t} = g - \frac{18\mu_g k_\delta}{d^2\rho_\delta} \cdot (W_u - W_z) = g - b \cdot (W_u - W_z), \end{cases} \quad (9)$$

$$\text{где } a = a_c + a_{ж}, \quad a_c = \frac{18\mu_{z-n}k_\delta}{d^2\rho_\delta}, \quad a_{ж} = \frac{3\rho_g\xi}{2\rho_\delta R^{1,5}}; \quad b = \frac{18\mu_g k_\delta}{d^2\rho_\delta}. \quad (10)$$

При безвихревом потенциальном вращательном движении радиальную скорость газа примем равной нулю:  $V_z = 0$ . Тангенциальная скорость газа подчиняется закону (8) с показателем степени, равным  $n = 0,5$ . Осевую скорость примем постоянной и равной отношению объемного расхода газа  $Q$  к площади проходного сечения  $A$ :  $W_z = Q / A$ . Опуская индекс  $u$ , уравнения движения частицы (9) получим в следующем виде:

$$\begin{cases} \frac{\partial V}{\partial t} = \frac{U^2}{R} - a \cdot V; \\ \frac{\partial U}{\partial t} = b \cdot \left( U - \frac{\xi}{R^{1/2}} \right); \\ \frac{\partial W}{\partial t} = g - b \cdot \left( W - \frac{Q}{A} \right). \end{cases} \quad (11)$$

В цилиндрических координатах радиальная скорость равна:  $V = dR/dt$ , а тангенциальная  $U = R\omega = R(d\theta/dt)$ . Предположим также, что в тангенциальном направлении частицы движутся вместе с газом с одной скоростью:  $U_1 = U_2 = \xi/R^{1/2}$ . Тогда уравнение радиальной скорости частицы приводится к виду

$$R'' + a \cdot R' - \xi^2 R^{-2} = 0. \quad (12)$$

Уравнение для осевой скорости частиц пыли является линейным и имеет решение

$$W = \frac{g + b \cdot Q/A}{b} + C \cdot \exp(-bt). \quad (13)$$

При граничных условиях  $t=0$ ,  $W = W_0 = Q/A$  константа интегрирования равна  $C = -g/b$ . Тогда  $W = W_0 + \frac{g}{b}(1 + e^{-bt})$ . (14)

Уравнения (12) и (14) определяют траекторию движения частицы в проекции на диаметральный сечение циклона. В частности, при сепарации они определяют осевую пробег  $S$  частицы (путь сепарации) до стенки циклона, т. к.  $dS/dt = W$ .

При численном интегрировании диаметр частиц пыли варьировался от 1 до 100 мкм с шагом 3 мкм. Плотность пыли менялась в пределах от 500 до 10000 кг/м<sup>3</sup> с шагом 500 кг/м<sup>3</sup>. Диаметр  $D$  циклона изменялся от 100 до 600 мм с шагом 50 мм. Осевая скорость потока – от 6 до 16 м/с с шагом 2 м/с. Крутка потока принята равной 45°, запыленность потока – 0,025 кг/м<sup>3</sup>.

Для уловленных частиц пыли, путь сепарации которых не превышает длины  $L$  сепарационной зоны ПЦПО, результаты численного моделирования методом Рунге-Кутты 4-го порядка обобщены уравнением

$$S = 1,040 \cdot d^{1,119} \cdot W^{-0,178} \cdot \rho_s^{-0,948} \cdot \bar{r}_0^{0,690} \cdot (0,5 - \bar{r}_0)^{0,916} \cdot D^{1,152}, \quad (15)$$

где  $R_2 = D/2$  – радиус циклона;  $R_1 = 0,75 \cdot R_2$  – радиус центральной вставки;  $r_0$  – радиус входа частицы пыли в сепарационную зону.  $\bar{r}_0 = r_0/D$  – относительный радиус входа частицы в сепарационную зону. Коэффициент детерминации  $R^2$  для уравнения (15) составил 98,98 %, стандартная ошибка  $\sigma = 0,059$ , средняя абсолютная ошибка  $\Delta = 0,035$ , коэффициент Дарбина-Уотсона  $DW = 1,627$ , объем выборки  $n_b = 280595$ .

Представляет интерес информация о выносимых частицах, путь сепарации которых больше  $L$ :

$$S = 0,0805 \cdot d^{-1,305} \cdot W^{-0,364} \cdot \rho_s^{-0,928} \cdot \bar{r}_0^{0,737} \cdot (0,5 - \bar{r}_0)^{0,738} \cdot D^{1,349} \quad (16)$$

( $R^2 = 96,182$  %,  $\sigma = 0,792$ ,  $\Delta = 0,560$ ,  $DW = 1,654$ ,  $n_b = 14849$ ).

По уравнениям (15) и (16) можно решать следующие задачи применительно к сепарации частиц в прамоточных циклонах:

- расчет радиуса входа  $r_0$  частиц такого, что при  $r > r_0$  частицы улавливаются (для них путь сепарации  $S$  меньше длины сепарационной зоны  $L$ ), а при  $r < r_0$  частицы уносятся с потоком очищенного газа (так как их путь сепарации больше длины сепарационной зоны  $S > L$ );

- расчет диаметра  $d_{50}$  частиц, улавливаемых в прамоточном циклоне на 50 %:

$$d_{50} = \left\{ d : r_0 = \sqrt{(R_2^2 - R_1^2)/2}; S = L \right\}; \quad (17)$$

- расчет логарифма среднеквадратического отклонения  $\lg \sigma_c$  для диаметров улавливаемых в циклоне частиц (параметры  $d_{50}$  и  $\lg \sigma_c$  нужны для расчета эффективности циклона по типовой методике НИИОГАЗ);

- построение вероятностной модели расчета эффективности прамоточного циклона.

Регрессионные уравнения (15) и (16) для пути сепарации частиц пыли в ПЦПО позволяют построить вероятностную модель расчета эффективности прамоточного ци-

клона. Диаметр частиц  $d$  и радиус входа  $r_0$  в ПЦ являются случайными величинами. Следовательно, путь сепарации  $S$  тоже является случайным. При этом диаметр циклона  $D$ , плотность пыли  $\rho_\delta$  и входная скорость газового потока  $W_0$  являются детерминированными параметрами. Случайный диаметр частиц распределен согласно фракционному составу пыли. Для расчета эффективности сепарации необходимо массовое распределение частиц по диаметру  $\varphi_M(d)$ . Распределение случайного радиуса входа определим, предположив равномерное распределение частиц по площади входного кольцевого зазора с радиусами  $R_1$  и  $R_2$ . Вследствие равномерности распределения частиц по площади в элементарное кольцо радиусом  $r$  и шириной  $dr$  попадет доля (вероятность) от всех частиц, поступивших в циклон, пропорциональная отношению площадей соответствующих колец:

$$P(dr_0) = \frac{\pi(r_0 + dr_0)^2 - \pi r_0^2}{\pi R_2^2 - \pi R_1^2} = \frac{2r_0 dr_0 + (dr_0)^2}{R_2^2 - R_1^2} = \frac{2r_0 dr_0}{R_2^2 - R_1^2}.$$

Пренебрегая членом второго порядка малости  $(dr_0)^2$ , получаем трапециевидное дифференциальное распределение случайного радиуса входа частицы в прямочный циклон

$$\varphi(r_0) = \frac{P(dr_0)}{dr_0} = \frac{2r_0}{R_2^2 - R_1^2}. \quad (18)$$

В качестве проверки полученного распределения (18) проинтегрируем его по всей области существования  $r_0$ :

$$\int_{R_1}^{R_2} \varphi(r_0) dr_0 = \int_{R_1}^{R_2} \frac{2r_0}{R_2^2 - R_1^2} dr_0 = \frac{2r_0^2}{2(R_2^2 - R_1^2)} \Big|_{R_1}^{R_2} = 1.$$

Следовательно, распределение (18) удовлетворяет условию нормировки распределения вероятностей.

Распределения  $\varphi_M(d)$  и  $\varphi(r_0)$  друг от друга независимы. Воспользуемся формулой для распределения функции от случайных аргументов, чтобы найти распределение вероятностей  $\varphi(S)$  для пути сепарации частицы

$$\varphi(S) = \varphi_M[f^{-1}(S)] \cdot \varphi(r_0) \cdot \left| \frac{df^{-1}(S)}{dS} \right|, \quad (19)$$

где  $d = f^{-1}(S) = 0,962 \cdot S^{0,894} \cdot W_0^{0,159} \cdot \rho_\delta^{0,847} \cdot \bar{r}_0^{-0,617} \cdot (0,5 - \bar{r}_0)^{-0,819} \cdot D^{-1,029}$  – обратная функция от (15); а её производная

$$\left| \frac{df^{-1}(S)}{dS} \right| = 0,860 \cdot S^{-0,106} \cdot W_0^{0,159} \cdot \rho_\delta^{0,847} \cdot \bar{r}_0^{-0,617} \cdot (0,5 - \bar{r}_0)^{-0,819} \cdot D^{-1,029}.$$

При известном распределении пути сепарации (15) можно найти вероятность улавливания произвольной частицы при ее прохождении через циклон длиной  $L$ . Эта вероятность эквивалентна эффективности сепарации частиц:

$$\eta = P(S < L) = \int_0^L \int_{R_1}^{R_2} \varphi(S) dr_0 dS. \quad (20)$$

Если в распределении (19) использовать распределение диаметров частиц в пределах одной фракции  $\varphi\{d \in [d - \Delta d; d + \Delta d]\}$ , то уравнение (20) дает характеристику фракционной очистки прямочного циклона  $\eta(d_{-\Delta d}^{+\Delta d})$ .

Численное исследование подынтегральной функции (20) показало, что на достаточно узких диапазонах она очень резко изменяется от практически «машинного нуля» до практически «машинной бесконечности». Данное обстоятельство потребовало применения переменного шага и гладкого метода интегрирования Уэддла (формула Ньюто-

на-Котеса 6-го порядка):

$$\int f(x)dx \approx \frac{41}{140} \left[ f(x) + 5f(x + \Delta x) + f(x + 2\Delta x) + 6f(x + 3\Delta x) + \right. \\ \left. + f(x + 4\Delta x) + 5f(x + 5\Delta x) + f(x + 6\Delta x) \right] \Delta x.$$

Результаты численного моделирования вероятностно-статистической эффективности достаточно хорошо согласуются с экспериментальными данными. На рис. 5 приведено сопоставление расчетной фракционной эффективности группового прямооточного циклона, выполненного с эжектированием газа из бункера, с экспериментальной фракционной эффективностью. Эффективность циклона ПЩПО по результатам вероятностно-стохастического моделирования составляет от 98 до 100 %. Выявлено, что частицы с диаметром более 16 мкм улавливаются на 100 %. Расчетный диаметр частиц, улавливаемых на 50 %, составил 10 мкм (в эксперименте – 14 мкм).

Экспериментальная фракционная эффективность достаточно точно описывается зависимостью  $\eta_\delta = 1 - e^{-10,3807.Stk^{0,6599}}$  с  $R^2 = 99,81 \%$ ,  $\sigma = 0,016$ ,  $\Delta = 0,009$ ,  $DW = 1,96$ , где  $Stk = \rho_\delta \delta^2 W_0 / (18\mu_g D)$  – критерий Стокса.

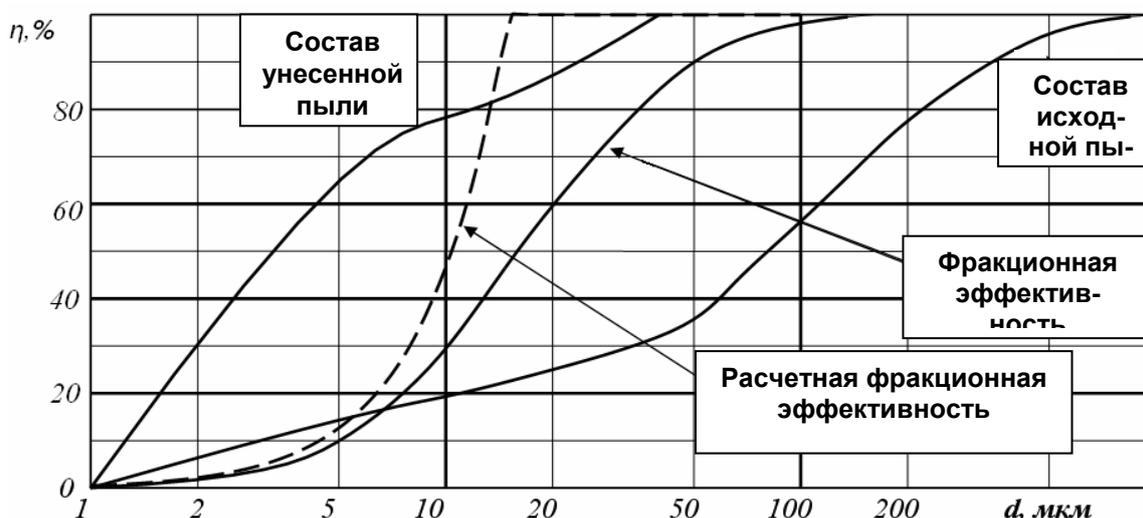


Рис. 5. Интегральные дисперсные составы исходной и уносимой пыли, расчетная и экспериментальная фракционная эффективность группового прямооточного циклона

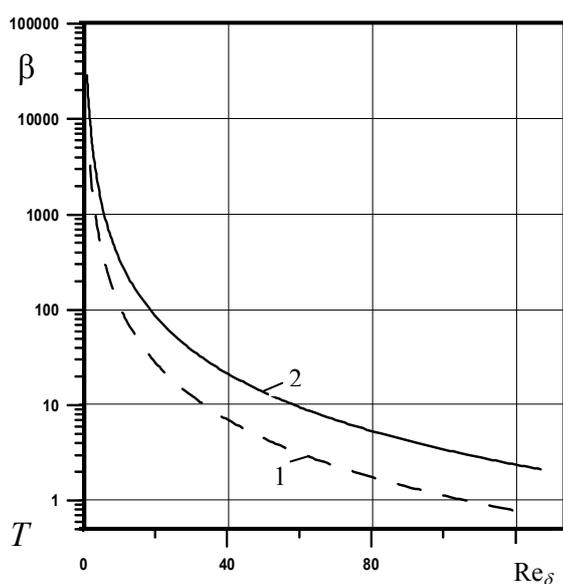


Рис. 6. Зависимость параметра  $\beta$  от числа  $Re_\delta$ :  
1 –  $D=0,12$  м,  $\rho_\delta=2631$  кг/м<sup>3</sup>; 2 –  $D=0,30$  м,  
 $\rho_\delta=1008$  кг/м<sup>3</sup>

В главе 4 рассмотрено одномерное движение частицы пыли массой  $m$  со скоростью  $V$  в потоке газа, движущегося со скоростью  $W$ , описываемое при выполнении закона Стокса уравнением

$$\frac{dV}{dt} = \frac{18k_\delta \mu_g}{\rho_\delta \delta^2} (W - V).$$

Данное предположение правомерно, т. к. число Рейнольдса для частицы невелико:  $Re_\delta = \delta W \rho_g / \mu_g \ll 100$ . Перейдем к безразмерным координатам, введя обозначения  $\bar{V} = V/W$ ;  $\bar{t} = t/T$ . Под характерным промежутком времени будем понимать отношение характерного размера  $L_0$  (расстояние от выходных кромок ОНА до

ПО пыли) к  $W$ :  $T = \frac{L_0}{W}$ ,  $L_0 = 2,3D$  – оптимальное расположение ПО. Тогда

$$\frac{d\bar{V}}{d\bar{t}} = \beta(1 - \bar{V}),$$

$$\text{где } \beta = \frac{18k_\delta \mu_g L_0}{\rho_\delta \delta^2 W} = 18k_\delta \frac{L_0}{\delta} \frac{\rho_g}{\rho_\delta} \frac{1}{\text{Re}_\delta} = \frac{2,3k_\delta}{Stk}. \quad (21)$$

После интегрирования получим

$$1 - \bar{V} = (1 - \bar{V}_0)e^{-\beta \bar{t}}, \quad (22)$$

где  $\bar{V}_0$  – безразмерная начальная скорость частицы. На рис. 6 представлена зависимость комплекса  $\beta$  от критерия  $\text{Re}_\delta$ , рассчитанная по формуле (21). Как видно, при одновременном увеличении диаметра ПЦ и уменьшении плотности пыли  $\beta$  возрастает. При малых числах  $\text{Re}_\delta$  значение  $\beta$  велико. Это означает, что безразмерная скорость частицы очень быстро стремится к единице, т. е. независимо от начальных условий скорость частицы  $V$  становится близкой к скорости потока  $W$ . Следовательно, окружную и осевую проекции скорости малых частиц можно принять равными соответствующим проекциям скорости газа. Тогда определению подлежит только радиальная скорость частиц, обусловленная центробежной силой.

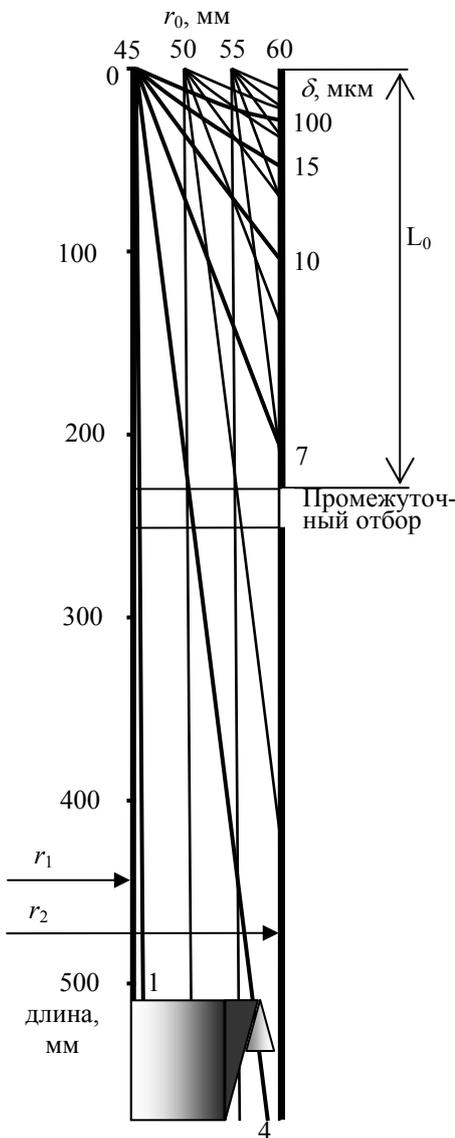


Рис. 7. Траектории движения частиц диаметром  $\delta$  с радиусом входа  $r_0$

Анализ закрученного адиабатического газопылевого течения в ПЦПО будем проводить при следующих допущениях:

1. Окружная проекция скорости газа изменяется по закону  $W_\varphi = \text{const} \sqrt{r}$ .

2. Частица не меняет во времени свою форму и диаметр, не происходит ни ее дробления, ни коагуляции.

3. Обтекание частицы потоком газа носит вязкий характер. Турбулентные пульсации газа не учитываются, так как они не оказывают заметного влияния на процесс пылеулавливания.

4. Не учитываются силы Жуковского, Архимеда, Кориолиса, тяжести, присоединенной массы, поскольку указанные силы на несколько порядков меньше по сравнению с силами аэродинамического сопротивления и центробежной.

5. Полагаем  $\beta = \text{const}$ , т. к. осевая проекция скорости газа слабо изменяется по радиусу циклона. При принятых допущениях дифференциальное уравнение движения частицы в цилиндрических безразмерных координатах примет вид

$$\frac{d\bar{V}_r}{d\bar{t}} = \frac{\bar{V}_\varphi^2}{\bar{r}} - \beta \bar{V}_r, \quad (23)$$

где  $V_z = W_z$ ;  $\bar{V}_z = \frac{V_z}{W_z} = 1$ ;  $\bar{t} = \frac{t}{T}$ ;  $T = \frac{L_0}{W_z}$ ;

$$\bar{V}_r = \frac{V_r}{W_z}; \bar{V}_\varphi = \frac{V_\varphi}{W_z}; \bar{r} = \frac{r}{L_0}; \beta = \frac{18k_\delta \mu_g L_0}{\rho_\delta \delta^2 V_z}.$$

Уравнение (23) имеет аналитическое решение

$$\bar{V}_r = e^{-\beta \bar{t}} \left( \bar{V}_{r0} + \int_0^{\bar{t}} e^{-\beta \bar{t}} \frac{\bar{V}_\varphi^2}{r} d\bar{t} \right),$$

где  $\bar{V}_{r0}$  – радиальная проекция скорости частицы в момент времени  $\bar{t} = 0$ .

Принятый закон изменения окружной скорости обеспечивает независимость отношения  $\frac{\bar{V}_\varphi^2}{r}$  от времени  $\bar{t}$ . После интегрирования  $\bar{V}_r = e^{-\beta \bar{t}} \left[ \bar{V}_{r0} + \frac{1}{\beta} \left( \frac{\bar{V}_\varphi^2}{r} \right)_{cp} (e^{-\beta \bar{t}} - 1) \right]$ . (24)

Расстояние, пройденное частицей в радиальном направлении, определяется

$$r - r_0 = \int_0^{\bar{t}} \bar{V}_r dt, \quad (25)$$

где  $r_0$  – начальный радиус входа частицы в сепарационную камеру циклона. Величина  $r_0$  может изменяться от радиуса  $r_1$  центральной внутренней вставки до радиуса  $r_2$  сепарационной камеры. После подстановки  $\bar{r}_0 = r_0/L_0$  и перехода к безразмерным переменным получим в результате интегрирования (25)

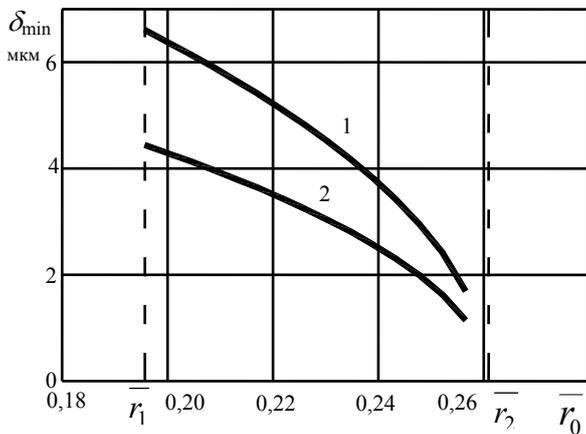


Рис. 8. Минимальный диаметр улавливаемой пыли: 1) промежуточным, 2) основным отборами

На рис. 7 изображены траектории частиц различного диаметра при разных радиусах входа  $\bar{r}_0$  частиц в сепарационную камеру (с размерами  $r_1=0,045$  м и  $r_2=0,060$  м), рассчитанные для завихрителя с углом  $\gamma$  выхода потока на среднем радиусе  $\bar{r}_{cp} = (r_1 + r_2)/(2L_0) = 0,1902$  к плоскости, перпендикулярной оси аппарата, равным  $35^\circ$ . Из треугольника скоростей нетрудно определить  $\bar{V}_\varphi = V_\varphi/V_z = \text{ctg } 35^\circ = 1,428$ ;  $\bar{V}_\varphi^2/\bar{r}_{cp} = 10,721$ . Пыль – KCl с  $k_\delta = 1,54$ ,  $\rho_\delta = 2631 \text{ кг/м}^3$ ,  $W = 9$  м/с,  $D = 0,12$  м,  $L_0 = 0,276$  м.

Предполагая, что частица, достигнув стенки циклона, скользит по ней и отводится в изолированные бункера, построим зависимости минимального диаметра  $\delta_{\min}$  частиц, улавливаемых окнами промежуточного отбора (кривая 1, рис. 8), и циклона в целом (кривая 2, рис. 8) для различных радиусов  $\bar{r}_0$  входа частицы в циклон. Теоретически, все частицы, имеющие размер больше  $\delta_{\min}$ , должны осаждаться в циклоне, а размером  $\delta < \delta_{\min}$  – выноситься из него. Эти кривые аппроксимированы кубическими полиномами с коэффициентом детерминации 99,96 %:

$$\delta_{\min}^1(\bar{r}_0) = 140 - 2178\bar{r}_0 + 12135\bar{r}_0^2 - 23250\bar{r}_0^3; \quad \delta_{\min}^2(\bar{r}_0) = 109 - 1702\bar{r}_0 + 9388\bar{r}_0^2 - 17741\bar{r}_0^3.$$

Предположим равномерное распределение пыли по входному сечению циклона. Интегральную функцию  $D(\delta)$  распределения частиц по массе аппроксимируем форму-

$$\bar{r} = \bar{r}_0 + \frac{1}{\beta} \left[ -\bar{V}_{r0} (e^{-\beta \bar{t}} - 1) + \left( \frac{\bar{V}_\varphi^2}{r} \right)_{cp} A(\beta, \bar{t}) \right], \quad (26)$$

$$\text{где } A(\beta, \bar{t}) = \bar{t} + \frac{1}{\beta} (e^{-\beta \bar{t}} - 1).$$

На выходе из ОНА проекции скорости потока  $W_{r0}$  и частицы  $V_{r0}$  пренебрежимо малы:

$$\bar{W}_{r0} = \bar{V}_{r0} = 0. \quad \text{Тогда } \bar{r} = \bar{r}_0 + \frac{1}{\beta} \left( \frac{\bar{V}_\varphi^2}{r} \right)_{cp} A(\beta, \bar{t}).$$

На рис. 7 изображены траектории час-

лой Розина-Рамлера-Беннета:  $D(\delta) = 1 - e^{-(\delta/\delta_e)^a}$ , где  $\delta_e$  – диаметр, при котором масса частиц крупнее  $\delta_e$  составляет 36,8 %, а мельче – 63,2 %. Для рассматриваемой пыли  $\delta_e = 23$  мкм,  $a = 2,62$ . Эффективности сепарации ПО  $\eta_T^1$  и циклона в целом  $\eta_T^2$  определяются по формулам

$$\eta_T^1 = \frac{100p}{\pi \left( \frac{-2}{r_2} - \frac{-2}{-r_1} \right)} \int_{r_1}^{\bar{r}_2} 2\pi \bar{r}_0 [1 - D(\delta_{\min}^1(\bar{r}_0))] d\bar{r}_0 = \frac{200p}{\left( \frac{-2}{r_2} - \frac{-2}{-r_1} \right)} \int_{r_1}^{\bar{r}_2} \bar{r}_0 e^{-\left(\delta_{\min}^1(\bar{r}_0)/23\right)^{2,62}} d\bar{r}_0, \% \quad (28)$$

$$\eta_T^2 = \frac{200}{\left( \frac{-2}{r_2} - \frac{-2}{-r_1} \right)} \int_{r_1}^{\bar{r}_2} \bar{r}_0 e^{-\left(\delta_{\min}^2(\bar{r}_0)/23\right)^{2,62}} d\bar{r}_0, \% \quad (29)$$

где  $p = 0,66$  – вероятность попадания пыли в промежуточный отбор, равная отношению суммарной площади окон к площади боковой поверхности цилиндра с высотой, равной высоте окон промежуточного отбора. Получены следующие значения эффективности сепарации:  $\eta_T^1 = 65,35$  % и  $\eta_T^2 = 99,01$  %, которые завышены по сравнению с экспериментальными  $\eta_s^1 = 60 \dots 62$  % и  $\eta_s^2 = 97$  %.

В табл. 1 приведена оценка эффективности испытанного ПЦ (рис. 2) при очистке колошниковых газов по методике НИИОГАЗ. Экспериментальные параметры фракционной эффективности ПЦПО ( $d_{50m} = 3,02$  и  $\lg \sigma_{m\eta} = 0,308$ ) рассчитаны по методу В.Т. Самсонова. Модельные параметры фракционной эффективности ( $\delta_{50\delta} = 2,34$  мкм,  $\lg \sigma_\eta = 0,02$ ) получены при использовании формул (28), (29).

**Таблица 1**

Расчет эффективности по методике НИИОГАЗ

Параметры	По опытным данным	По модели (22)
$\bar{D} = D / D_m$	0,258/0,12 = 2,15	
$\bar{\rho} = \rho_{\delta m} / \rho_\delta$	1950/1008 = 1,935	
$\bar{\mu} = \mu / \mu_m$	1,794 · 10 <sup>-5</sup> / 1,89 · 10 <sup>-5</sup> = 0,949	
$\bar{W} = W_m / W$	9/5 = 1,8	
$d_{50} = d_{50m} \cdot \sqrt{\bar{D} \cdot \bar{\rho} \cdot \bar{\mu} \cdot \bar{W}}$	3,02 · √(2,15 · 1,935 · 0,949 · 1,8) = 8,05	2,34 · √(2,15 · 1,935 · 0,949 · 1,8) = 6,23
$x = \frac{\lg(d_m / d_{50})}{\sqrt{\lg^2 \sigma_\mu + \lg^2 \sigma_\eta}}$	$\frac{\lg(70 / 8,05)}{\sqrt{0,497^2 + 0,308^2}} = 2,609$	$\frac{\lg(70 / 6,23)}{\sqrt{0,497^2 + 0,02^2}} = 2,112$
$\Phi_p(x), \%$	99,64	98,25
$\Phi_{\text{экс}}(x), \%$	87 (с эжекцией газа 93...94)	
Ошибка, %	(99,64 – 87)/87 = 14,53	(98,25 – 87)/87 = 12,93

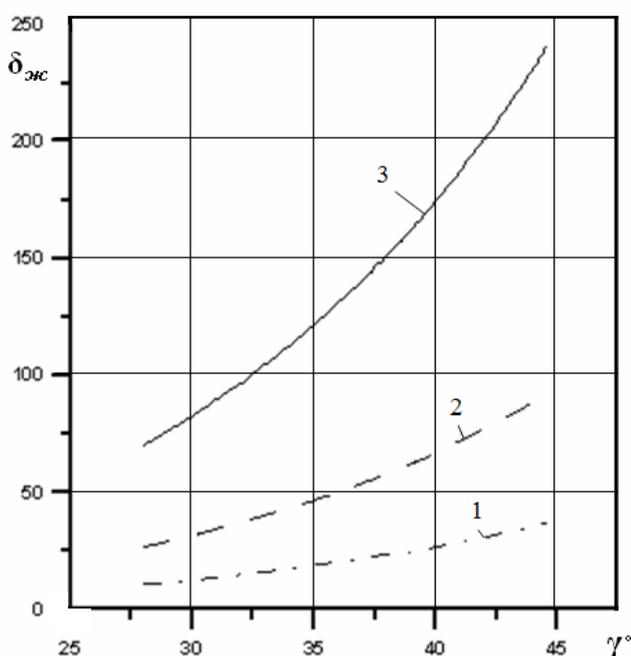
Из табл. 1 видно, что обе оценки имеют приемлемую, но достаточно большую погрешность (более 12 %, причем по предлагаемой модели ошибка меньше). При эжекции части газа из бункерного пространства точность модели становится хорошей (ошибка уменьшилась до 0,045...0,056 %).

Рассмотрена скачкообразная модель движения невращающихся частиц разного размера, входящих в сепарационную камеру циклона на радиусе центральной входной вставки  $r_b$ , при различных значениях коэффициента восстановления нормального импульса  $k_c$ . Выявлено, что частица диаметром  $\delta = 15$  мкм совершает скачки небольшой высоты вблизи входного сечения после ОНА, которые быстро затухают. Однако крупные частицы диаметром 40 мкм и более удаляются от стенки после рикошета на рас-

стояние, соизмеримое с шириной кольцевого канала. Амплитуда их скачков уменьшается медленно при повторных отражениях. Амплитуда скачков частиц размером более 100 мкм практически является незатухающей по длине сепарационной камеры ПЦПО. За счет такого движения частицы крупных размеров могут проскакивать мимо участков отбора пыли, что объясняет их появление в выходном потоке.

За счет шероховатости стенок циклона при ударе частица начинает вращаться, что приводит к появлению подъемной силы Жуковского, отрывающей частицу от стенки (эффект Магнуса). На рис. 9 представлена зависимость максимального диаметра  $\delta_{жс}$  частиц, отрывающихся под действием эффекта Магнуса, от угла  $\gamma$  установки лопаток ОНА. При увеличении  $\gamma$  и диаметра циклона размер отрывающихся частиц  $\delta_{жс}$  возрастает. Поэтому для снижения влияния эффекта Магнуса следует выбирать малые углы  $\gamma$ .

Наблюдаемое на практике падение эффективности очистки циклона при увеличении его диаметра можно объяснить увеличением размера частиц, отрывающихся от стенок силой Жуковского.



**Рис. 9.** Зависимость максимального диаметра частиц, отрывающихся под действием эффекта Магнуса, от угла  $\gamma$ : 1 –  $D=0,12$  м,  $\rho_s=2631$  кг/м<sup>3</sup>; 2 –  $D=0,30$  м,  $\rho_s=2631$  кг/м<sup>3</sup>; 3 –  $D=0,3$  м,  $\rho_s=1008$  кг/м<sup>3</sup>

удобства представления вариантов исполнения конструкции аппарата проведена маркировка. Первая цифра означает диаметр начального участка  $d_{20}$  выхлопного патрубка, вторая – выходной угол  $\gamma$  установки лопаток ОНА к радиальной плоскости, третья – положение окон ПО, четвертый символ – форму вытеснения потока (А – короткий конический вытеснитель, Б – профилированный вытеснитель переменного сечения, В – длинный цилиндрикоконический вытеснитель). Наличие далее буквы Р указывает на установку раскручивателя в выхлопном патрубке.

Экспериментальные исследования проводились на циклоне диаметром  $D = 120$  мм. Для запыления потока применялся порошок хлористого калия различного дисперсного состава: со счетным медианным диаметром по числу частиц  $d_n = 13$  мкм и  $d_n = 10$  мкм. Дисперсный состав анализировался с помощью микроскопа и счетчика Культера модели ТА. Плотность пыли по показаниям автопикнометра 1320 составила 2631 кг/м<sup>3</sup>, удель-

**В главе 5** приведены результаты исследования ПЦПО, представленных на рис. 1, 2. Определены рациональные значения геометрических и режимных параметров: расположения окон ПО  $l = \bar{l}_0 D$  относительно выходных кромок ОНА, диаметра вытеснителя потока  $d_B = \bar{d}_B D$  в зоне ПО, длин цилиндрического участка вытеснителя  $l_B = \bar{l}_B D$  и сепарационной камеры  $L_K = \bar{L}_K D$ , диаметра начального участка выхлопного патрубка  $d_{20} = \bar{d}_{20} D$ , ширины кольцевой щели второго отбора (ВО)  $a = \bar{a} D$ , относительной площади окон ПО  $\bar{F}$ . Исследовано также влияние углов закручивания ( $90-\gamma$ ) и раскручивания ( $90-\alpha$ ) потока, форм вытеснителей потока и пылеотбойных шайб (коническая, биконическая), концентрации пыли  $z$ , счетного медианного диаметра частиц пыли  $d_n$  и среднерасходной скорости  $W_0$  движения газа. Для

ная поверхность частиц фракций диаметром  $\delta < 50$  мкм –  $(2,8 \dots 5,2) \times 10^3$  см<sup>2</sup>/г. Подача пыли осуществлялась струйным гравитационным питателем порошка. Оценка эффективности пылеулавливания проводилась двояко: по поданной и улавливаемой отборами циклона пыли (минорантная оценка  $\eta_{min}$ ); по поданной и выносимой из циклона пыли (мажорантная оценка  $\eta_{max}$ ); средняя эффективность пылеулавливания  $\bar{\eta}$  рассчитывалась по формуле  $\bar{\eta} = (\eta_{min} + \eta_{max})/2$ . В экспериментах среднее расхождение между  $\eta_{min}$  и  $\eta_{max}$  не превышало 6 %, что соответствует требованиям нормативных документов.

Испытания показали целесообразность применения ПО, который повышает эффективность сепарации циклона на 8...10 %. Как и следовало ожидать, с увеличением площади окон  $\bar{F}$  возрастает эффективность сепарации ПО  $\eta_1$  и аппарата в целом  $\bar{\eta}$ . Так, увеличение значения  $\bar{F}$  от 0,16 до 0,66 привело к возрастанию эффективности ПО  $\eta_1$  от 23,8 до 46,6 %. При этом эффективность сепарации модели ПЦПО-0,68-40,7-1,3В увеличилась в среднем на 8 %. Осевая протяженность окон ПО составляла 0,22D. Во всех остальных экспериментах  $\bar{F} = 0,66$ .

В процессе экспериментальных исследований выявлено существенное влияние на эффективность очистки положения ПО (рис. 10). Характерно, что оптимум  $\eta_1$  составляет 55...60 %, а максимуму эффективности сепарации первого отбора  $\eta_1$  соответствует максимум эффективности очистки циклона в целом. При угле  $\gamma = 32,5^\circ$  для модели ПЦПО-0,68-32,5 оптимальное значение  $\bar{l}_0$  составляет 2,3. При угле  $\gamma = 40,7^\circ$  –  $\bar{l}_0 = 1,7$ . Найденное увеличение оптимальных значений  $\bar{l}_0$  с уменьшением угла  $\gamma$  объясняется пристенными эффектами (рикошетированием частиц от стенок циклона, турбулентной диффузией частиц), возрастающими с ростом закрутки потока.

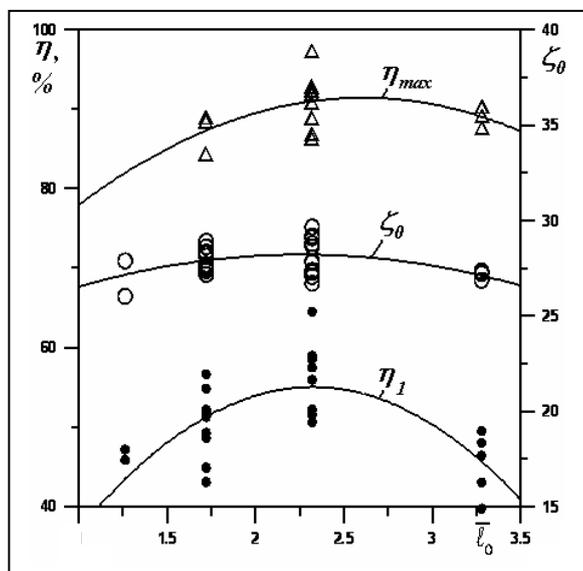


Рис. 10. Влияние  $\bar{l}_0$  на эффективность и гидравлическое сопротивление модели ПЦПО-0,68-32,5

Следует отметить, что максимальное значение коэффициента гидравлического сопротивления  $\zeta_0$  соответствует максимуму эффективности  $\eta_1$ , так как в результате увеличения количества пыли, удаляемой через окна ПО, падает остаточная запыленность потока, что вызывает некоторое возрастание гидравлического сопротивления циклона  $\Delta P$ . Как показали эксперименты, средняя эффективность пылеулавливания незначительно уменьшается с увеличением относительной длины цилиндрического участка вытеснителя  $\bar{l}_B$ . Эффективность ВО  $\eta_2$  возрастает с ростом  $\bar{l}_B$ , что объясняется уменьшением радиального расстояния до стенки, которое следует пройти частице пыли. Коэффициент гидравлического сопротивления практически остается неизменным. Увеличение  $\bar{l}_B$  вызывает сначала возрастание эффективности ПО  $\eta_1$  при  $\bar{l}_B = 0,683$ , а затем ее уменьшение. Максимальное значение  $\eta_1$  соответствует случаю, когда  $\bar{l}_B = 0,683$ , а сам вытеснитель заканчивается до окон ПО.

Такой характер поведения кривой  $\eta_1 = f(\bar{l}_B)$  обусловлен ростом условной скоро-

сти  $\bar{W}_\Pi$  в зоне отбора, зависящей от относительного диаметра вытеснителя  $\bar{d}_B$  в области ПО:  $\bar{W}_\Pi = \frac{W_\Pi}{W_0} = \frac{1}{1 - \bar{d}_B^2}$ . Увеличение  $\bar{d}_B$  сопровождается ростом скорости  $\bar{W}_\Pi$ , следствием чего является возрастание вторичного уноса из бункера ПО и падение эффективности  $\eta_1$ . Оптимальное значение  $\bar{d}_B$ , соответствующее наибольшим значениям  $\eta_1$  и  $\eta_{\max}$ , равно 0,38 (рис. 11).

Эффективность сепарации ВО  $\eta_2$ , наоборот, вначале падает с ростом  $\bar{l}_B$ , а затем возрастает. Общая эффективность очистки циклона  $\bar{\eta}$  при этом остается практически на уровне 85 %. Сравнительно низкая эффективность циклона ПЦПО-0,68-32,5-2,3А вызвана малой площадью окон ПО ( $\bar{F} = 0,53$  против  $\bar{F} = 0,66$ ). Характер изменения  $\eta_1$  и  $\eta_2$  в зависимости от параметра  $\bar{l}_B$  сохраняется при изменении степени закрутки потока.

Итак, для увеличения эффективности  $\eta_1$  необходимо снижение скорости  $W_\Pi$  в зоне отбора, что достигается сужением вытеснителя в зоне ПО, как показано на рис. 1. Дальнейшее поджатие потока путем увеличения диаметра вытеснителя до первоначального будет способствовать повышению эффективности ВО. Предложенная конструкция вытеснителя потока и выбор оптимального положения ПО  $\bar{l}_0$  в зависимости от угла  $\gamma$  защищены авторским свидетельством.

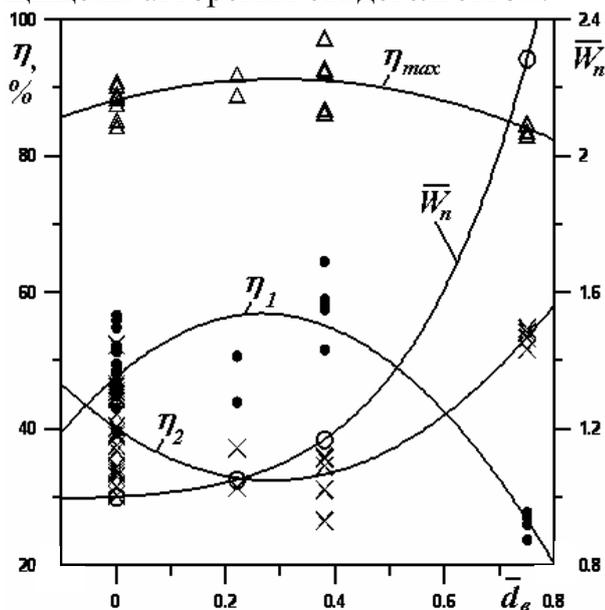


Рис. 11. Влияние диаметра вытеснителя в зоне ПО на эффективность  $\eta_1, \eta_2, \eta_{\max}$  и среднюю скорость  $\bar{W}_\Pi$  для ПЦПО-0,68-40,7

Введение профилированного вытеснителя позволило резко повысить эффективность сепарации циклона, как это показано на рис. 11, где представлены данные испытаний циклона с различными вытеснителями потока: экспериментальные точки при  $\bar{d}_B=0$  соответствуют короткому коническому вытеснителю потока, заканчивающемуся до ПО. Из анализа экспериментальных данных следует, что область оптимальных значений параметра  $\bar{d}_B$  составляет 0,2...0,4. В дальнейших испытаниях использован вытеснитель с  $\bar{d}_B = 0,22$ . Выполнение вытеснителя профилированным позволило уменьшить длину камеры сепарации  $\bar{L}_K = L_K / D$  с 4,78 до 4,18 без снижения эффективности пылеулавливания.

После статистической обработки экспериментальных данных для ОНА с  $\gamma=32,5^\circ$

получены зависимости для эффективности пылеулавливания

$$\text{ПО: } \eta_1 = -18,408 + 65,751 \cdot \bar{l}_0^{0,8} - 9,616 \cdot \bar{l}_0^2; \quad (30)$$

$$\text{ВО: } \eta_2 = 94,590 - 52,318 \cdot \bar{l}_0^{0,85} + 8,124 \cdot \bar{l}_0^2; \quad (31)$$

$$\text{циклона: } \bar{\eta} = (140,49 + 35,060 \cdot \bar{l}_0^{0,5} - 3,591 \bar{l}_0^2) \cdot z^{0,017} \cdot W_0^{-0,089} \cdot \zeta_0^{-0,119}; \quad (32)$$

$$\text{потерь давления: } \Delta P = (6790,51 - 33923,49 \cdot \bar{l}_0 + 533,293 \bar{l}_0^2 + \bar{l}_0^3) \cdot (W_0 \cdot z)^{0,011}; \quad (33)$$

удельных потерь энергии:

$$\Delta H = \Delta P / \rho_g = (5223,44 - 2935,78 \cdot \bar{l}_0 + 466,82 \bar{l}_0^2 + \bar{l}_0^3) (W_0 \cdot z)^{0,006}; \quad (34)$$

коэффициента гидравлического сопротивления:

$$\zeta_0 = (39,5566 + 2,0345 \cdot \bar{l}_0^{0,5} - 0,4106 \bar{l}_0^2) \cdot z^{-0,022} \cdot W_0^{-0,177} . \quad (35)$$

В формулах (30)...(35) запыленность  $z$  [кг/м<sup>3</sup>]. Статистическая значимость регрессий дана в табл. 2 ( $R_k$  – коэффициент корреляции).

На эффективность пылеулавливания существенное влияние оказывает закрутка потока ( $90-\gamma$ ), определяемая углом установки лопаток ОНА и входная концентрация пыли  $z$ . С увеличением закрутки потока (уменьшением  $\gamma$ ) растет как эффективность ПО  $\eta_1$ , так и средняя эффективность очистки  $\bar{\eta}$  циклона. В экспериментах среднерасходная скорость потока изменялась в пределах 12...13 м/с. Максимальные значения эффективностей  $\bar{\eta}$ ,  $\eta_1$  соответствуют углу установки лопаток ОНА  $\gamma = 32,5^\circ$ . Результаты испытания ПЦПО-0,68- $\gamma$ А при  $\bar{l}_0 = 1,717$  при разных входных концентрациях пыли, аппроксимированы двухфакторной моделью прогноза  $\bar{\eta} = 91,678 - 0,229 \cdot \gamma + 0,071 \cdot z$ . (36)

**Таблица 2**

Статистическая значимость регрессий

Формула	$n_6$	$R_0^2, \%$	$R_k$	$DW$	$\sigma$	$\Delta$
(30)	17	86,70	0,9311	0,61	2,13 %	4,58 %
(31)	14	86,63	0,9308	0,86	2,06 %	4,92 %
(32)	23	92,65	0,9625	2,51	0,66 %	0,84 %
(33)	15	98,36	0,9918	1,40	69,29 Па	278,05 Па
(34)	16	97,19	0,9858	1,44	74,82 Дж/кг	240,95 Дж/кг
(35)	17	85,54	0,9249	1,04	0,306	0,830

**Таблица 3**

Влияние дисперсного состава пыли на эффективность ПЦПО-0,68-32,5-2,3А

Показатели	Значения				
	1	2	3	4	5
Номер образца пыли	1	2	3	4	5
Счетный медианный диаметр по числу частиц $d_n$ , мкм	5,5	6,7	6,8	10	13
Медианный диаметр по массе $d_m$ , мкм	11	13	14	20	26
Среднее квадратическое отклонение	0,18	0,15	0,16	0,14	0,15
Эффективность сепарации $\bar{\eta}$ , %	78,99	82,84	84,34	89,10	91,96

Практический интерес представляет сравнение эффективности сепарации циклона при различном дисперсном составе пыли (табл. 3). Мелкая пыль (№ 1, 2, 3) получена путем дополнительных просевов пыли № 4. Медианный диаметр по массе получен пересчетом по известной формуле. Результаты испытаний для образцов пылей № 1 и № 4 использованы для определения параметров функции фракционной степени очистки модели ПЦПО-0,68-32,5-2,3А по методу В.Т. Самсонова:  $d_{50} = 3,029$  мкм и  $\lg \sigma_\eta = 0,653$ . Сравнение  $d_{50}$  позволяет заключить, что по эффективности пылеулавливания модель ПЦПО 0,68-32,5-2,3А лучше противоточных циклонов ЦН-15 ( $d_{50} = 3,06$  мкм), ЦН-15У ( $d_{50} = 3,48$  мкм) и ЦН-24 ( $d_{50} = 4,71$  мкм) и прямооточного циклона ЦКТИ ( $d_{50} = 4,0$  мкм). В опыте № 4 счетный медианный диаметр на входе в пылеуловитель составил 10 мкм. В бункере ПО  $d_n = 22,5$  мкм, в бункере ВО  $d_n = 5$  мкм.

Достигнутая эффективность сепарации  $\bar{\eta} = 94$  % все еще недостаточна. Одним из путей дальнейшей интенсификации процесса сепарации циклонов является уменьшение начального диаметра выхлопного патрубка (рис. 12). Видно, что уменьшение диаметра  $\bar{d}_{20}$  с 0,68 до 0,58 приводит к существенному повышению эффективности сепарации (на 5...6 %), но одновременно в 1,3 раза возрастает гидравлическое сопротивление и в 1,1 раза уменьшается пропускная способность циклона. Дальнейшее уменьшение  $\bar{d}_{20}$  с 0,58

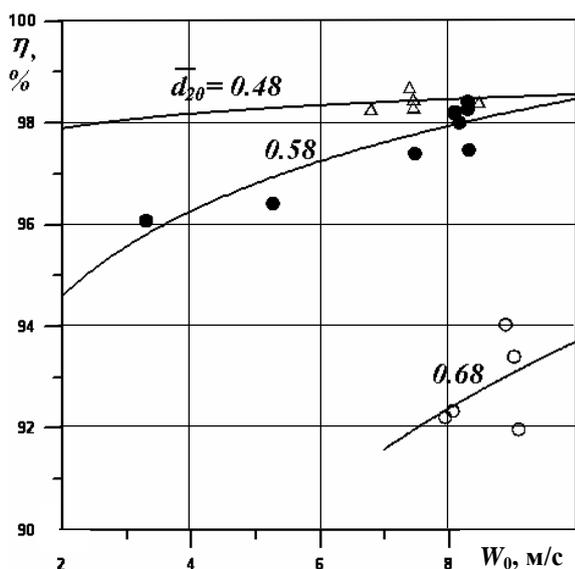


Рис. 12. Зависимость эффективности пылеулавливания от среднерасходной скорости и диаметра начального участка выхлопного патрубка  $\bar{d}_{20}$

до 0,48 нецелесообразно, т. к. не приводит к существенному повышению эффективности очистки, но по-прежнему сопровождается ростом сопротивления и снижением расхода  $Q$ . Полученные результаты позволяют рекомендовать ПЦПО с  $\bar{d}_{20} = 0,58$ . С увеличением скорости  $W_0$  газа эффективность пылеулавливания существенно возрастает для любого диаметра  $\bar{d}_{20}$ , что можно объяснить ростом центробежной силы. При  $W_0 > 8$  м/с темпы роста эффективности  $\eta$  для ПЦПО с диаметрами  $\bar{d}_{20} = 0,48$  и  $\bar{d}_{20} = 0,58$  снижаются и выравниваются по величине, что объясняется увеличением вторичного уноса отсепарированных частиц при больших скоростях газового потока. Статистическая обработка данных позволила обобщить экспериментальные результаты в виде регрессионных зависимостей, прогнозирующих эксплуатационные характеристики циклона:

средняя эффективность  $\bar{\eta} = 98,827 - 8,449 \cdot 10^{-9} \bar{d}_{20}^{9,509} \text{Re}_D^{-1,307} z^{0,024} \zeta_0^{-0,908}$ ; (37)

потери давления  $\Delta P = 1,875 \cdot 10^{-8} \text{Re}_D^{1,541} \bar{d}_{20}^{-1,907}$ ; (38)

удельные потери энергии на очистку  $\Delta H = 0,275 + 1,498 \cdot 10^{-14} (\text{Re}_D / \bar{d}_{20})^{2,75} z^{-0,052}$ , (39)

коэффициент сопротивления  $\zeta_0 = -28,365 + 32,872(\bar{d}_{20})^{-1,192} + \text{Re}_D^{-2,261} z^{4,514}$ . (40)

Статистическая значимость регрессий дана в табл. 4.

Таблица 4

Статистическая значимость регрессий

Формула	$R_0^2, \%$	$R_k$	$DW$	$\sigma$	$\Delta$
(37)	94,79	0,9894	1,12	0,78 %	0,56 %
(38)	97,53	0,9876	1,05	0,05 кПа	0,07 кПа
(39)	96,68	0,9832	1,13	0,05 кДж/кг	0,07 кДж/кг
(40)	99,51	0,9975	1,13	0,93	1,46

С ростом входной концентрации пыли от 35 до 120 г/м<sup>3</sup> наблюдается повышение эффективности сепарации ПЦПО-0,58, что объясняется эффектом коагуляции частиц пыли (рис. 13). Максимальная эффективность сепарации достигается при  $z = 80 \dots 140$  г/м<sup>3</sup>. Однако дальнейшее увеличение концентрации пыли приводит к существенному снижению эффективности пылеулавливания, что вызвано уменьшением центробежной силы в связи с большой пылевой нагрузкой. Кроме того, отскок частиц от стенки циклона способствует увеличению вероятности столкновений между частицами, приводит к разрыхлению «пристенного» слоя отсепарированных частиц и вторичному запылению потока. Следует отметить, что опыт при  $z = 342,6$  г/м<sup>3</sup> проводился при малом расходе воздуха  $Q = 0,03$  м<sup>3</sup>/с. Поэтому значение эффективности очистки невелико  $\bar{\eta} = 96,08$  %. Выявленному характеру зависимости  $\bar{\eta} = f(z)$  соответствуют данные для равновеликого прямооточного циклона НВГК, выбранного для сравнительных испытаний. Видно, что эффективность сепарации циклона НВГК на несколько процентов ниже эффективности циклона ПЦПО 0,58-32,5-1,7Б во всем диапазоне изменения концентрации пыли. Следует отметить узкий диапазон стабильной работы НВГК при пылевой загрузке от  $z$  от 120

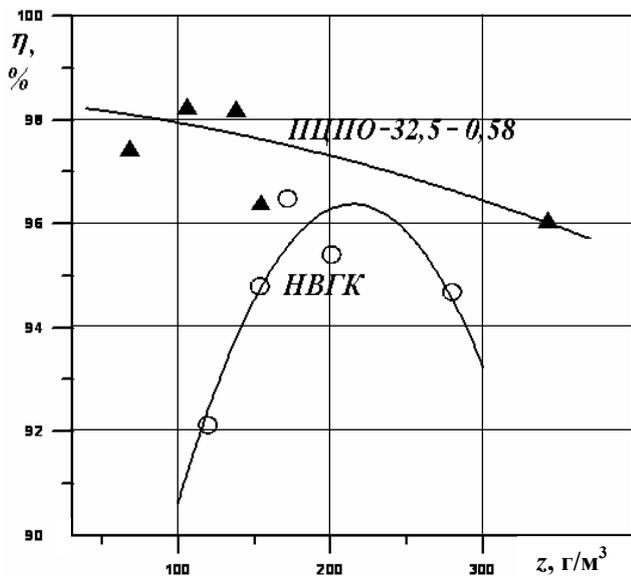


Рис. 13. Зависимость эффективности сепарации ПЦПО и НВГК от входной концентрации пыли  $z$

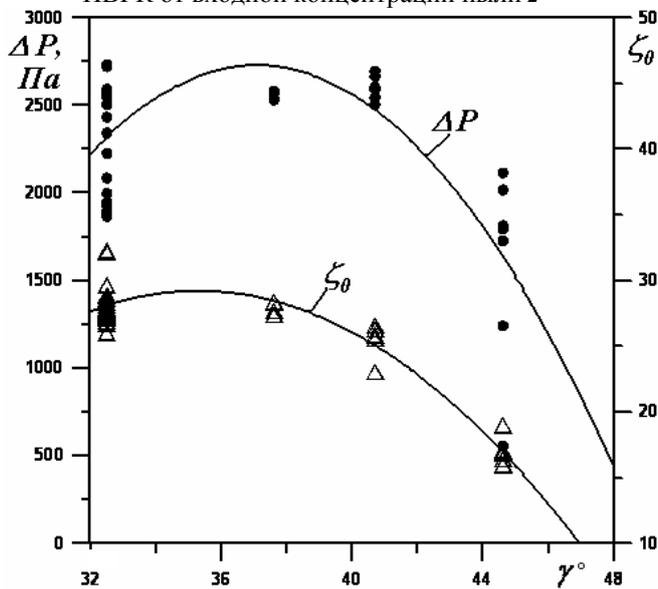


Рис. 14. Влияние угла  $\gamma$  на энергетические характеристики ПЦПО-0,68

до  $280 \text{ г/м}^3$ .

Большое внимание уделено изучению влияния геометрии пылеуловителя на энергетические характеристики  $\Delta P$ ,  $\zeta_0 = 2\Delta P / (\rho_g W_0^2)$ . Данные для ПЦПО с раскручивателем, снижающим гидравлическое сопротивление, свидетельствует, что его установка не уменьшает эффективность очистки. Установлено, что влияние формы и длины вытеснителя потока, положения ПО незначительно сказывается на  $\Delta P$  и могут быть описаны

$$\Delta P = 127,30 + 13,952 \cdot W_0^2. \quad (41)$$

Результаты аэродинамических испытаний ПЦПО на чистом воздухе с различными завихрителями приведены на рис. 14 ( $\bar{l}_0 = 1,308$ ,  $\bar{L}_K = 4,78$ ,  $\bar{F}_0 = 0,53$ ). Видно, что коэффициент  $\zeta_0$  существенно зависит от угла  $\gamma$  установки лопаток ОНА и режима движения, характеризуемого критерием  $Re_D$  (рис. 15). При  $Re_D > 6 \cdot 10^4$  наступает автомодельность  $\zeta_0$  по критерию Рейнольдса, кроме модели ПЦПО 0,68-40,7-1,7В, для которой характерен рост  $\zeta_0$ . Экспериментальные данные описываются двухфакторной моделью

$$\zeta_0 = 62,888 - 4,7 \cdot 10^{-5} \cdot Re_D - 0,915 \cdot \gamma. \quad (42)$$

Зависимость  $\zeta_0 = f(\gamma)$  в области автомодельности по числу  $Re_D$  имеет вид

$$\zeta_0 = -90,762 + 6,21 \cdot \gamma - 0,09 \cdot \gamma^2. \quad (43)$$

Статистическая значимость регрессий (41)...(43) приведена в табл. 5.

Следует отметить, что при увеличении запыленности потока до  $z = 23 \text{ г/м}^3$  коэффициент  $\zeta_0$  резко снижается на 6,5 % относительно его значения на чистом воздухе. Дальнейшее увеличение концентрации пыли до  $z = 160 \text{ г/м}^3$  сопровождается незначительным снижением  $\zeta_0$  на 0,11, т. е. наступает автомодельность коэффициента гидравлического сопротивления по запыленности потока. Наименьшими энергетическими характеристиками обладает ОНА с  $\gamma = 44,6^\circ$ , но эффективность сепарации циклона ПЦПО-0,68-44,6 при одинаковом расходе очищаемого газа ниже на 4...5 % по сравнению с ПЦПО-0,68-32,5, что объясняется меньшей закруткой потока и меньшими центробежными силами. С точки зрения эффективности очистки предпочтение следует отдать ОНА с наибольшей закруткой потока при  $\gamma = 32,5^\circ$ .

Существенное влияние на энергетические характеристики циклона ПЦПО оказывает диаметр начального участка выхлопного патрубка  $\bar{d}_{20}$ . С уменьшением  $\bar{d}_{20}$  гидравлическое сопротивление  $\Delta P$  ПЦПО возрастает. Уменьшение диаметра  $\bar{d}_{20}$  в 1,42 раза (с 0,68 до 0,48) при сопоставимых значениях скорости  $W_0$  (8,05 и 7,44 м/с) сопровождается

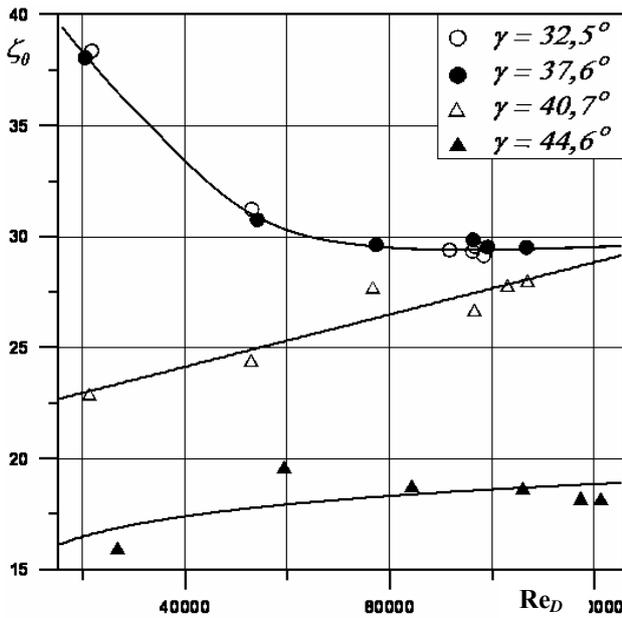


Рис. 15. Зависимость коэффициента гидравлического сопротивления ПЦПО-0,68 от критерия Рейнольдса и угла установки лопаток ОНА

Таблица 5.

Значимость регрессий

Формула	$n_e$	$R_d^2, \%$	$R_k$	$DW$	$\sigma$	$\Delta$
(41)	23	94,09	0,970	1,94	33,72 Па	96,83 Па
(42)	24	82,99	0,911	1,49	2,57	2,69
(43)	20	99,34	0,997	2,59	0,32	0,44

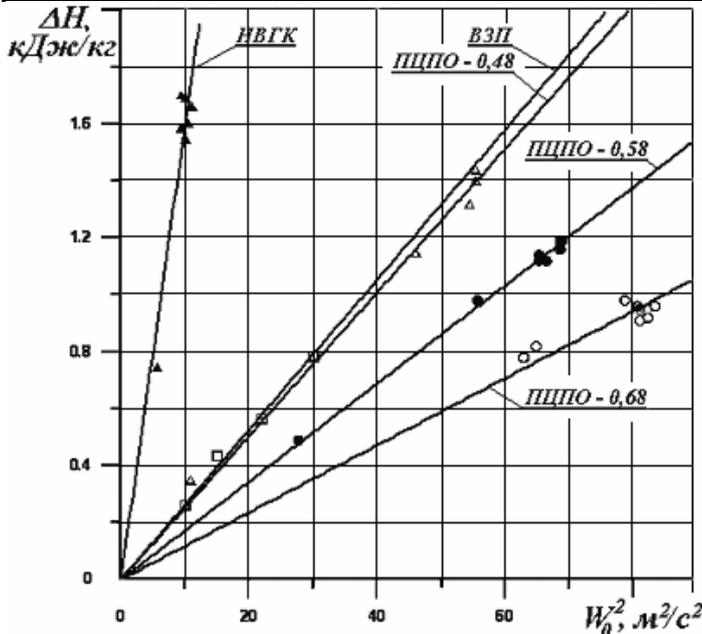


Рис. 16. Зависимость удельных потерь на очистку  $\Delta H$  от условной скорости  $W_0$  различных циклонов

увеличением  $\Delta P$  примерно в 1,781 раз (с 0,96 до 1,71 кПа), коэффициент  $\zeta_0$  возрастает в 2,04 раз (с 25,37 до 51,77). Для оптимальных диаметров выхлопных патрубков  $\bar{d}_{20} = 0,48 \dots 0,58$ , с точки зрения эффективности очистки, в области автономности по запыленности потока коэффициент  $\zeta_0$  меняется в пределах от 51,77 до 35,20. Учитывая, что переход к диаметру  $\bar{d}_{20} = 0,48$  сопровождается незначительным повышением эффективности очистки  $\bar{\eta}$  на 0,9 % при увеличении коэффициента  $\zeta_0$  в 1,46 раза, с энергетической точки зрения предпочтение следует также отдать ПЦПО с  $\bar{d}_{20} = 0,58$ .

Целесообразность применения того или иного пылеуловителя определяется не только эффективностью пылеулавливания, но и уровнем удельных потерь энергии  $\Delta H = \Delta P / \rho_g$  на очистку 1 м<sup>3</sup> газа (рис. 16). Циклоны НВГК ( $D = 0,12$  м,  $\bar{d}_{20} = 0,483$ ,  $\bar{d}_B = 0,567$ ) и ВЗП ( $D = 0,115$  м) испытаны на той же пыли и при одинаковом способе запыления потока. Разработанный ПЦПО имеет значительно меньшие удельные потери  $\Delta H$ , чем другие циклоны. Наибольшие значения  $\Delta H$  имеет аппарат НВГК. Это обусловлено цилиндро-конической формой аппарата и малым диаметром выхлопного патрубка. Удельные потери циклона ВЗП в 2,16 раза больше, чем у ПЦПО-0,58. Для ВЗП коэффициент  $\zeta_0 = 50,2$ , для НВГК  $\zeta_0 = 383,0 \dots 400,7$ , для ПЦПО-0,58  $\zeta_0 = 34,0 \dots 35,2$ . Если сопоставление проводить при равном гидравлическом сопротивлении, то пропускная способность ПЦПО ( $\bar{d}_{20} = 0,58$ ) в 3 раза больше, чем НВГК. Это означает, что для очистки одного и того же количества воздуха потребуется выполнять

циклон НВГК с диаметром, большим диаметра ПЦПО в  $\sqrt{8,7/3,1} = 1,64$  раза. Увеличение диаметра циклона нежелательно, так как оно сопровождается снижением эффективности сепарации, увеличением габаритов и металлоемкости. При этом следует отметить, что габаритные размеры ПЦПО при одинаковом расходе очищаемого газа значительно

меньше. Например, диаметр пылеуловителей НВГК и ВЗП в этом случае должен быть соответственно в 1,7 и 1,3 раза больше, чем диаметр ПЦПО (длина циклонов сопоставима по величине).

Значительное влияние на эффективность сепарации оказывает расход газа. Вместо расхода газа  $Q$  в качестве независимого параметра была использована среднерасходная скорость  $W_0$  (рис. 17). Возрастание скорости  $W_0$  от 3,3 до 8,3 м/с вызывает повышение мажорантной оценки эффективности очистки  $\eta_{\max}$  с 97,5 до 98,2...99,2 %. Для сравнения на рис. 17 приведены данные для ПЦПО-0,58-32,5-2,3 с раскручивателем и отсосом и аппарата со встречными закрученными потоками ВЗП. Характерно, что высокая эффективность очистки в ПЦПО достигается при вдвое больших скоростях, чем в ВЗП. Применение отсоса воздуха из бункера ВО в количестве 4...5 % от расхода заметно повысило

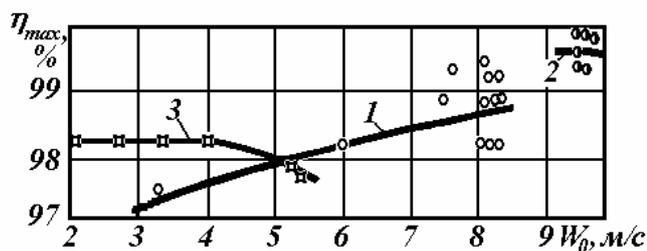


Рис. 17. Сопоставление циклонов ПЦПО и ВЗП по эффективности сепарации. 1—ПЦПО; 2 — ПЦПО с раскручивателем и отсосом; 3— ВЗП

эффективность очистки до  $\eta_{\max} = 99,64$  %. При этом эффективность по минорантной оценке составляет  $\eta_{\min} = 99,0$  %.

*Промышленные испытания ПЦПО.* Актуальная проблема минераловатного производства – эффективная очистка отходящих газов из ваграночных печей. На Новомальтинском заводе строительных материалов (Усольский район Иркутской обл.) в минераловатном производстве колошниковые газы очищались в рукавном фильтре, установленном на открытой площадке. Из-за сбоев в системе автоматического охлаждения отходящих из печей горячих колошниковых газов и высоких механических нагрузок при регенерации рукавных фильтров возникали их порывы, приводящие к залповым выбросам пыли в атмосферу. Низкая надежность рукавных фильтров, сложность обслуживания, высокая трудоемкость работ при замене фильтровальной ткани влияют на процесс сепарации. Образующаяся в минераловатном производстве грубая пыль (масс-медианный диаметр 72 мкм, насыпная плотность пыли 1008 кг/м<sup>3</sup>) характеризуется высоким коэффициентом абразивности. Для проведения промышленного эксперимента был разработан ПЦПО с эжектированием газа из бункера, схема которого представлена на рис. 2. Разработанный циклон был установлен параллельно имеющемуся рукавному фильтру. ПЦПО имел следующие конструктивные характеристики: диаметр сепарационной камеры 258 мм, диаметр выхлопного патрубка 127 мм, угол наклона закручивающих лопастей к радиальной плоскости 28°. Запыленность потока  $z$  определялась методом внешней фильтрации. Пробы запыленного потока отбирались с соблюдением принципа изокинетичности в тех же сечениях, в которых измеряли давление. Эффективность пылеулавливания  $\eta$  определялась массовым способом. В экспериментах  $z$  варьировалась в пределах от 2 до 11 г/м<sup>3</sup>, колебания температуры входного потока составляли от 60 до 180° С. Для определения дисперсного состава пыли использовался шестикаскадный импактор НИИОГАЗ и ситовый анализ. Как показали испытания, эффективность пылеулавливания  $\eta$  составила 89,3...93,6 %.

Результаты экспериментальных исследований ПЦПО представлены на рис. 18, 19. Видно, что зачистка сварных швов обеспечила снижение гидравлического сопротивления  $\Delta P$  на 34,5 % и повышение эффективности очистки  $\eta$  на 2...3 %. Использование эжектирующей насадки, отводящей воздух из пылевого бункера в поток очищенного газа, способствовало увеличению эффективности очистки  $\eta$  на 6 % . В целом эффективности очистки  $\eta$  увеличилась на 8...9 %.

Наблюдаемое повышение эффективности сепарации  $\eta$  при самоотсосе части воздуха из бункера можно объяснить выравниванием профиля скоростей при входе очищенного газа в выхлопной патрубок и вследствие этого уменьшением возмущения пристенного пылевого слоя при входе в бункер.

Как видно из рис. 19, при понижении среднерасходной скорости  $W_0$  наблюдается повышение эффективности очистки. Это можно объяснить снижением высоты отскока крупных (более 60 мкм) частиц пыли от стенок циклона, а для мелких частиц - уменьшением турбулентной диффузии.

Получены следующие рекомендации для проектирования прямооточных циклонов. Оптимальная скорость  $W_0$  для фракций крупнее 60 мкм составляет 5...6 м/с, а для фракций до 30 мкм - 8...10 м/с. Необходимо обеспечить самоотсос из бункера в количестве 4...5 % от общего расхода газа. Сварные швы и внутренние поверхности циклона следует тщательно зачищать.

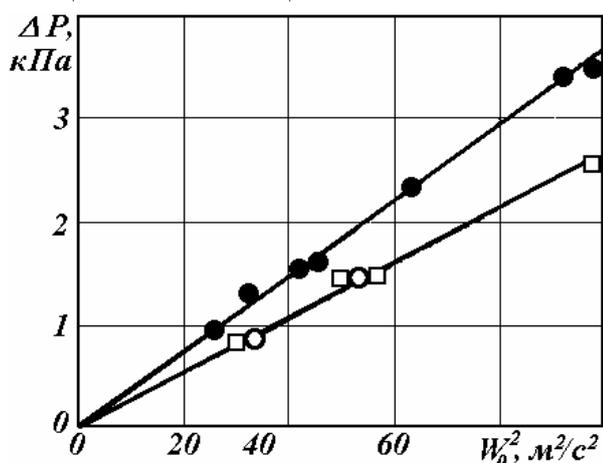


Рис. 18. Влияние скоростного напора  $W_0^2$  на гидравлическое сопротивление циклона  $\Delta P$



Рис. 19. Влияние среднерасходной скорости  $W_0$  на эффективность пылеулавливания  $\eta$

Обозначение	Сварные швы	Отсос из бункера
●	Необработаны	Есть
□	Зачищены	Нет
●	Зачищены	Есть

На основе выполненных исследований разработан и внедрен вместо рукавного фильтра на Новомальтинском заводе стройматериалов групповой циклон из трех элементов общей производительностью 9000...11500 м<sup>3</sup>/ч для очистки колошниковых газов из ваграночных печей. Диаметр сепарационной камеры циклонного элемента 300 мм, ее длина 4,18D, диаметр патрубка очищенного газа  $d_{20} = 0,5D$ . Результаты промышленных испытаний группового циклона представлены в табл. 6, экспериментальная фракционная эффективность дана на рис. 5.

Таблица 6

Результаты промышленных испытаний группового циклона

Наименование показателя	Единица измерения	Результаты измерений			
		6000	9000	9000	11500
Расход газа	м <sup>3</sup> /ч	6000	9000	9000	11500
Гидравлическое сопротивление	кПа	0,75	1,6	1,4...1,3	1,78
Общая эффективность очистки	%	78,4	85,3	90...94	95,2
Входная запыленность	г/м <sup>3</sup>	2,45	6,20	10,0...15,0	9,23
Остаточная запыленность	г/м <sup>3</sup>	0,529	0,911	1...0,9	0,44

Масс-медианный диаметр исходной пыли на выходе из циклона 3,5 мкм,  $d_{50} = 14$  мкм. Анализ результатов промышленных испытаний группового циклона показывает, что с ростом расхода очищаемого газа эффективность пылеулавливания существенно возрастает, но вместе с ней растет и гидравлическое сопротивление пылеочистного аппарата. С увеличением запыленности потока эффективность сепарации также возрастает.

В главе 6 исследована возможность использования методов, предложенных М.И. Шиляевым, для прогнозирования эффективности пылеулавливания группового прямо-

точного циклона и выполнен расчет эффективности прямооточных и противоточных циклонов с использованием вероятностно-энергетического метода Вальдберга-Кирсановой. Относительная ошибка определения диаметра частиц пыли  $d_{50}$ , улавливаемых с эффективностью 50 %, превышает 10 % и достигает 68 % по сравнению с опытными данными. Также представлены методы расчета эффективности пылеулавливания циклонов любых типов и только прямооточных, разработанные автором.

Нами предложен эмпирический метод [18] пересчета эффективности очистки при одинаковых в среднем скоростях потоков с базового испытанного циклона (индекс  $a$ ) на геометрически подобный расчетный ( $p$ ) циклон по уравнению  $\varepsilon = (1 - \eta_p) / (1 - \eta_a) = \prod_i K_{ip} / K_{ia}$ . В основу этого метода положено допущение о независи-

мом влиянии диаметра аппарата  $D$ , медианного диаметра  $\delta_m$ , и концентрации  $z$  пыли на относительный пропуск  $\varepsilon$ . Однако, метод не учитывает влияние насыпной плотности  $\rho_\delta$  пыли на  $\varepsilon$ . В результате статистической обработки литературных и собственных экспериментальных данных получены регрессионные зависимости для расчета коэффициентов уноса  $K_D, K_\delta, K_z, K_\rho$  ( $F, F_T$  – наблюдаемый и табличный для уровня значимости 0,05 критерии Фишера-Снедекора):

$$K_D = 6,945 \cdot D^{0,865}; \quad (F = 148,0 > F_T = 5,12; D = 0,1 \dots 0,6 \text{ [м]}; \text{рис. 20}); \quad (44)$$

$$K_\delta = \exp(0,424 - 0,052 \cdot \delta_m); \quad (F = 134,3 > F_T = 4,35; \delta_m = 9,5 \dots 50 \text{ [мкм]}; \text{рис. 21}); \quad (45)$$

$$K_z = 0,938 + 67,91 \cdot (z - 0,12)^2; \quad (F = 67,07 > F_T = 3,40; z = 0,035 \dots 0,22 \text{ [кг/м}^3\text{]}; \text{рис. 22}); \quad (46)$$

$$K_\rho = 1,454 - 0,00034 \cdot \rho; \quad (F = 27,62 > F_T = 10,1; \rho_\delta = 1380 \dots 3032 \text{ [кг/м}^3\text{]}; \text{рис. 23}). \quad (47)$$

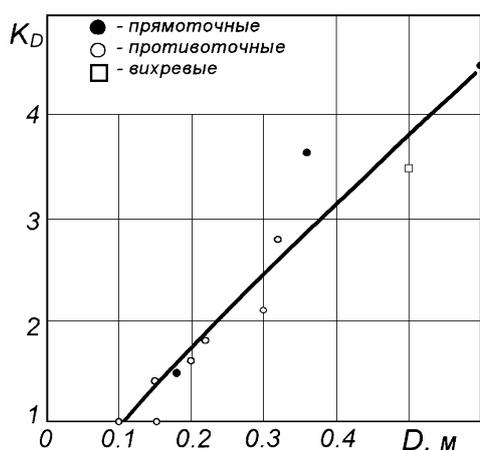


Рис. 20. Влияние диаметра циклона

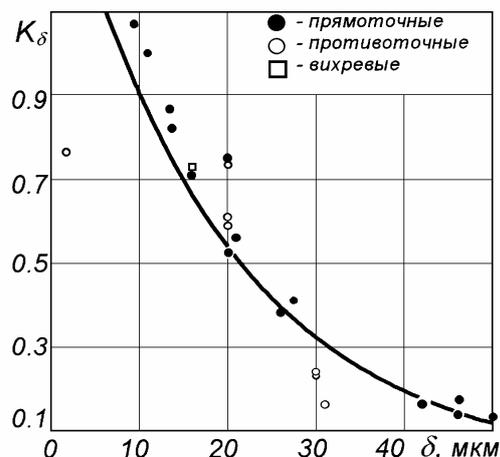


Рис. 21. Влияние масс-медианного диаметра пыли

Для определения неизвестной эффективности очистки  $\eta_p$  геометрически подобного циклона при заданных параметрах работы  $D, \delta, z, \rho$  получена расчетная формула (48).

$$\eta_p = 1 - \frac{K_D K_\delta K_z K_\rho}{K_{D_a} K_{\delta_a} K_{z_a} K_{\rho_a}} (1 - \eta_a). \quad (48)$$

Из формулы (48) следует, что влияние погрешностей определения коэффициентов уноса на точность расчета эффективности пылеулавливания незначительно, так как эти коэффициенты, входящие в расчет в виде отношений, являются функциями уноса  $(1 - \eta_a)$  – малой величины по сравнению с эффективностью сепарации  $\eta_a$ . Это подтверждается статистическим анализом сопоставления опытных и расчетных значений эффективностей сепарации и свидетельствует об устойчивости оценок.

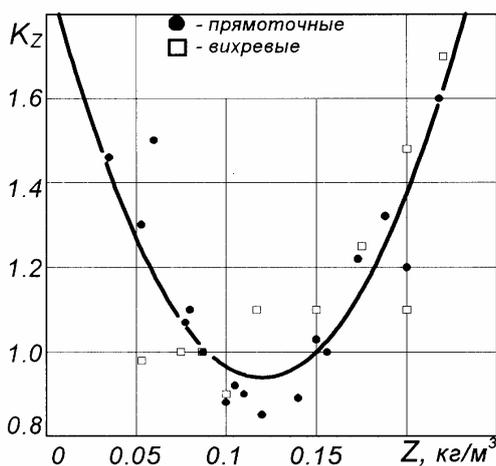


Рис. 22. Влияние запыленности потока

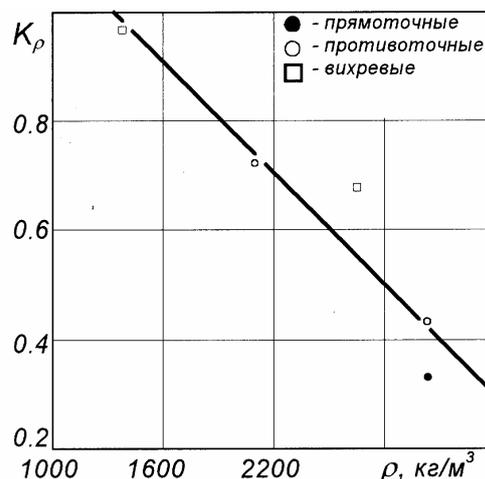


Рис. 23. Влияние плотности пыли

По формуле (48) была рассчитана эффективность очистки  $\eta_p$  28 циклонов и сопоставлена с экспериментальными значениями  $\eta_3$  (рис. 24). Статистическая значимость полученной корреляции определяется следующими характеристиками: коэффициент корреляции равен 0,908, критерий Фишера-Снедекора 126,39 ( $>F_T=2,51$ ), критерий Дарбина-Уотсона 2,22.

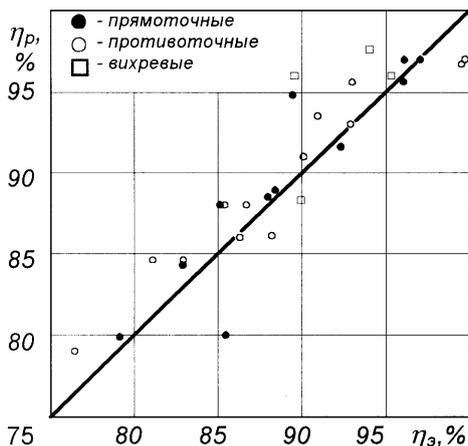


Рис. 24. Корреляция расчетной  $\eta_p$  по формулам (44)...(48) и экспериментальной  $\eta_3$

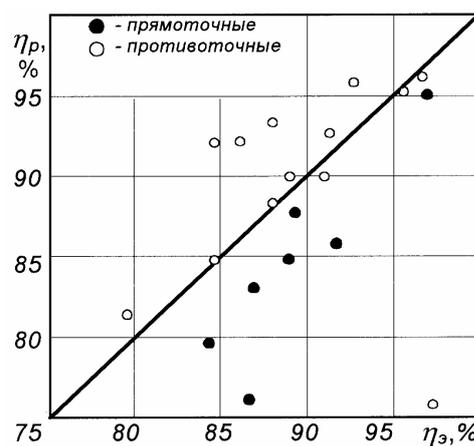


Рис. 25. Корреляция по методике НИИОГАЗ и экспериментальной  $\eta_3$

Для сравнения на рис. 25 приведено сопоставление  $\eta_3$  с расчетной эффективностью  $\eta_p$ , полученной по методике НИИОГАЗ для противоточных и прямоточных циклонов (объем выборки - 20 циклонов; коэффициент корреляции 0,386, критерий Фишера-Снедекора 3,14 ( $<F_T = 4,41$ ), критерий Дарбина-Уотсона 1,81). Анализ показывает, что расчет по предлагаемой методике является более точным по сравнению с методикой НИИОГАЗ в указанных пределах применимости. Достоинства предлагаемого метода: простота, учет влияния параметров  $z$  и плотности, универсальность (возможность расчета по данной модели эффективности циклона любого типа даже при отсутствии сведений о его фракционной эффективности), высокая точность.

Однако предложенный метод не учитывает влияние среднерасходной скорости потока  $W_0$ , что можно сделать при рассмотрении аппаратов одного класса. Кроме того, в этом случае погрешности в определении коэффициентов уноса  $K_i$  будут существенно уменьшены.

Для ПЦ получены регрессионные зависимости (49)...(52) для расчета коэффициентов уноса  $K_D$ ,  $K_\delta$ ,  $K_z$ ,  $K_W$ . Статистические коэффициенты значимости полученных регрессий приведены в табл. 7.

$$K_D = \frac{1 - \eta_D}{1 - \eta_{D_0}} = 0,6726 + 2,758 \cdot D; D = 0,046 \dots 0,600, \text{ м}; \text{ (рис. 26).} \quad (49)$$

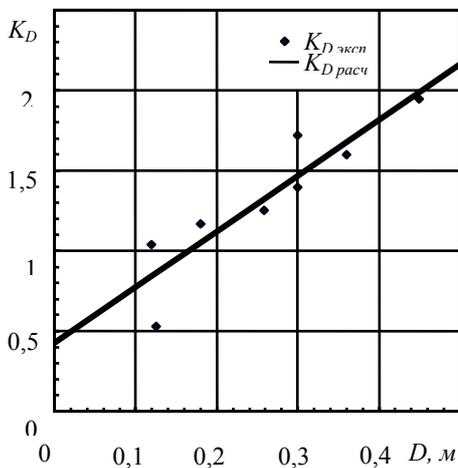
$$K_\delta = \frac{1 - \eta_{\delta_m}}{1 - \eta_{\delta_{m_0}}} = -0,0802 + \frac{11,29}{\delta_m}; \delta_m = 11 \dots 80, \text{ мкм}; \text{ (рис. 27).} \quad (50)$$

$$K_z = \frac{1 - \eta_z}{1 - \eta_{z_0}} = 0,202 + 0,1933 \cdot z^{-0,566}; z = 0,005 \dots 0,300, \text{ кг/м}^3; \text{ (рис. 28).} \quad (51)$$

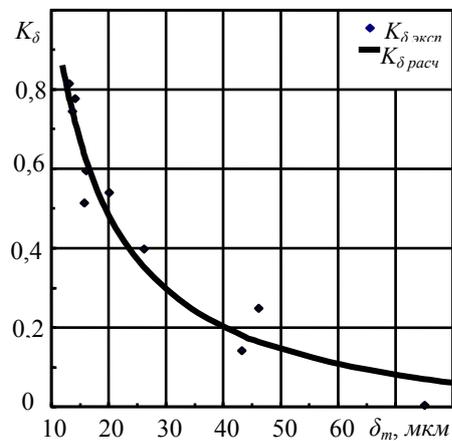
$$K_W = \frac{1 - \eta_W}{1 - \eta_{W_0}} = 1,7432 - 0,1071 \cdot W_0; W_0 = 3 \dots 17, \text{ м/с}; \text{ (рис. 29).} \quad (52)$$

Из рис. 29 видно, что с увеличением  $W_0$  относительный проскок пыли уменьшается, что объясняется увеличением центробежной силы.

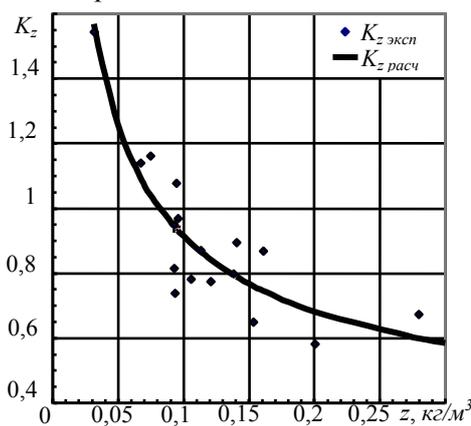
Зависимости (49)...(52) позволяют найти эффективность проектируемого циклона  $\eta_p$  для заданных условий работы, характеризующихся величинами  $D, \delta, z, W$ , по известной эффективности пылеулавливания  $\eta_a$  геометрически подобного циклона при параметрах  $D_a, \delta_a, z_a, W_a$  по формуле:  $\eta_p = 1 - \frac{K_D K_\delta K_z K_W}{K_{D_a} K_{\delta_a} K_{z_a} K_{W_a}} (1 - \eta_a)$ . (53)



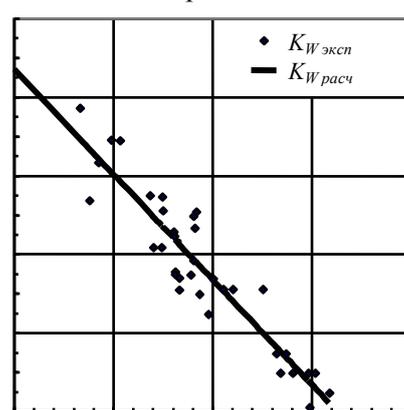
**Рис.26.** Зависимость коэффициента уноса  $K_D$  от диаметра



**Рис.27.** Зависимость коэффициента уноса  $K_\delta$  от медианного диаметра  $\delta_m$



**Рис. 28.** Зависимость коэффициента уноса  $K_z$  от запыленности потока  $z$



**Рис. 29.** Зависимость коэффициента уноса  $K_W$  от среднерасходной скорости  $W_0$

По предлагаемому методу была рассчитана эффективность сепарации  $\eta_p$  35 прямо-точных циклонов. Ее сопоставление с экспериментальными значениями  $\eta_a$  представлено на рис. 30. В табл. 7 приведена статистическая значимость гипотезы:  $\eta_a = \eta_p$ . (54)

На рис. 31 приведено сопоставление  $\eta_a$  с расчетной эффективностью  $\eta_{pH}$ , полученной по методике НИИОГАЗ (объем выборки 19 прямо-точных циклонов). В табл. 7 при-

ведена статистическая значимость гипотезы:  $\eta_a = \eta_{pH}$ . (55)

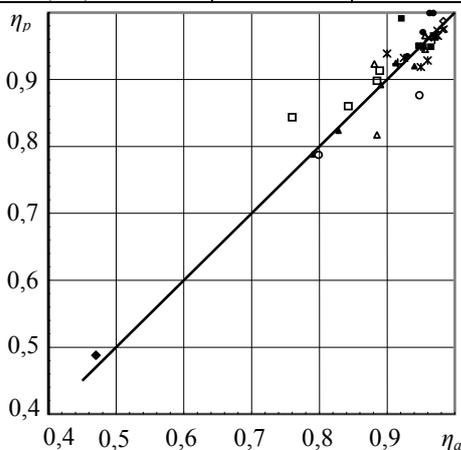
Сравнительный анализ рис. 30 и 31 показывает, что расчет по предлагаемому методу является более точным по сравнению с методикой НИИОГАЗ в указанных пределах применимости. Погрешности гипотез (54) и (55) определялись величиной средней относительной ошибки  $\varepsilon_{\text{омн}} = \frac{1}{n} \left[ \sum_{i=1}^n |(\eta_{ai} - \eta_{pi})| / \eta_{ai} \right] \cdot 100, \%$ , которая составила соответственно 1,6 % и 6,54 %.

Значительное повышение точности предлагаемого метода по сравнению с методикой НИИОГАЗ обусловлено рассмотрением аппаратов одного класса; отказом от использования логарифмически-нормального распределения дисперсного состава пыли, которому не удовлетворяют многие промышленные пыли из-за разных механизмов их образования; репрезентативным объемом выборки экспериментальных данных при определении регрессионных зависимостей; учетом наиболее значимых параметров, влияющих на эффективность пылеулавливания ПЦ.

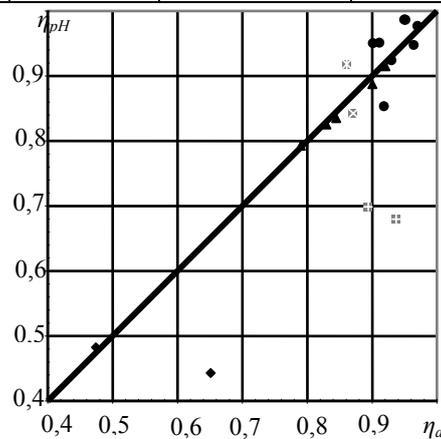
**Таблица 7**

Статистическая значимость регрессионных моделей

Номер формулы	$n$	$R^2, \%$	$R_k$	$DW$	$\sigma$	$\Delta$
(49)	8	86,93	0,9324	1,93	0,1285	0,0848
(50)	10	94,36	0,9714	1,71	0,0698	0,2339
(51)	16	83,99	0,9165	1,71	0,0990	0,1920
(52)	35	86,59	0,9305	1,56	0,1440	0,1165
(54)	35	95,21	0,9758	2,25	0,0201	0,0000
(55)	19	61,54	0,7845	1,58	0,0975	0,0268



**Рис. 30.** Корреляция эффективности  $\eta_p$ , рассчитанной по формулам (49)...(53), и экспериментальной  $\eta_a$



**Рис. 31.** Корреляция эффективности  $\eta_{pH}$ , рассчитанной по методике НИИОГАЗ, и экспериментальной  $\eta_a$

**В главе 7** выполнено сопоставление значений коэффициента гидравлического сопротивления и потерь давления, рассчитанных по известным зависимостям, с результатами экспериментального исследования ПЦПО диаметром 0,12 м с различными начальными диаметрами выхлопного патрубка. Относительные ошибки определения коэффициента сопротивления и потерь давления циклона колеблется от 31,4...51,8 % . Поэтому целесообразно разработать методику расчета применительно к ПЦПО. Представим гидравлическое сопротивление ПЦПО в виде суммы сопротивлений отдельных частей тракта: осевого направляющего аппарата (ОНА), сепарационной камеры и выхлопного патрубка.

*Потери на входе в сепарационную камеру циклона ПЦПО*

ОНА снабжен обтекателем, установленным на оси циклона (рис. 1). Потери при его

обтекании можно рассчитать по формуле:

$$\zeta_{об} = 2\Delta P_0 / (\rho_g W_0^2) \approx 1,15 c_x (S_M / F_0) / (1 - \tau \cdot S_M / F_0)^3,$$

где  $S_M = \pi d_m^2 / 4$  – площадь миделевого сечения обтекателя диаметром  $d_m = 0,09$  м, коэффициент лобового сопротивления  $c_x = 0,088$  и  $\tau = 0,5$  для  $Re_m = w_0 d_m / \nu = 1,35 \cdot 10^5$ . Тогда  $\zeta_{об} = 0,079$ . Коэффициент сопротивления ОНА  $\zeta_{зав} = A \cdot \cos \gamma^{1,7} / \bar{f}^{1,7} = 2,686$ , где  $\bar{f}$  – относительная площадь входного сечения ОНА.  $\Delta P_{ex} = 0,5(\zeta_{об} w_0^2 + \zeta_{зав} w_{ex}^2) \rho_g = 740,359$  Па, где  $w_3$  – скорость на выходе из ОНА.

#### Потери в кольцевых диффузорах сепарационной камеры

Сепарационная камера ПЦПО состоит из двух кольцевых диффузоров с прямолинейными образующими (рис. 32), одного кольцевого конфузора и одного кольцевого канала. В литературе нет сведений об испытании таких кольцевых диффузоров с  $\alpha_1 = 0^\circ$ , как в ПЦПО. Аналитический расчет кольцевых диффузоров выполнялся по эквивалентным углам и на основе характеристик пограничного слоя.

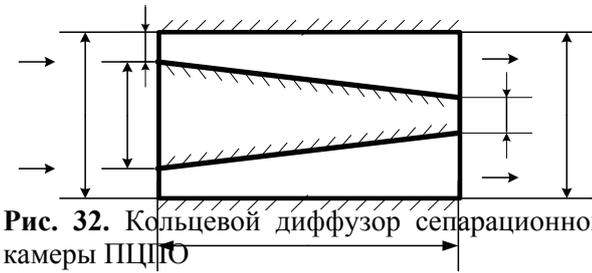


Рис. 32. Кольцевой диффузор сепарационной камеры ПЦПО

При расчете по эквивалентным углам диффузорному каналу ставился в соответствие конический диффузор с эквивалентным углом расширения  $\alpha_0$ , определяемым по уравнению

$$\alpha_0 = 2 \arctg \left[ \frac{(\sqrt{1 - \bar{d}_2}) (\sqrt{n_0} - 1)}{2L} \right], \text{ где } n_0 - \text{ степень расширения диффузора. Коэффициент внутренних потерь } \zeta \text{ эквивалентного конического диффузора}$$

определяется на основе соотношения  $\zeta = \varphi_d (1 - 1/n_0)^2$ , где  $\varphi_d$  – коэффициент полноты удара. Коэффициент полных потерь с учетом сжимаемости определяется по уравнению  $\zeta_n = \zeta + (\rho_1 / \rho_2)^2 / n_0^2$ .

По известным характеристикам пограничного слоя в выходном сечении кольцевого диффузора коэффициенты внутренних  $\zeta$  и полных  $\zeta_n$  потерь рассчитываются:

$$\zeta = (\rho_1 / \rho_2)^2 \cdot \bar{\Delta}_2^{***} / \left[ n_0^2 (1 - \bar{\Delta}_2^*)^3 \right], \quad \zeta_n = (\rho_1 / \rho_2)^2 / \left[ n_0^2 (1 - \bar{\Delta}_2^*)^2 \right],$$

где  $\bar{\Delta}_2^* = \Delta_2^* / F_2$ ,  $\bar{\Delta}_2^{***}$  – относительные условные площади вытеснения и потери энергии в выходном сечении диффузора. При расчете принималось  $\bar{\Delta}_2^{***} = 1,3 \bar{\Delta}_2^*$ . Величина  $\bar{\Delta}_2^*$  определяется для кольцевых диффузоров при  $n_0 < 3$  из уравнения (56), полученного на основе интегрального уравнения Кармана с учетом, что для ПЦПО  $\bar{D}_2 = 1$ :

$$\bar{\delta}_2^* \approx \bar{\Delta}_2^* = B \frac{(1 - \bar{d}_2^2)^{3,34} (1 - \bar{\Delta}_2^*)^{3,34}}{(1 - \bar{d}_2) (1 - \bar{d}_1^2)^{0,2}} \left[ \int_0^1 \frac{d\bar{x}}{\left\{ \left[ 1 - \bar{d}_1^2 \left[ 1 + \bar{x} \left( \frac{\bar{d}_2}{\bar{d}_1} - 1 \right) \right]^2 \right\}^{3,92} (1 - \sqrt{\bar{x}} \cdot \bar{\Delta}_2^*)^{3,92}} \right]} \right]^{0,8} \quad (56)$$

Все геометрические размеры отнесены к диаметру  $D_1$ . Параметр  $H$  зависит в основном от  $n_0$  и относительной длины диффузора  $L/D_1$ :  $H = 1,4 \left[ 1 + (\sqrt{n_0} - 1) / (L/D_1)^2 \right]$ . Значение комплексного параметра  $B$  вычисляется по формуле  $B = (0,144 / Re_1^{0,2}) (L/D_1)^{0,8} H$ , где  $Re_1 = \rho_1 D_1 w_1 / \mu$ . Начальное значение  $\bar{\Delta}_2^* = 0,04$  выбрано по полученным значениям пара-

метра  $B$  и  $n_0$  по номограмме. Интеграл в (56) вычислен по методу Симпсона. Для уточнения значения  $\bar{\Delta}_2^*$  использовался метод простой итерации. Для учета закрутки потока осевая компонента скорости воздуха  $w_1$  на входе в диффузор определяется из соотношения  $w_1 = w_{ax} \cos(90 - \gamma)$ .

Потери давления в первом диффузоре, вычисленные по кинетической энергии на выходе, составили по эквивалентному коническому диффузору  $\Delta P_1 = 4,253$  Па, по характеристикам пограничного слоя  $\Delta P_1 = 4,277$  Па. Известно, что при степенном распределении скорости в пограничном слое и одинаковой среднемассовой скорости гидравлическое сопротивление при поступательно-вращательном движении будет больше, чем при одномерном течении в  $\beta_0$  раз:  $\beta_0 = (1 + tg^2 \gamma)^{0,5(3-m)}$ , где  $tg \gamma = w_z / w_\phi$ ,  $w_\phi$  – скорость вращения потока у стенки,  $\gamma$  – угол закрутки потока у стенки,  $m=0,25$  для турбулентного режима и  $\beta_0=1,597$ . Тогда потери давления в первом диффузоре составят  $\Delta P_1 = \beta_0 \cdot 4,277 = 6,832$  Па. Потери давления во втором диффузоре составили по эквивалентному коническому диффузору  $\Delta P_2 = 5,051$  Па, по теории пограничного слоя –  $\Delta P_2 = 3,445$  Па. С учетом параметра  $\beta_0 - \Delta P_2 = 5,502$  Па.

Коэффициент полных потерь  $\zeta_n$ , вычисленный по характеристикам пограничного слоя, у второго диффузора ниже, чем у первого. Результаты расчета коэффициента  $\zeta_n$  по эквивалентному коническому диффузору для первого диффузора ниже результатов, полученных по теории пограничного слоя на 0,54 %, для второго выше на 33,67 %. Это можно объяснить тем, что при  $\alpha_s \geq 20^\circ$  характер течения во втором эквивалентном коническом диффузоре меняется. Интенсивность роста внутренних потерь вызвана появлением отрывных зон, и полные потери возрастают. Следует отметить, что для кольцевых диффузоров применение данного метода расчета ограничено значениями плоского угла  $\theta \leq 6...7^\circ$ . В рассматриваемом случае это условие выполнено. Кроме того, в качестве одного из критериев отрыва может быть использовано значение параметра  $H$ . В случае отрыва потока от стенок диффузора значение  $H$  находится в пределах 1,8...2,6.

#### *Расчет потерь в кольцевом конфузоре*

Гидравлическое сопротивление кольцевого конфузора рассчитано по эквивалентному коническому конфузору с той же степенью сужения  $n_0$ , длиной и площадью выходного сечения. Угол сужения эквивалентного конического конфузора равен

$$\alpha_s = 2 \arctg \left[ \left( \sqrt{1 - \bar{d}_2} \right) \cdot (1 - \sqrt{n_0}) / (2L) \right].$$

Коэффициент гидравлического сопротивления  $\zeta_{коф}$  конфузора представлялся в виде суммы коэффициентов местных потерь  $\zeta_m$  и потерь на трение  $\zeta_{тр}$ :  $\zeta_{коф} = \zeta_m + \zeta_{тр}$ . Коэффициент  $\zeta_m$  вычислялся по зависимости, справедливой для  $Re \geq 10^5$ ,  $n_0 \leq 1$ :

$\alpha_p = 0,01745\alpha$ ;  $\zeta_m = (-0,0125n_0^4 + 0,0224n_0^3 - 0,00723n_0^2 + 0,00444n_0 - 0,00745)(\alpha_p^3 - 2\pi\alpha_p^2 - 10\alpha_p)$ , где  $\alpha_p$  – радианах,  $\alpha$  – в градусах. Коэффициент трения круглого конфузора  $\zeta_{тр}$  равен:

$$\zeta_{тр} = 2\Delta P_{тр} / (\rho w_1^2) = \lambda(1 - n_0) / [8 \sin(\alpha/2)],$$

где  $\lambda = f(Re_1, \bar{\Delta})$ ,  $\bar{\Delta} = \Delta / D_1$  – относительная шероховатость стенок конфузора. Принято значение абсолютной шероховатости  $\Delta = 0,0001$  м. В зависимости от режима движения, который характеризовался числом  $Re_1$ , коэффициент трения вычислялся по формулам:

$$\text{для } Re_2 < Re_1 < Re_3 \text{ при } \bar{\Delta} \leq 0,007: \lambda = (\lambda_2 - \lambda_1) \exp\left\{-[0,0017(Re_3 - Re_1)]^2\right\} + \lambda_1,$$

где  $\lambda_1 \approx 0,032$ ,  $\lambda_2 = 7,244 Re_3^{-0,643}$ ,  $Re_2 = 1160(1/\bar{\Delta})^{0,11}$ ;  $Re_3 = 2090(1/\bar{\Delta})^{0,0635}$ .

При  $Re_1 \geq Re_3$  коэффициент  $\lambda$  определялся по формуле А.Д. Альтшуля:

$$\lambda \approx 0,1(1,46\bar{\Delta} + 100 / Re_1)^{0,25} \approx 0,11(\bar{\Delta} + 68 / Re_1)^{0,25}.$$

Осевая скорость на входе в конфузор принималась равной скорости на выходе из первого кольцевого диффузора. С учетом параметра  $\beta_0$  потери давления в кольцевом конфузоре будут равны  $\Delta P_K = 2,381 \cdot 1,597 = 3,803$  Па.

*Расчет потерь в кольцевом канале сепарационной камеры*

Для ПЦПО с соотношением диаметра внутренней вставки  $\bar{d}_{вст} = 0,75$ , согласно линейной интерполяции данных опытов Э.Н. Сабурова и С.В. Карпова,  $\zeta_{кан} = 1,11$ . Тогда гидравлического потери в кольцевом канале составят  $\Delta P_{кан} = 0,5 \zeta_{кан} \rho_g w_{ax}^2 = 303,949$  Па.

*Расчет потерь при входе в конфузорный коллектор и в выхлопной трубе*

Для снижения гидравлических потерь выхлопной патрубков очищенного газа был оснащен отбойной шайбой, выполненной в виде конфузора круглого сечения с прямыми линейными образующими.

Коэффициент гидравлического сопротивления в колене выхлопного патрубка  $\zeta_{кол}$  можно представить в виде  $\zeta_{кол} = \zeta_{МК} + \zeta_{КТР}$ , где  $\zeta_{МК}$ ,  $\zeta_{КТР}$  – коэффициента местного сопротивления и трения. Для расчета  $\zeta_{МК}$  использована формула Г.Н. Абрамовича:

$\zeta_{МК} = 2\Delta P_R / (\rho_g W_2^2) = A_1 B_1 C_1$ , где  $A_1$ ,  $B_1$ ,  $C_1$  – коэффициенты, учитывающие влияние угла изогнутости отвода  $\theta_k$ , относительного радиуса закругления и вытянутости поперечного сечения колена. При  $\theta_k = 90^\circ$ , по данным Б.Б. Некрасова,  $A_1 = 1$ , для круглого сечения колена  $C_1 = 1$ . При  $(R_0/d_0) \cdot (R_0/b_0) \geq 1$  величина  $B_1 = 0,21/\sqrt{R_0/d_0}$ . Для ПЦПО  $R_0/d_0 = 3$  и  $\zeta_{МК} = B_1 = 0,121$ . Коэффициент сопротивления трения  $\lambda_g$  определялся по формуле Кольбука методом дихотомии

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda_g}} = -2 \lg \left( \frac{2,5}{Re_g} \cdot \frac{1}{\lambda_g} + \frac{\bar{\Delta}_2}{3,7} \right).$$

Для нахождения коэффициента  $\zeta_{КТР}$  использована формула  $\zeta_{КТР} = 0,0175 \theta_k \lambda_g R_0 / d_{вых}$ .

Суммарные потери на входе в выхлопную трубу, оснащенную шайбой диаметром  $D_1 = 0,112$  м, и поворот составили  $\Delta P_{вых} = \Delta P_{КВ} + \Delta P_{КОЛ}$ . Полные потери в циклоне вычислялись по формуле  $\Delta P = \Delta P_{ax} + \Delta P_{вых} + \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_{кон} + \Delta P_{кан}$ . Сопоставление опытных значений сопротивления  $\Delta P_a$  циклона ПЦПО с расчетным  $\Delta P$  показало приемлемую точность предлагаемого метода расчета (погрешность не более 9,3 %, см. табл. 8). Погрешность определялась по формуле  $\bar{\Delta} = 100(\Delta P_a - \Delta P) / \Delta P_a$ , %.

**Таблица 8**

Расчет потерь давления в колене выхлопного патрубка и в циклоне

$\bar{d}_{вых}$	$Re_g \cdot 10^5$	$\bar{\Delta}_2 \cdot 10^{-2}$	$Re_{пред} \cdot 10^5$	$\lambda_g$	$\zeta_{КТР}$	$\zeta_{КОЛ}$	$\Delta P_{кол},$ Па	$\Delta P_{вых},$ Па	$\beta_0 \Delta P_{вых},$ Па	$\Delta P,$ кПа	$\Delta P_a,$ кПа	$\bar{\Delta}, \%$
0,48	1,50	0,174	2,88	0,0282	0,1333	0,2545	197,3	311,65	497,83	1,56	1,71	8,77
0,58	1,24	0,144	3,48	0,0286	0,1350	0,2562	93,15	131,08	209,40	1,27	1,40	9,28
0,68	1,06	0,122	4,08	0,0281	0,1329	0,2542	48,91	60,80	97,11	1,15	1,10	4,54

**В главе 8** описана автоматизированная система технологического расчета эффективности очистки и гидравлического сопротивления циклонов, разработанная автором и предназначенная для выбора пылеуловителя, обладающего наибольшей эффективностью очистки при заданных режимах работы.

Система представляет собой совокупность базы данных (БД) «Циклоны» и клиентского приложения, предоставляющего пользователю возможность удобного и быстрого доступа к данным из базы, ввода и редактирования информации, поиска циклонов по заданным критериям, а также произведение расчетов. Пользователям предоставляется

выбор системы управления БД: MS SQL Server (если планируется большое количество клиентских приложений) или MS Access (локальная база данных).

В базе данных хранятся основные конструктивные (диаметры сепарационной камеры и патрубка очищенного газа, длина аппарата) и технологические параметры циклонов (диапазон оптимальных средних скоростей, объемный расход очищаемого газа, коэффициент гидравлического сопротивления, потери давления в аппарате, масс-медианный диаметр частиц и плотность пыли, запыленность потока, эмпирическая эффективность очистки циклона). Также БД содержит информацию о свойствах газов и пылей, сведения о литературных источниках. В клиентском приложении реализован интерфейс для взаимодействия пользователя с базой данных. Клиентская часть, выполненная в среде Borland Delphi, отвечает за обработку результатов запросов и двустороннюю связь с базой данных. Реализована возможность добавления и редактирования информации. Выбор метода расчета конкретного циклона предоставляется пользователю.

При расчетах используются следующие методы для оценки качества очистки проектируемого циклона: типовая методика НИИОГАЗ, универсальный метод М.И. Шиляева, эмпирические методы, разработанные автором.

Для ускорения поиска и выбора наилучшего среди прямоточных, противоточных и пылеуловителей со встречными закрученными потоками использованы встроенные средства для вывода лучших показателей. Это позволяет принять оптимальное решение о виде проектируемого циклона для заданных режимов работы.

В системе реализована возможность сохранения результатов расчета, формирования отчетов. Предусмотрена защита от некорректного ввода данных.

Автоматизированная система технологического расчета циклонных пылеуловителей зарегистрирована в отраслевом фонде алгоритмов и программ (№ 8990) и может быть использована в качестве подсистемы САПР химико-технологического и природоохранного оборудования.

### **Основные выводы**

1. Математическое моделирование движения полидисперсной газопылевой системы, введение понятия «путь сепарации частицы пыли» позволили получить многопараметрические регрессионные зависимости пути сепарации уловленных и уносимых частиц и разработать на их основе вероятностную модель фракционной эффективности прямоточного циклона, адекватно описывающую процесс сепарации. Зависимости оценивают влияние конструктивных и технологических параметров на эффективность и гидравлическое сопротивление прямоточного циклона с промежуточным отбором пыли.

2. С позиций математического моделирования процесса разделения газа и частиц пыли обоснованы и рассчитаны оптимальные конструкция и режимы промышленной эксплуатации прямоточного циклона. Интенсификация процесса сепарации обеспечивается за счет использования промежуточного отбора пыли, располагаемого на оптимальном расстоянии от осевого направляющего аппарата, которое определяется углом установки лопаток; установки профилированного вытеснителя центрального вихря, имеющего сужение в зоне промежуточного отбора для уменьшения вторичного уноса отсепарированной пыли; эжектирования воздуха из пылевого бункера в патрубок очищенного газа. Расположение промежуточного отбора, форма и длина вытеснителя потока не оказывают существенного влияния на коэффициент гидравлического сопротивления прямоточного циклона, поэтому эти конструктивные параметры следует выбирать из условия достижения максимальной эффективности пылеулавливания. Устойчивая эффективная работа циклона наблюдается при нагрузке по пыли до  $140 \text{ г/м}^3$ , оптимальной среднерасходной скорости для пыли средней дисперсности  $8 \dots 10 \text{ м/с}$ , для

грубодисперсной пыли – 5...6 м/с.

3. Изменение закрутки транспортирующего потока при малых числах Рейнольдса (5...6) вызывает возникновение обратных осевых и тангенциальных пристенных потоков, которые приводят к уносу отсепарированных частиц пыли.

4. Количественная оценка диаметра частиц, уносимых в поток за счет эффекта Магнуса, позволила установить, что падение эффективности очистки с увеличением диаметра циклона и уменьшением плотности пыли является следствием не только увеличения пути сепарации, но и увеличения диаметра частиц, отрывающихся от стенок силой Жуковского.

5. Декомпозиционный подход к систематизации экспериментальных данных по эффективности пылеулавливания обеспечивает достоверность и точность предлагаемых методов прогнозирования эффективности пылеулавливания при масштабном переходе к другому типоразмеру и смене режимов работы: универсального, пригодного для циклонов любых типов (ошибка прогноза  $\pm 2...4\%$ ), и только для прямоточных циклонов с учетом среднерасходной скорости потока (ошибка прогноза  $\pm 1,6\%$ ).

6. Метод оценки гидравлического сопротивления прямоточного циклона с промежуточным отбором пыли показал, что с увеличением диаметра выхлопного патрубка до 0,68 от диаметра циклона точность прогноза гидравлического сопротивления увеличивается, а гидравлические потери снижаются, что объясняется отсутствием отрыва потока от стенок диффузорно-конфузорного канала циклона.

7. Внедрение на Новомальтинском заводе стройматериалов группового циклона из трех элементов общей производительностью 9000...11500 м<sup>3</sup>/ч для очистки колошниковых газов из ваграночных печей показало надежность и высокую эффективность очистки газов в циклоне (94,0...95,2 %) при использовании эжекционного отсоса части газа из пылевого бункера.

8. Автоматизированная система технологического расчета и прогнозирования показателей работы циклонов при промышленной эксплуатации позволяет оптимизировать выбор наилучшего пылеуловителя для заданных режимов работы. Внедрение автоматизированной системы в учебный процесс Ангарской государственной технической академии, Томского политехнического университета, Иркутского государственного университета путей сообщений и Восточно-Сибирского технологического университета (г. Улан-Удэ) позволит сформировать у студентов практические навыки в выборе и технологическом расчете пылеулавливающего циклонного оборудования при изучении дисциплин «Процессы и аппараты химической технологии», «Инженерные методы защиты атмосферы», «Промышленная экология» и др.

В диссертационном исследовании разработаны конструкции высокопроизводительных и высокоэффективных прямоточных циклонов с промежуточным отбором пыли, превосходящие по технико-экономическим показателям известные прямоточные, многие противоточные и циклоны со встречными закрученными потоками. Предложены методы оценки эффективности пылеулавливания и гидравлического сопротивления с более высокой точностью прогноза по сравнению с известными методами. Получены регрессионные зависимости, прогнозирующие показатели работы прямоточного циклона с промежуточным отбором пыли при промышленной эксплуатации, пригодные для постановки оптимизационных задач на стадиях проектирования и модернизации систем пылеочистки.

**Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах**

**Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК:**

1. **Асламова, В.С.** Характер движения частиц пыли в прямоточном циклоне с промежуточным

отбором пыли / В.С. Асламова, А.А. Асламов, Т.Н. Мусева // Известия Томского политехнического университета.– 2007. – Т. 310. – № 1. – С. 166-171 (поступила в редакцию 12.09.2006).

2. **Асламова, В.С.** Вероятностно-статистическое моделирование эффективности сепарации частиц пыли в прямоточном циклоне / В.С. Асламова, А.А. Асламов, П.К. Ляпустин, Д.В. Гендин // Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та. – 2007. – Т. 1. – № 1(29). – С. 27-30 (принята к публикации 02.11.2006).
3. **Асламова, В.С.** Прямоточный циклон для минераловатного производства / В.С. Асламова, А.А. Асламов, П.К. Ляпустин, Т.Н. Мусева, Н.А. Брагин // Экология и промышленность России. – 2007. – № 6. – С. 26–27.
4. **Асламова, В.С.** Групповой прямоточный циклон для минераловатного производства / В.С. Асламова, А.А. Асламов, П.К. Ляпустин, Т.Н. Мусева, Н.А. Брагин // Экология и промышленность России. – 2007. – № 12. – С. 6-7.
5. **Асламова, В.С.** Промышленные испытания группового прямоточного циклона с промежуточным отбором пыли / В.С. Асламова, А.А. Асламов, П.К. Ляпустин, Д.В. Гендин // Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та. – 2007. – Т. 1. – № 2(30). – С. 6-8 (принята к публикации 02.11.2006).
6. **Асламова, В.С.** Универсальный метод расчета эффективности пылеулавливания циклонов / В.С. Асламова, А.А. Асламов, Т.Н. Мусева, А.А. Жабей // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2008. – № 1. – С. 34-37.
7. **Асламова, В.С.** Статистическое моделирование эффективности пылеулавливания прямоточных пылеуловителей при масштабном переходе / В.С. Асламова, А.А. Асламов, Н.А. Брагин, Т.Н. Мусева, А.А. Жабей, А.Н. Гредюшко // Химическая промышленность сегодня. – 2008. – № 2. – С. 42-48.
8. **Асламова, В.С.** Эмпирический метод расчета эффективности очистки прямоточных циклонов при масштабном переходе / В.С. Асламова, А.А. Асламов, А.А. Жабей, М.И. Аршинский // Известия высших учебных заведений. Серия «Химия и химическая технология». – 2008. – Т. 51. – № 12. – С. 80-83.

#### **Авторские свидетельства и патенты**

9. А.С. № 1386309 СССР. Прямоточный циклон / **В.С. Асламова**, А.Н. Шерстюк и др. – Оpubл. в Б.И. – 1988. – № 13.
10. А.С. № 1421377 СССР. Вентилятор-сепаратор / **В.С. Асламова**, А.Н. Шерстюк, Н.А. Иванков и др. – Оpubл. в Б.И. – 1988. – № 33.
11. Патент RU 61156 U1, МПК В04С 3/06. Прямоточный циклон / **В.С. Асламова**, А.А. Асламов, П.К. Ляпустин, Т.Н. Мусева, Н.А. Брагин. – Бюл. № 6. – 2007.
12. Свидетельство об отраслевой регистрации разработки № 8990. Автоматизированная система расчета эффективности циклонных пылеуловителей / **В.С. Асламова**, А.А. Жабей, А.А. Асламов. – 2007.
13. Полож. решение на выдачу патента на изобретение по заявке № 2007117432/15(018990) от 2.12.2008. Способ определения эффективности пылеулавливания циклонов / **В.С. Асламова**, А.А. Асламов, А.А. Жабей. – Бюл. № 1. – 2009.

#### **Публикации в рецензируемых журналах**

14. **Асламова, В.С.** Пути совершенствования прямоточных циклонов / В.С. Асламова, А.Н. Шерстюк, О.А. Трошкин // Химическое и нефтяное машиностроение. – 1986. – № 1. – С. 39-42.
15. **Асламова, В.С.** Центробежный вентилятор-пылеуловитель / В.С. Асламова, А.Н. Шерстюк, О.А. Трошкин // Химическое и нефтяное машиностроение – 1987. – № 4. – С. 25-27.
16. **Асламова, В.С.** Эмпирический метод оценки эффективности сепарации циклонов / В.С. Асламова, А.Н. Шерстюк // Теплоэнергетика. – 1990. – № 5. – С. 61-62.
17. **Асламова, В.С.** Новый прямоточный циклон с промежуточным отбором пыли / В.С. Асламова, А.Н. Шерстюк, О.А. Трошкин // Химическое и нефтяное машиностроение. – 1991. – № 1. – С. 24-25.

18. **Асламова, В.С.** Влияние геометрических и режимных параметров прямооточного циклона на его эффективность / В.С. Асламова, А.Н. Шерстюк // Теплоэнергетика. – 1991. – № 10. – С. 63-67.
  19. **Асламова, В.С.** Движение частицы во вращающемся газопылевом потоке с анизотропной вязкостью / В.С. Асламова, А.А. Асламов, П.К. Ляпустин // Вестник Иркут. гос. техн. ун-та. – 2001. – № 9. – С. 78-83.
  20. **Асламова, В.С.** Сопоставление результатов расчета коэффициента гидравлического сопротивления и потерь давления прямооточного циклона с промежуточным отбором с экспериментом / В.С. Асламова // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – Т. 313. – № 4. Энергетика. – С. 50-53.
  21. **Асламова, В.С.** Расчет гидравлического сопротивления прямооточного циклона с промежуточным отбором / В.С. Асламова // Известия Томского политехнического университета. — 2008. – Т. 313. – № 4. Энергетика. – С. 54-60.
  22. **Асламова, В.С.** Разностные схемы уравнений Навье-Стокса в переменных «функция тока-вихрь» и их решение методом прогонки с использованием дробных шагов / В.С. Асламова, Т.Н. Мусева // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2009. – № 1. – С. 50-58.
  23. **Асламова, В.С.** Автоматизированная система технологического расчета циклонов / В.С. Асламова, А.А. Жабей // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2009. – № 1. – С. 59-63.
- Монография**
24. **Асламова, В.С.** Прямоточные циклоны. Теория, расчет, практика / В.С. Асламова. – Ангарск: АГТА, 2008. – 233 с.
- Статьи в сборниках трудов, другие публикации**
25. **Асламова, В.С.** Влияние некоторых режимно-конструктивных параметров на эффективность прямооточного циклона с промежуточным отбором пыли / В.С. Асламова // Конструирование, исследование машин, аппаратов и реакторов химической техники: Межвузовский сб. научн. трудов. – М.: МИХМ. – 1986. – № 2. – С. 133-137.
  26. **Асламова, В.С.** Прямоточный циклон с промежуточным отбором пыли / В.С. Асламова, А.Н. Шерстюк // Экспресс-информация Сер. ХМ-14. Отечественный опыт. – М.: ЦИНТИ-ХИМНЕФТЕМАШ, 1987. – № 2. – С. 3-5.
  27. **Асламова, В.С.** Методика расчета эффективности сепарации циклонов / В.С. Асламова, А.А. Асламов, П.К. Ляпустин // Сб. науч. тр. к 50-летию ИркутскНИИхиммаш. – Иркутск: ИркутскНИИхиммаш, 1999. – С. 283-287.
  28. **Асламова, В.С.** Модель сепарации частиц с учетом влияния броуновского движения и эффекта Магнуса / В.С. Асламова, А.А. Асламов, П.К. Ляпустин // Сб. тр. 14-й Международной конференции «Математические методы в технике и технологиях». – Т. 3. – Смоленск: Смоленский филиал Московского энергетического ин-та, 2001. – С. 24-26.
  29. **Асламова, В.С.** Вероятностная модель сепарации частиц в кольцевом закрученном потоке / В.С. Асламова, А.А. Асламов, П.К. Ляпустин // Сб. тр. 18-й Международной конференции «Математические методы в технике и технологиях». – Т. 3. – Казань, 2005. – С. 183-185.
  30. **Асламова, В.С.** Алгоритм расчета эффективности сепарации циклонных пылеуловителей / В.С. Асламова, А.А. Асламов, П.К. Ляпустин // Современные технологии и научно-технический прогресс: Сб. тр. науч. техн. конф. Ч. 1. – Ангарск: АГТА, 2005. – С. 133-139.
  31. **Асламова, В.С.** Разработка и испытание группового прямооточного циклона / В.С. Асламова, А.А. Асламов, П.К. Ляпустин // Сб. научн. трудов. – Т. 1. – Химическая технология. Техническая кибернетика. Прочие науки. – Ангарск: АГТА, 2006. – С. 226-230.
  32. **Асламова, В.С.** Математическое моделирование движения газа в прямооточном циклоне / В.С. Асламова, А.А. Асламов, Т.Н. Мусева // Материалы Международной конференции «Химия, химическая технология и биотехнология на рубеже тысячелетий». Т. 1. – Томск: Изд-во ТПУ, 2006. – С. 395-396.
  33. **Асламова, В.С.** Прогнозирование пылеулавливания циклонными пылеуловителями / В.С.

- Асламова, А.А. Асламов, П.К. Ляпустин // *Материалы Международной конференции «Химия, химическая технология и биотехнология на рубеже тысячелетий»*. – Томск: Изд-во ТПУ, 2006.–С. 375-376.
34. **Асламова, В.С.** Метод оценки эффективности сепарации прямоточных циклонов / В.С. Асламова, А.А. Асламов, Т.Н. Мусева и др. // *Сб. тр. 20-й Международной конференции «Математические методы в технике и технологиях»*. – Т. 3. – Ярославль: Изд-во ЯГТУ, 2007. – С. 208-212.
35. **Асламова, В.С.** Сопоставление методов фракционной эффективности по М.И. Шиялеву с экспериментом / В.С. Асламова, А.А. Асламов, Т.Н. Мусева // *Материалы научно-практической конф. «Безопасность регионов – основа устойчивого развития»*. Т. 3. – Иркутск: Изд-во ИрГУПС, 2007. – С. 106-110.
36. **Асламова В.С.** Автоматизированная система расчета эффективности циклонных пылеуловителей / А.А., Жабей, В.С. Асламова, Асламов А.А. // *Инновации в науке и образовании*. – 2007. – № 6 (31). – С. 27.
37. **Асламова, В.С.** Эмпирический метод расчета эффективности очистки прямоточных циклонов / В.С. Асламова, А.А. Жабей, Т.Н. Мусева // *Вестник Ангарской государственной академии*. – 2007. – Т. 1. – № 1. – С. 15-20.
38. **Асламова, В.С.** Автоматизированная система расчета эффективности циклонных пылеуловителей / В.С. Асламова, А.А. Асламов, Т.Н. Мусева, А.А. Жабей // *Сб. науч. тр. – Т. 1. Химия и химическая технология. Техническая кибернетика. Строительство. Экология*. – Ангарск: АГТА, 2007. – С. 22-27.
39. **Асламова, В.С.** К определению поля скоростей газа в прямоточном циклоне / В.С. Асламова, А.А. Асламов, Т.Н. Мусева, А.П. Максиков // *Вестник Ангарской государственной академии*. – 2007. – Т. 1. – № 1.– С. 21-23.
40. **Асламова, В.С.** Математическая модель движения закрученного потока в прямоточном циклоне / В.С. Асламова, Т.Н. Мусева // *Сб. тр. 21-й Международной конференции «Математические методы в технике и технологиях»*. – Т. 3. – Саратов: Изд-во СГТУ, 2008. – С. 252-255.
41. **Асламова, В.С.** Статистическое прогнозирование эффективности и гидравлического сопротивления прямоточного циклона / В.С. Асламова // *Сб. тр. 21-й Международной конференции «Математические методы в технике и технологиях»*. – Т. 3. – Саратов: Изд-во СГТУ, 2008. – С. 267-269.
42. **Асламова, В.С.** Оптимизация выбора наилучшего циклона / В.С. Асламова, А.А. Жабей // *Сб. тр. 21-й Международной конференции «Математические методы в технике и технологиях»*. – Т. 3. – Саратов: Изд-во СГТУ, 2008. – С. 280-281.

Подписано к печати 20.03.09. Формат 60x90 1/8. Печать трафаретная.  
Усл. печ. л. 2,5. Уч. печ. л. 2,5. Тираж 120 экз. Заказ № 1110  
Ангарская государственная техническая академия  
665835 г. Ангарск, ул. Чайковского, 60