

На правах рукописи

АРШИНСКИЙ МАКСИМ ИННОКЕНТЬЕВИЧ

**ПРОЦЕСС СЕПАРАЦИИ, ПОЛЯ СКОРОСТЕЙ И ДАВЛЕНИЙ
В ПРЯМОТОЧНОМ ЦИКЛОНЕ С СЕПАРАЦИОННОЙ КАМЕРОЙ
ПЕРЕМЕННОГО СЕЧЕНИЯ**

Специальность 05.17.08 – Процессы и аппараты химических технологий

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

ТОМСК – 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Ангарская государственная техническая академия» (АГТА).

Научный руководитель:

Асламов Александр Анатольевич – кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты:

Сваровский Александр Яковлевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры МАХП ФГАОУ ВПО «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (г. Томск);

Самсонов Валерий Викторович – кандидат технических наук, член-корр. РИА, генеральный директор ООО «Сибменеджмент» (г. Иркутск).

Ведущая организация – ОАО «Иркутский научно-исследовательский и конструкторский институт химического и нефтяного машиностроения» (ИркутскНИИхиммаш, г. Иркутск)

Защита состоится «17» сентября 2013 г. в 14⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.269.08 при ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634050, Томск, пр. Ленина, 43, корпус 2, ауд.117.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВПО НИТПУ по адресу 634050, Томск, пр. Ленина, 30.

Автореферат разослан « » 2013 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
к.т.н., доцент

Т.С. Петровская

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Основными источниками антропогенных аэрозольных загрязнений воздуха являются теплоэлектростанции, потребляющие уголь, и предприятия строительной индустрии. Сжигание каменного угля, производство цемента и выплавка чугуна дают суммарный выброс пыли в атмосферу, равный 170 млн. т в год. Традиционно действующие мокрые системы пылеулавливания энергоемки, требуют организации шламового хозяйства, исключают утилизацию уловленной пыли и не всегда обеспечивают нормы предельно допустимых выбросов. Поэтому особое значение приобретают разработка и совершенствование энергосберегающих сухих пылеуловителей. Дальнейшее сокращение вредных выбросов предприятиями может быть достигнуто вводом в действие эффективных прямоточных циклонов с промежуточным отбором пыли (ПЦПО), обеспечивающих высокую производительность при большой запыленности воздуха.

В отечественной и зарубежной литературе приведено большое количество исследований по закрученным потокам и явлениям, сопровождающим вихревые образования в свободных пространствах, либо в пустотелых конструкциях цилиндрического типа. Движение потока в кольцевом сечении рассматривается преимущественно в зазоре между вращающимися коаксиальными цилиндрами применительно к теории смазки в подшипниках скольжения. Современные конструкции пылеуловителей имеют сепарационную камеру в виде прямоточного канала с обтеканием встроенных конструкций, трансформирующих канал в кольцеобразную форму переменного сечения. Для закрученных потоков в таких каналах практически отсутствуют экспериментальные данные о полях скоростей и давлений.

Многие вопросы можно решить экспериментальным определением полей скоростей и давлений для закрученных течений, что способствует более эффективной эксплуатации известных аппаратов и конструированию новых более совершенных инерционных пылеуловителей.

Процесс сепарации в ПЦПО уже исследовался, однако, рациональные значения некоторых деталей его конструкции нуждаются в уточнении.

Исследование проводилось в рамках государственного задания вузам на НИР 7.3385.2011 «Исследование двухфазных закрученных потоков в кольцевом канале переменного сечения», 2012-2014 г., номер гос. регистрации № 01201257743.

Цель работы – совершенствование процесса пылеулавливания в прямоточном циклоне с сепарационной камерой переменного сечения на основе оптимизации структуры газодинамических течений технологическими и конструктивными параметрами.

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

1. Разработать лабораторный стенд с оптически прозрачным прямоточным циклоном с сепарационной камерой переменного сечения для визуальных исследований закрученного потока.
2. Измерить поля скоростей и статических давлений в сепарационной камере, определить структуру течений и разработать способы её усовершенствования.
3. Выявить влияние угла закрутки потока и площади эжектирующих отверстий на сепарационные характеристики ПЦПО.
4. Усовершенствовать эмпирический метод оценки эффективности сепарации

прямоточных циклонов.

5. Для производства цемента разработать технологическую схему узла разгрузки золы с групповым циклоном ПЦПО.

Научная новизна

1. Установлено что структура поступательного закрученного потока в кольцевом канале переменного сечения прямоточного циклона ПЦПО включает квазитвёрдое течение в центральной зоне и потенциальное – в периферийной зоне. При этом зона перехода между течениями приближена к наружной стенке кольцевого канала, и характеризуется максимальной скоростью, определяемой геометрией канала. Профиль поля скоростей формируется поверхностным трением и описывается уравнением, включающим гиперболический член и степенной с показателем 0,3.

2. Установлено, что в диффузно-конфузорной зоне сепарационной камеры переменного сечения возникает пристенное противоточное течение, обусловленное перепадом давлений на поверхностях конфузорной и диффузорной части вытеснителя, и инициирующее вращающийся кольцевой вихрь, нейтрализуемый оребрением, параллельным углу закрутки потока на поверхности конфузора, либо цилиндроконическим рассекателем вдоль конфузора, а также перепускным каналом от переходной зоны до выхлопного патрубка.

3. Установлено, что максимальные значения эффективности пылеочистки в прямоточном циклоне с промежуточным циклоне достигаются при угле установки лопаток осевого направляющего аппарата $28,3^\circ$ и степени перфорированности оголовка выхлопного патрубка 0,4 – 1,1 % от его проходного сечения.

Практическая значимость работы

1. Разработаны новые конструктивные предложения по улучшению структуры потоков и повышению газодинамического качества сепарационной камеры переменного сечения.

2. Разработан оптически прозрачный прямоточный циклон с промежуточным отбором пыли (ПЦПО) для исследования газодинамики и процесса сепарации.

3. Усовершенствован эмпирический метод оценки эффективности очистки прямоточных циклонов за счет введения коэффициента уноса, описывающего при сепарации совместное влияние на относительный унос пыли масс-медианного диаметра частиц пыли и ее плотности.

4. Разработаны технические предложения, технологическая схема и групповой циклон ПЦПО для узла разгрузки золы на ОАО «Ангарскцемент».

Реализация результатов работы: основные результаты работы и лабораторная установка используются в учебном процессе при подготовке студентов ФГБОУ ВПО «Ангарская государственная техническая академия» при чтении дисциплины «Процессы и аппараты химических технологий», а также приняты к использованию на ОАО «Ангарскцемент». Акты об использовании результатов приведены в диссертационной работе в приложении.

На защиту выносятся:

- поля скоростей, поля давлений и структура течений закрученного потока в кольцевом канале переменного сечения;
- технические решения по нейтрализации вращающегося кольцевого вихря;
- оптимальные значения конструктивных параметров ПЦПО;

- усовершенствованный эмпирический метод оценки эффективности очистки прямоточных циклонов;

- технологическая схема пылеочистой установки для узла разгрузки золы.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на: ежегодной научно-технической конференции «Современные технологии и научно-технический прогресс» в Ангарской государственной технической академии (2009 - 2013), Международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях» (Саратов, 2008, Волгоград, 2012, Нижний Новгород, 2013), Международной научно-технической конференции «Информационные и управляющие системы в пищевой и химической промышленности» (Воронеж, 2009), Международной научно-практической конференции «Безопасность регионов – основа устойчивого развития» (Иркутск, 2007, 2012), Всероссийской научно-практической конференции «Транспортная инфраструктура Сибирского региона» (Иркутск, 2013).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 22 работы, в том числе 6 статей, изданных в журналах, рекомендованных ВАК. Без соавторов опубликована 1 работа. В работах, опубликованных в соавторстве, личный вклад автора состоит в разработке и изготовлении лабораторного стенда, проведении исследований на всех этапах и обсуждении результатов.

Структура и объем работы. Диссертация включает введение, 4 главы, выводы, списки: использованной литературы (180 наименований), условных обозначений, индексов, сокращений и приложение. Объем работы составляет 175 страниц, в том числе 78 рисунков и 24 таблицы.

Благодарность. Автор признателен и благодарен доктору технических наук, профессору Асламовой Вере Сергеевне за ценные подсказки и замечания по ходу исследований и работы в целом.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении аргументирована актуальность, приведена общая характеристика диссертационной работы с тезисным изложением основных положений и результатов работы, обозначены цель и задачи исследования.

В главе 1 приведен обзор новых конструкций циклонов, анализ экспериментальных данных по закрученным потокам в технологических аппаратах и сепарационным характеристикам циклонов.

Существенный вклад в моделирование и совершенствование пылеочистного оборудования внесли отечественные ученые: И.Е. Идельчик, Д.Т. Карпухович, А.А. Русанов, Б.С. Сажин, А.Ю., Е.В. Сугак, А.Ю. Вальдберг, В.С. Логинов, М.И. Шиляев, М.В. Василевский, В.Н. Приходько, В.А. Лазарев, Е.П. Смирнов и др., а также зарубежные ученые В. Барт, Ж. Касал, С.Е. Лейпл, Ф. Менгер, В. Страус и др.

В результате литературного обзора установлено, что отсутствуют как экспериментальные данные, так и теоретические прогнозы по профилям полей полной скорости и статических давлений в прямоточном циклоне, сепарационная камера которого имеет переменное сечение, образующееся между цилиндрическим корпусом и профилированной вставкой. Отсутствие аэродинамической картины течений в сепарационной камере не позволяет разрабатывать адекватные модели сепарационных характеристик прямоточных циклонных пылеуловителей.

На основе анализа литературных источников сформулирована цель и поставле-

ны задачи исследования.

В главе 2. Рассмотрены математические модели расчета деталей закручивающего и раскручивающего лопастных аппаратов. Описана лабораторная установка для экспериментального исследования газодинамики закрученного потока с оптически прозрачной моделью ПЦПО с внутренним диаметром 114 мм (рис. 1). Закручивание потока осуществлялось осевым направляющим аппаратом (ОНА) 3 с радиальными двухрадиусными лопатками, выходные кромки которых направлены под углом 30° к поперечному сечению аппарата. Вставка 7 с максимальным диаметром 85 мм служит вытеснителем вихреобразования, формирующего центростремительный всасывающий эффект, который направлен против движущей силы процесса пылеочистки. Расстояние от закручивателя до промежуточного отбора – $2,3D$, до основного отбора – $4D$.

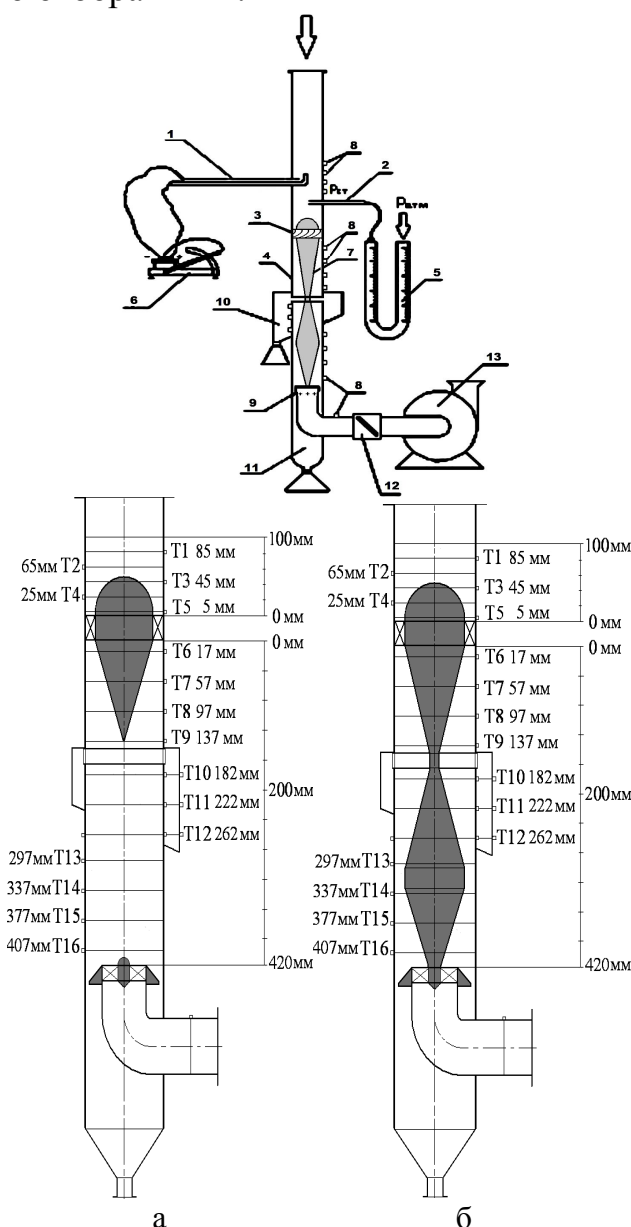


Рис 2. Точки замера для K1 (а) и K2 (б)

Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 – трубка Пито, 2 – зонд для измерения статического давления; 3 – ОНА; 4 – ПЦПО с оптически прозрачным корпусом, 5 – U-образный манометр, 6 – микроманометр серии ММН-240, 7 – вытеснитель центрального вихря, 8 – штуцеры для установки измерительных зондов, 9 – раскручивающий лопастной аппарат (РЛА), 10 – бункер промежуточного отбора (ПО), 11 – бункер основного отбора, 12 – регулирующая заслонка, 13 – вентилятор.

Измерения давления и полной скорости проводились по общепринятым стандартам по всему сечению ПЦПО с изменением положения зонда 2 диаметром 3 мм относительно внутреннего радиуса (поверхность зонда составляет 0,95...1,5% от площади поперечного сечения кольцевого канала). Полная скорость в закрученном потоке определялась поворотом откалиброванной трубки Пито и регистрировалась при максимальном показании U-образного манометра 5. При определении плотности воздуха его влажность не учитывали, так как при этом ошибка не превышает 0,5 %. Испытания проводились в циклоне двух конфигураций – с коническим (K1) и профилированным вытеснителем (K2). На рис. 2а представлено расположение точек замера в ПЦПО конфигурации K1, на рис. 3 –

соответствующее экспериментальное поле давлений, а на рис. 4 – экспериментальное поле полных скоростей. Как видно, поток закрученного воздуха от ОНА до выпускного патрубка теряет часть своей кинетической энергии в результате резкого

снижения давления в центре вихря.

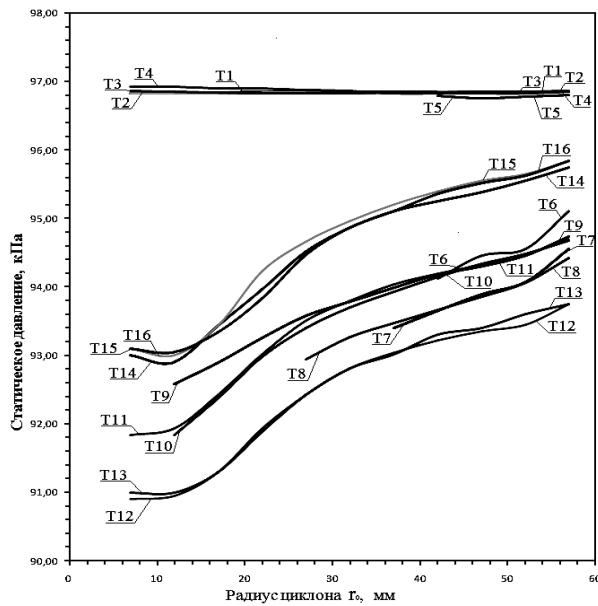


Рис. 3. Поле статического давления с К1

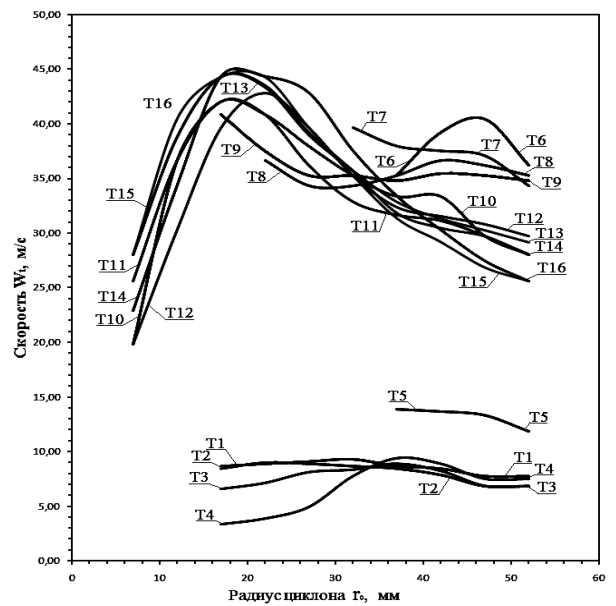


Рис. 4. Поле скоростей в ПЦПО с К1

Полная скорость на периферии несколько снижается из-за трения о стенки аппарата, но в зоне ядра вихря она стабильно высокая. Профили скоростей при вытеснителе К1 имеют экстремум на радиусе $r_m = 17\text{--}22$ мм. С физической точки зрения это объясняется изменением характера вращательного движения из потенциального течения в периферийной области на квазитвёрдое течение в центральной области. В результате обработки экспериментальных данных в пакете Statgraphics Plus профили полной скорости и статического давления аппроксимированы регрессионными зависимостями от безразмерного радиуса $\bar{r} = 2r/D$, представленными в табл. 1 и табл. 2 соответственно. Критерии достоверности аппроксимации: R^2 – коэффициент детерминации, DW – критерий Дарбина-Уотсона, среднеквадратическая σ и абсолютная Δ ошибки. Как видно из табл. 1, до ПО распределение скорости имеет вид:

$$W = A + B \cdot \bar{r}^{0,3} + C / \bar{r}, \quad (1)$$

где A, B, C – константы. После ПО, где начинается полая часть сепарационной камеры, параметр A в распределении (1) равен нулю.

С увеличением относительной длины $\bar{l} = l/D$ сепарационной камеры доля зоны с квазитвёрдым вращением газа уменьшается.

На рис. 2б представлено расположение точек замера в ПЦПО конфигурации К2, на рис. 5 – поле давлений, а на рис. 6 – поле полных скоростей.

Таблица 1 – Аппроксимация полной скорости от безразмерного радиуса r для ПЦПО с К1

Точка замера	Полная скорость, м/с	R^2	DW	σ	Δ
T7	$W = 494,614 - 373,745\bar{r}^{0,3} - 87,143/\bar{r}$	95,75	2,59	1,376	0,798
T8	$W = 225,305 - 154,909\bar{r}^{0,3} - 36,264/\bar{r}$	94,78	1,56	2,150	1,531
T9	$W = 730,246 - 578,338\bar{r}^{0,3} - 123,016/\bar{r}$	97,23	2,77	2,288	1,376
T10	$W = 42,23\bar{r}^{0,3} - 6,739/\bar{r}$	97,28	1,16	2,455	1,853
T11	$W = 39,226\bar{r}^{0,3} - 6,616/\bar{r}$	94,83	1,28	1,690	1,285
T12	$W = 42,620\bar{r}^{0,3} - 9,569/\bar{r}$	95,76	1,43	1,164	0,795
T15	$W = 17,672\bar{r}^{0,3} + 11,163/\bar{r}$	96,42	2,37	0,465	0,283
T16	$W = 5,324\bar{r}^{0,3} + 18,903/\bar{r}$	99,62	2,48	0,472	0,326

Таблица 2 – Аппроксимация статического давления от безразмерного радиуса для ПЦПО с К1

Точка замера	Статическое давление, кПа	R^2	DW	σ	Δ
T7	$P = 95,538 - 6,669\bar{r} + 5,291\bar{r}^2$	99,46	2,63	0,018	0,010
T8	$P = 94,250 - 3,085\bar{r} + 2,847\bar{r}^2$	97,49	3,13	0,028	0,020
T9	$P = 94,520 - 4,025\bar{r} + 3,551\bar{r}^2$	99,09	2,83	0,020	0,012
T10	$P = 93,804 - 1,559\bar{r} + 1,802\bar{r}^2$	99,96	2,96	0,004	0,002
T11	$P = 93,877 - 1,438\bar{r} + 1,547\bar{r}^2$	99,72	3,67	0,008	0,005
T12	$P = 94,524 - 3,101\bar{r} + 2,599\bar{r}^2$	98,64	2,60	0,018	0,009
T15	$P = 91,864 + 3,682\bar{r} - 1,578\bar{r}^2$	99,14	3,19	0,025	0,012
T16	$P = 90,268 + 7,467\bar{r} - 3,783\bar{r}^2$	99,76	2,43	0,023	0,001

Видно, что при профилированном вытеснителе происходят более резкие изменения статического давления при движении вихря от ОНА к выхлопному патрубку, чем в конфигурации К1. Профилированное тело служит вытеснителем квазитвёрдого движения, и, как следствие, наблюдается сохранение компоненты тангенциальной скорости. Конструкция вытеснителя конфигурации К2 предполагает увеличение эффективности сепарации за счет предотвращения уноса уловленных частиц пыли при уменьшении скорости потока в области ПО.

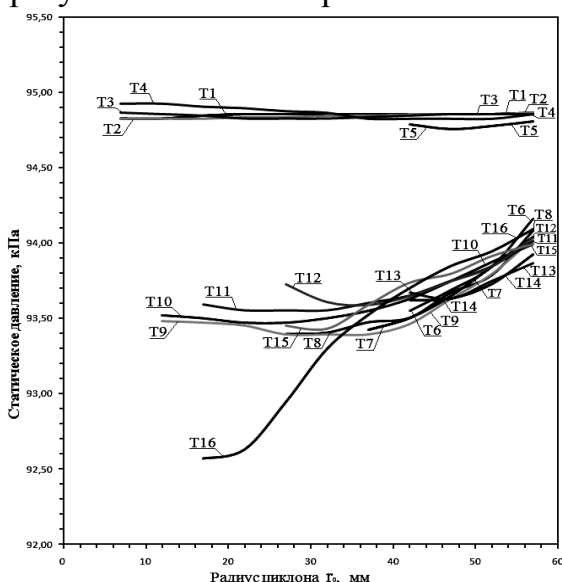


Рис 5. Статическое давление при К2

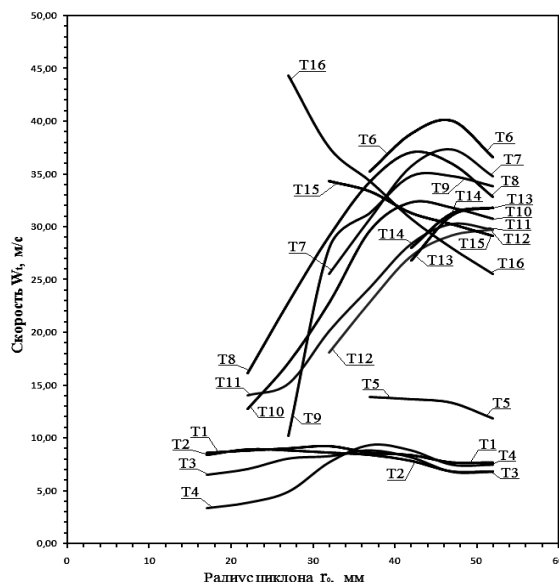


Рис 6. Полные скорости при К2

Профили скоростей, как и при конфигурации К1, тоже имеют экстремум по радиусу. Только если в конфигурации К1 экстремум объясняется возникновением вихря на оси пустотелого циклона, то в конфигурации К2 экстремум, очевидно, следует объяснять трением о поверхности, ограничивающие кольцевой канал – корпус и вытеснитель. В табл. 3 и табл. 4 приведены аппроксимации профилей полной скорости и статического давления для вытеснителя К2. Распределение скорости также описывается зависимостью (1). Таким образом, показатель степени для зависимости скорости от безразмерного радиуса в потенциальном течении равен (0,3), в квазитвердом – (-1) для любой конфигурации вытеснителя. В диффузорно-конфузорной части (Т7-Т16, рис. 6) экстремум скоростей устойчиво располагается вблизи корпуса циклона $r_m = 47-52$ мм. Значение пристенной скорости в зоне ПО пыли (Т10-Т11, рис. 6) снижается примерно на 7 м/с и равно $W = 28,1$ м/с, что подтверждает выполнение аэродинамической задачи по снижению скорости потока в зоне промежуточ-

ного отбора пыли.

Таблица 3 – Аппроксимация полной скорости от безразмерного радиуса для ПЦПО с К2

Точка замера	Полная скорость, м/с	R^2	DW	σ	Δ
T7	$W = 138,857 - 94,039\bar{r}^{0,3} - 11,468/\bar{r}$	89,94	2,593	0,863	0,459
T9	$W = -10,614 + 39,087\bar{r}^{0,3} + 7,207/\bar{r}$	96,42	1,98	0,467	0,291
T10	$W = 140,227 - 107,370\bar{r}^{0,3} - 7,480/\bar{r}$	95,07	1,85	1,205	0,880
T11	$W = 128,172 - 97,219\bar{r}^{0,3} - 6,224/\bar{r}$	91,44	1,26	1,784	1,274
T12	$W = 130,363 - 96,045\bar{r}^{0,3} - 7,443/\bar{r}$	87,21	1,82	2,663	1,786
T13	$W = 139,745 - 107,902\bar{r}^{0,3} - 6,676/\bar{r}$	93,53	1,38	1,690	1,250
T14	$W = 145,656 - 114,683\bar{r}^{0,3} - 6,971/\bar{r}$	93,60	1,41	1,784	1,298
T15	$W = 163,953 - 135,100\bar{r}^{0,3} - 7,897/\bar{r}$	96,64	1,32	1,507	1,042
T16	$W = 170,812 - 139,151\bar{r}^{0,3} - 9,258/\bar{r}$	91,46	2,17	2,598	1,635

Таблица 4 – Аппроксимация статического давления от безразмерного радиуса для ПЦПО с К2

Точка замера	Статическое давление, кПа	R^2	DW	σ	Δ
T7	$P = 92,105 + 2,141\bar{r}$	95,08	2,16	0,078	0,052
T8	$P = 92,131 + 2,085\bar{r}$	94,17	2,27	0,100	0,076
T9	$P = 91,550 + 5,306\bar{r} - 2,344\bar{r}^2$	99,77	1,86	0,031	0,021
T10	$P = 90,233 + 8,677\bar{r} - 4,460\bar{r}^2$	99,67	1,30	0,060	0,043
T11	$P = 90,821 + 6,932\bar{r} - 3,175\bar{r}^2$	98,39	1,56	0,143	0,093
T12	$P = 89,869 + 6,561\bar{r} - 2,791\bar{r}^2$	97,51	1,29	0,179	0,122
T13	$P = 90,052 + 5,716\bar{r} - 1,910\bar{r}^2$	97,32	1,28	0,188	0,134
T14	$P = 91,932 + 6,530\bar{r} - 2,752\bar{r}^2$	97,06	1,58	0,196	0,134
T15	$P = 91,984 + 6,817\bar{r} - 2,993\bar{r}^2$	96,58	1,63	0,214	0,136
T16	$P = 92,146 + 5,468\bar{r} - 1,674\bar{r}^2$	96,69	1,17	0,210	0,154

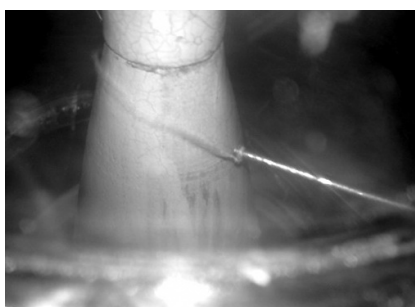


Рис. 7. Обратное течение при переходе диффузора в конфузор

В области сужения диффузора вытеснителя в районе ПО визуально с помощью шелковой нити, закреплённой на конце спицы, наблюдается встречное течение, перекрёстное движению потока. Нить устойчиво поднималась по

спирали вверх навстречу основному потоку (рис. 7). Данное явление объясняется частичным отрывом высокоскоростного потока воздуха с поверхности диффузора, что сопровождается понижением давления на поверхности диффузора (Т9 – Т11, рис. 5) и падением скорости вблизи поверхности вытеснителя (Т9-Т10, рис. 6). Это разрежение обеспечивает подсос части потока со стороны конфузора. С другой стороны, при последующем поджатии потока в конфузоре давление вблизи поверхности вытеснителя повышается (Т14 - Т15, рис. 5), что приводит к раздвоению потока. Основная часть устремляется далее к выходному патрубку, а часть в виде пристенного течения по поверхности вытеснителя проникает в область пониженного давле-

ния на поверхности диффузора, смешиваясь затем с набегающим потоком. Движущая сила, обуславливающая это пристенное течение – разность давлений на поверхностях конфузора и диффузора, очевидно, тем больше, чем выше скорость потока.

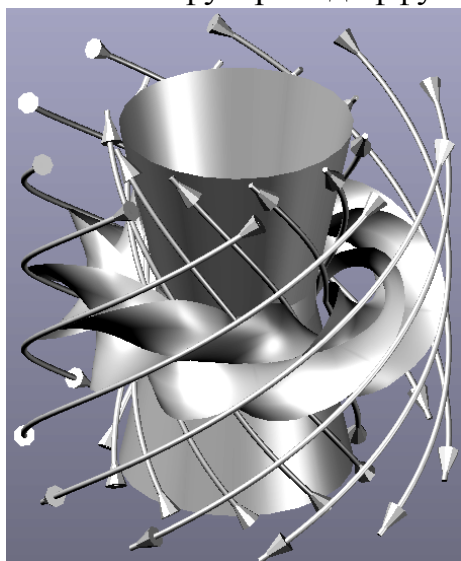


Рис. 8. Формирование вращающегося кольцевого вихря

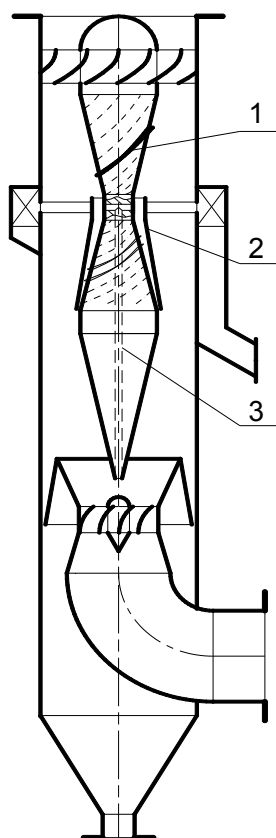


Рис. 9. Конструктивные мероприятия по устранению циркуляционного течения: 1 – низкопрофильное оребрение; 2 – цилиндрико-конический рассекаль; 3 – перепускной канал.

Перекры́стное вращение основного потока почти цилиндрической формы и пристенного течения с биконическими линиями тока при их закольцованном перетекании друг в друга формирует в самом узком месте вращающийся кольцевой вихрь (рис. 8). В имеющихся описаниях вихрей в литературе такая структура течения не идентифицирована и поэтому названа нами вращающимся кольцевым вихрем. В отличие от кольцевого вихря, у которого линии тока concentрично замыкаются в меридиональной плоскости, линии тока во вращающемся кольцевом вихре направлены по винтовой линии на поверхности тора. На рис. 8 сечение вращающегося кольцевого вихря изображено круглым, хотя, очевидно, его форма определяется формирующими течениями и должна тя-

готеть в меридиональном сечении к треугольной форме. Экспериментальная визуализация вихря требует спецоборудования бесконтактного типа с большой чувствительностью и высокой разрешающей способностью.

Пристенное течение и вращающийся кольцевой вихрь можно предотвратить, профилируя диффузор и конфузор по принципу сопел Лавалья. Но для закрученного потока реализация сопел Лавалья затруднена.

Перекры́стное пристенное течение можно притормозить спиральным оребрением 1 на поверхности вытеснителя, параллельным линиям тока основного потока (рис. 9). Оребрение может быть выполнено в виде роликовой накатки на поверхности вытеснителя или спиральной ленты, приваренной по нормали к поверхности вытеснителя. При перекры́стном движении пристенное течение преодолевает оребрение, на вершинах которого встречается с основным потоком, направляющимся вдоль гребней, и сносится им. Разность давлений, движущая пристенным течением, предлагаемым оребрением не снимается, следовательно, вихревая циркуляция останется, но в существенно более мелком масштабе, определяемом межрёберным расстоянием.

Снять движущую силу пристенного течения можно перепускным каналом 3 (рис. 9), соединяющим переходную зону с выхлопным патрубком. Разрежение в выхлопном патрубке больше, чем в переходной зоне. К тому же скорость течения в выхлопном патрубке существенно выше, так как площадь его сечения меньше. Такой скоростной режим обес-

печивает эжектирование воздуха из перепускного канала. Вследствие этих обстоятельств движение потока в перепускном канале будет направлено в сторону выхлопного патрубка, что эвакуирует пристенное течение через перепускной канал в выхлопной патрубок и разрушит вращающийся кольцевой вихрь. Байпасирование части потока из зоны промежуточного отбора снизит гидравлическую нагрузку на основной поток, обеспечивая снижение турбулентности в зоне основного отбора и снижение скорости на входе в выхлопной патрубок. Байпасируемый из приосевой зоны поток не имеет момента импульса вращения, вследствие чего по закону сохранения импульса у оставшегося потока с уменьшенной массой скорость вращения увеличится. Всё это должно отразиться на повышении эффективности очистки и снижении гидравлического сопротивления циклона в целом.

В дополнение к приёмам ликвидации вихревого циркуляционного течения можно предложить также стабилизационный цилиндро-конический рассекатель 2 (рис. 9) в центральной зоне биконического вытеснителя, назначение которого определяется задачей отделения пристенного течения на поверхности вытеснителя от основного потока, что при соответствующих пропорциях этого рассекателя сведёт вероятность возникновения вращающегося кольцевого вихря к минимуму, и даже к возможности эжектирования основным потоком воздуха из центральной зоны, вытесняющим запылённую часть основного потока в периферийную пристенную зону циклона, поскольку середина потока дозаполняется эжектируемым очищенным воздухом, что приведёт соответственно к повышению эффективности очистки основного отбора и циклона в целом. Этот приём используется в аппаратах со встречными закрученными потоками, только здесь он реализуется без дополнительных потоков, путём рационализации взаимодействия существующих течений.

Значение максимальной скорости $\max W_k$ существенно изменяется по длине l сепарационной камеры циклона (рис. 10). В случае профилированного вытеснителя К2 минимальное значение максимальной скорости наблюдается перед промежуточным отбором на расстоянии $l = 2,30D$ (точки замера Т12), при К1 – на расстоянии $l = 0,85D$ (точки замера Т8, где начинается пустотелая часть сепарационной камеры).

На рис. 11 представлены зависимости относительной радиальной координаты $\bar{r}_m = r_m / R$, соответствующей максимальной скорости закрученного потока в радиальной плоскости, от относительной осевой координаты $\bar{l} = l / D$ сепарационной камеры циклона. Видно, что для ПЦПО конфигурации К1 $\bar{r}_m$ смещен к стенке циклона, для конфигурации К2 – прижат к внутренней поверхности, к вытеснителю. В отличие от данных для противоточного циклона, для ПЦПО $n = 0,3$ при $r_m < r < R$, причем для К1 $0,29R \leq r_m \leq 0,84R$, для К2 $-0,47R \leq r_m \leq 0,92R$. В табл. 5 приведены полученные регрессионные модели и показатели их достоверности.

Таблица 5 – Регрессионные модели и показатели их достоверности

Конфигурация	Вид регрессии	R^2	DW	σ	Δ
К1	$\max W_k = 36,736 + 4,967 \cdot \sqrt{\bar{l} - 0,85}$	95,87	1,02	0,602	0,461
	$\bar{r}_m = 0,285 + 0,079 / \bar{l}$	92,69	1,51	0,044	0,069
К2	$\max W_k = 39,074 - 3,254 \bar{l}^2 + 0,279 \bar{l}^4$	92,60	2,40	1,279	0,776
	$r_m = 0,899 - 0,338 \bar{l} + 0,178 \bar{l}^2 - 0,003 \bar{l}^5$	87,42	2,71	0,061	0,041

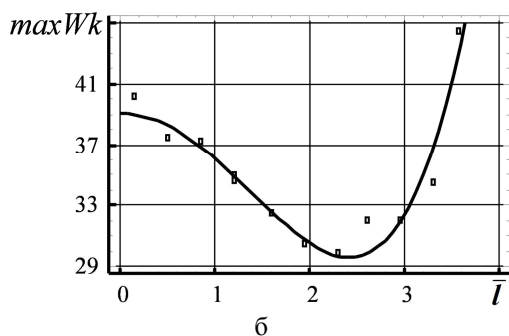
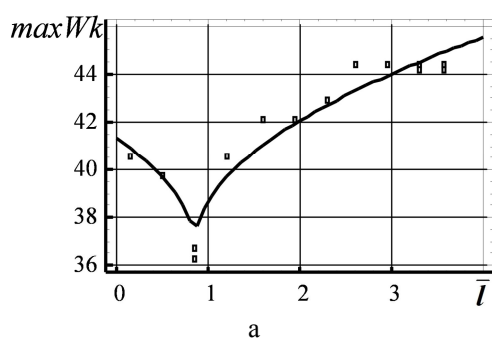


Рис. 10. Зависимость значения максимальной скорости от безразмерной длины сепарационной камеры для конфигурации K1 (а) и K2 (б)

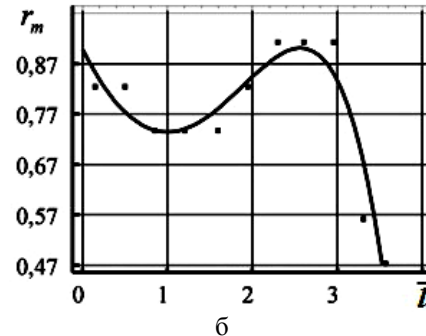
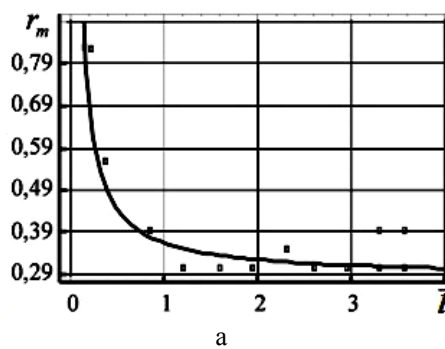


Рис. 11. Зависимость $\bar{r}_m$ от безразмерной длины сепарационной камеры $\bar{l}$ для K1 (а) и K2 (б)

Были измерены углы, при которых динамический напор достигал максимального значения в различных сечениях на разных радиусах (рис. 12). Подтверждено, что в конфигурации K1 в приосевой зоне наблюдался почти стационарный вихрь с практически нулевым значением угла γ . В этой зоне практически отсутствует перенос потока по оси циклона, движение носит характер квазитвёрдого вращения. Продольный перенос

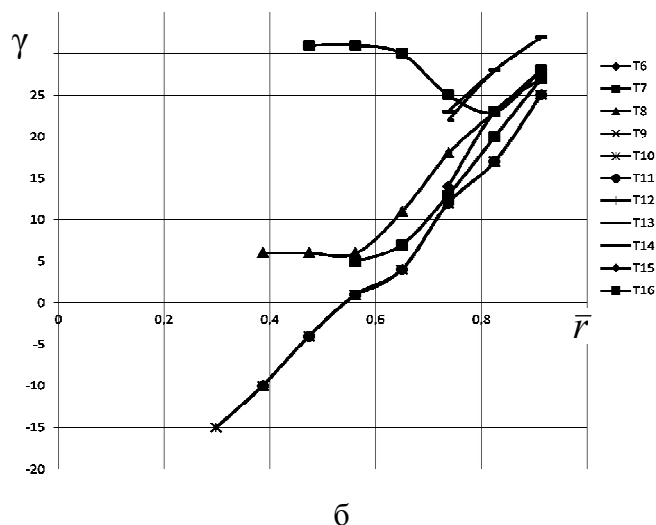
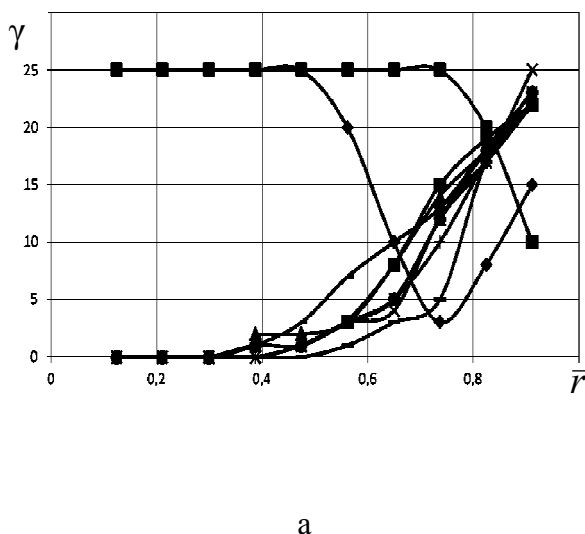


Рис. 12. Зависимость углов γ (градусы) от безразмерного радиуса для K1 (а) и K2(б) осуществляется в периферийной части потока с существенно положительными значениями угла γ . Как и ожидалось, при конфигурации K2 в средней зоне (точки T9, T10, T11) угол γ имеет отрицательное значение.

Рассчитаны и построены профили тангенциальной и осевой компонент скорости закрученного потока. В конфигурации K1 профиль тангенциальных скоростей характерен для классического вихря, описанного многими исследователями. В конфигурации K2 профиль тангенциальной скорости экстремален, асимметричен, центр тяжести этого профиля сдвинут в периферийную зону. Эти особенности формируются под действием центробежных сил, вытесняющих поток из центральной зоны кольцевого пространства и уплотняющих его в периферийной зоне, а также силами трения о стенки, тормозящими поток в пограничных слоях.

Проверена гипотеза о существовании рециркуляционного контура через циклон при объединении промежуточного и основного отборов. Ранее предполагалось, что при объединении бункеров поток, набегая на щель основного отбора, своим скоростным напором создает в этом бункере избыточное давление, подпирающее и иницирующее рециркуляционное течение через оба бункера в сторону щели промежуточного отбора, где происходит его отсос в основной поток. Измерение перепадов давления в бункерах и индикация течения шёлковой нитью показали, что рециркуляция отсутствует, поток, проникая в бункер промежуточного отбора, байпасирует через бункер основного отбора и опять соединяется с основным потоком. Это объясняется большой интенсивностью истечения в выхлопном патрубке. При этом перепад давлений между циклоном и выхлопным патрубком превышает величину скоростного напора на щель основного отбора, что обеспечивает подсос воздуха из основного отбора в выходящий поток. Если обеспечить плавность входа в выхлопной патрубок с сопротивлением меньшим, чем скоростной напор на щель основного отбора, то возникнут условия для инициации упомянутого выше рециркуляционного течения. Равновесие наступает при равенстве с одной стороны выходного сопротивления, и с другой стороны суммы скоростного напора на щель основного отбора и скоростного отсоса в щели промежуточного отбора. В этом случае по пути к выхлопному патрубку поток «не замечает» обводного канала через бункера ни в байпасном, ни в рециркуляционном смыслах.

В главе 3 описаны результаты определения дисперсного состава пыли и фракционной эффективности сепарации ПО, основного отбора (ОО) и циклона в целом. Приведены результаты исследований процесса сепарации в прямоточном циклоне с диаметрами $D = 120$ мм и $D = 114$ мм, выполненные на экспериментальной установке (рис. 1). В качестве дозатора пыли использовалась виброворонка. Для весового контроля уносимой пыли выхлопной патрубок вентилятора оснащался тканевым фильтром. Для запыления потока применяли пыль золы ТЭЦ и цемента марки 32,5Б плотностью 1950 кг/м^3 и 3170 кг/м^3 соответственно. Дисперсный состав цемента определялся методом лазерной дифракции на гранулометре Microtrac S3500: масс-медианный диаметр частиц составили для золы ТЭЦ $\delta_m = 27,27$ мкм, для цемента $\delta_m = 25,29$ мкм, среднее квадратическое отклонение функции распределения частиц по размерам для золы ТЭЦ $\lg \sigma_q = 1,026$ и $\lg \sigma_q = 1,019$ для цемента.

Концентрация пыли z вычислялась по формуле: $z = m_n / (t_n Q)$, где m_n – масса навески пыли, г; t_n – время истечения пыли из дозатора, с; Q – объёмный расход воздуха, $\text{м}^3/\text{с}$. Критерий Рейнольдса рассчитывался по формуле: $Re = \rho w_{cp} D / \mu$, где ρ – плотность воздуха, кг/м^3 ; μ – динамическая вязкость воздуха, $\text{Па} \cdot \text{с}$; w_{cp} – среднерасходная скорость в плане циклона, м/с , вычисляемая по формуле: $w_{cp} = 4Q / (\pi D^2)$. Гидравлическое сопротивление пылеуловителя ΔP определялось по перепаду полных давлений на входе в циклон и на выходе из него. Коэффициент гидравлического сопротивления: $\zeta = 2\Delta P / (\rho w_{cp}^2)$. Средняя эффективность пылеулавливания $\eta = (\eta_{min} + \eta_{max}) / 2$, где η_{min} – минимальное значение эффективности сепарации, вычисляемое по поданной и улавливаемой отборами циклона пыли, η_{max} – максимальное значение эффективности сепарации, вычисляемое по поданной и выносимой из циклона пыли. Среднее расхождение между η_{min} и η_{max} не превышало 6 %, что соот-

ветствует требованиям нормативных документов, по которым ошибка измерения эффективности очистки не должна превышать 10 %. В табл. 6 приведены полученные экспериментально технические характеристики циклона ПЦПО.

Таблица 6 – Технические характеристики ПЦПО

№	D , мм	Концентрация пыли z , г/м ³	w_{cp} , м/с	γ , °	ΔP , Па	η , %	Re	ζ	δ_m , мкм
1	120	22,60	5,23	18	517,99	76,71	24207,7	32,89	14
2		25,63	6,03		671,30	72,27	27948,5	31,96	
3		33,16	4,24		364,82	77,90	19884,4	34,74	
4	114	33,01	7,25	20	897,92	79,19	59271,5	26,59	28
5		15,84	7,11		858,88	78,65	58097,7	26,47	
6		26,43	7,01		849,12	78,69	57361,0	26,88	
7		12,58	6,91		829,60	78,86	56513,0	27,06	
8		32,59	7,17	30	878,44	82,76	58767,9	26,53	
9		14,91	7,03		849,12	80,74	57580,6	26,72	
10		19,07	6,87		819,84	81,62	56295,6	26,92	
11		28,65	7,29	35	917,44	79,67	59659,9	26,85	
12		13,65	7,14		878,40	80,45	58532,4	26,75	
13		18,21	6,94		858,88	78,85	56995,2	27,66	

Получены регрессионные зависимости эффективности очистки от угла установки лопаток ОНА, коэффициента гидравлического сопротивления от критерия Re и потерь давления от квадрата среднерасходной скорости. Зависимость эффективности очистки от угла установки лопаток ОНА (рис. 13):

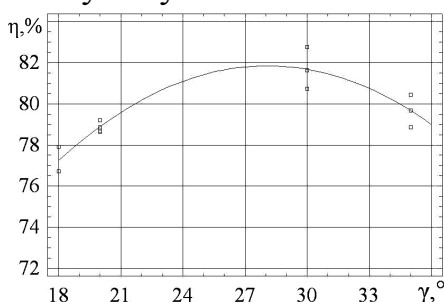


Рис. 13. Влияние угла установки лопаток γ на эффективность сепарации ПЦПО

$$\eta = 46,088 + 2,548\gamma - 0,045\gamma^2 \rightarrow \max,$$

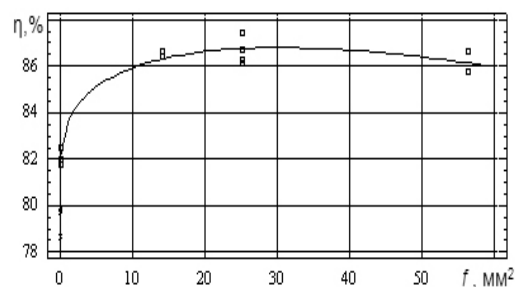


Рис. 14. Зависимость эффективности очистки от площади эжектирующих отверстий

$$(2)$$

где угол γ задан в градусах. Критерии достоверности регрессии (2) приведены в табл. 7 (n_b – объем выборки). Оптимальное значение угла γ находим из необходимого условия экстремума функций: $\frac{d\eta}{d\gamma} = 2,548 - 0,09\gamma = 0 \Rightarrow \gamma = 28,3^\circ$.

Таблица 7 – Показатели статистической достоверности уравнений регрессий

Номер формулы	R^2 , %	DW	σ	Δ	n_b
(2)	85,98	2,11	0,686	0,816	11
(4)	95,72	1,36	0,490	0,861	10
(5)	91,12	1,20	0,905	0,970	11
(6)	97,04	1,29	0,408	0,824	11
(7)	95,31	1,96	0,599	0,537	11
(8)	92,25	2,05	0,0830	0,233	10
(13)	99,90	1,34	0,0218	0,0004	35
(14)	61,54	1,58	0,0975	0,0268	19

В табл. 8 и на рис. 14 представлены экспериментальные данные на ПЦПО диаметром 114 мм по влиянию площади отверстий f , через которых эжектируется воздух из основного бункера в поток очищенного газа. Использование 0,7 %-е эжекционного перфорирования оголовка выхлопного патрубка способствовало увеличению

эффективности на 5-8 %, что объясняется выравниванием профиля скоростей при входе очищенного газа в выхлопной патрубок и вследствие этого уменьшением возмущения пристенного пылевого слоя при входе в бункер. При объединении бункеров самоотсос ликвидирует байпасный поток из бункера в выхлопной патрубок, который выполняет роль вторичного запылителя выходного потока.

Таблица 8 – Влияние площади эжектирующих отверстий на технические характеристики ПЦПО

$D_{\text{отв, мм}}$	$f, \text{мм}^2$	$\Delta P, \text{Па}$	$w_{cp}, \text{м/с}$	$Q, \text{м}^3/\text{ч}$	$z, \text{г/м}^3$	$\eta_{\text{по}}, \%$	$\eta_{\text{оо}}, \%$	$\eta, \%$
0	0	2540	7,12	261,808	33,605	61,54	20,97	82,51
0	0	2540	7,12	261,808	25,998	61,00	20,95	81,95
0	0	2540	7,12	261,808	12,193	60,07	19,79	79,86
0	0	2770	8,34	306,390	28,026	58,93	22,83	81,76
0	0	1820	7,28	267,439	14,397	57,16	22,58	79,74
0	0	1620	7,28	267,439	17,999	57,45	21,17	78,62
1,5	14,13	2200	7,50	212,119	9,364	59,96	27,46	86,43
1,5	14,13	2100	7,43	210,029	6,094	59,59	28,03	86,61
2	25,12	2070	7,12	201,453	3,673	59,84	27,65	87,49
2	25,12	2070	6,89	194,773	15,576	60,19	25,94	86,14
2	25,12	1770	6,73	190,189	25,172	60,78	25,48	86,26
2	25,12	2340	7,61	215,216	14,026	61,46	25,26	86,72
3	56,52	2210	7,43	210,029	6,465	60,94	25,68	86,62
3	56,52	2210	7,43	210,029	7,938	60,51	25,27	85,78

При статистической обработке данных табл. 8 получены следующие уравнения регрессии: для эффективности сепарации ПЦПО

$$\eta = 82,089 + 1,715\sqrt{f} - 0,156f; \quad (4)$$

для эффективности основного отбора: $\eta_{\text{оо}} = 21,920 + 2,363\sqrt{f} - 0,254f$. (5)

Многопараметрические уравнения регрессии, описывающие зависимости эффективности пылеулавливания ПЦПО и основного отбора $\eta_{\text{оо}}$ от расхода воздуха, запыленности потока и площади эжектирующих отверстий, имеют вид:

$$\eta = 82,073 + 12,413(zfQ)^{-0,095}. \quad (6)$$

$$\eta_{\text{оо}} = 21,920 + 120,656(zfQ)^{-0,3}. \quad (7)$$

Критерии достоверности регрессионных зависимостей приведены в табл. 7.

В главе 4 усовершенствован эмпирический метод расчета эффективности очистки проточных циклонов, разработанный А.Н. Шерстюком и В.С. Асламовой и основанный на независимом влиянии параметров сепарации на коэффициенты уноса пыли. Метод учитывал влияние среднерасходной скорости запыленного потока, концентрации пыли, диаметра циклона и масс-медианного диаметра частиц пыли. Однако известно, что на эффективность сепарации существенное влияние оказывает и плотность пыли. Поэтому вместо коэффициента уноса K_{δ} , учитывающего влияние на пропуск пыли масс-медианного диаметра частиц, предложено ввести коэффициент $K_{\delta\rho}$, который учитывает совместное влияние масс-медианного диаметра частиц δ_m и плотности пыли, и получен обработкой экспериментальных данных различных исследователей (табл. 9):

$$K_{\delta\rho} = \frac{1 - \eta_{\delta}}{1 - \eta_{\delta 0}} = 0,0136 \cdot \left(\frac{\delta_m}{\rho_{\delta}} \right)^{-0,7522} \cdot \rho_{\delta}^{0,0093}, \quad \delta_m = 11 \dots 80 \text{ мкм}; \quad \rho_{\delta} = 405 \dots 3200 \text{ кг/м}^3, \quad (8)$$

где $\eta_{\delta 0}$ – эффективность сепарации, характерная для данного циклона при параметрах $D_0, \delta_{m0}, \rho_{\delta 0}, z_0, w_{cp0}$; η_{δ} – эффективность сепарации геометрически подобного циклона при параметрах $D_0, \delta_m, \rho_{\delta}, z_0, w_{cp0}$. Статистические показатели достоверности

(8) приведены в табл.7. Формула (8) справедлива и для $\delta_m = 132$ мкм.

Таблица 9 – Источники экспериментальных данных к рис. 15 и 16

Обознач.	Название циклона	Исследователи
◆	ЦКТИ	Баряхтенко Г.М., Идельчик И.Е., Кирпичев Е.Ф.
⊠	ЦКТИ	Мацнев В.В.
●	ВПЦ, групповой ВПЦ	Смирнов М.Е., Сугак А.В., Гончаров Г.М.
✕	ПЦ	Шиляев М.И., Шиляев А.М.
□	ВПП	Могилевский В.В.
○	ВПП	Платов В.Д., Ткачук Л.Я.
+	ПЦР	Коган Э.И., Гинзбург Я.Л.
△	ИГИ	Калмыков А.В., Игнатъев В.И., Тюканов В.Н.
■	НВГК	(D = 0,12 м) Асламова В.С., Шерстюк А.Н..
▣	ПЦ с эжектируемым газом	
▲	ПЦПО (d ₂ =0.68D)	
×	ПЦПО (d ₂ =0.58D)	
◇	ПЦПО (d ₂ =0.48D)	
⊠	ПЦПО (d ₂ =0.68D)	Асламова В.С., Асламов А.А., Ляпустин П.К. (D = 0,258 м)

Коэффициент K_D учитывает влияние диаметра аппарата на относительный унос пыли:

$$K_D = \frac{1 - \eta_D}{1 - \eta_{D0}} = 0,6726 + 2,758 \cdot D, \quad D = 0,046 \dots 0,6 \text{ м}, \quad (9)$$

где η_{D0} – эффективность сепарации, характерная для исходного циклона при параметрах $D_0, \delta_0, \rho_0, z_0, w_{cp0}$; η_D – эффективность сепарации циклона, геометрически подобного исследованному, при параметрах $D, \delta_0, \rho_0, z_0, w_{cp0}$. Формула (9) дает верный результат и для $D = 2,6$ м.

Коэффициент K_z учитывает влияние запыленности входного потока:

$$K_z = \frac{1 - \eta_z}{1 - \eta_{z0}} = 0,202 + 0,1933 \cdot z^{-0,566}, \quad z = 0,005 \dots 0,300 \text{ кг/м}^3, \quad (10)$$

где η_{z0} – эффективность сепарации, характерная для данного циклона при параметрах $D_0, \delta_{m0}, \rho_0, z_0, w_{cp0}$; η_z – эффективность сепарации геометрически подобного циклона при параметрах $D_0, \delta_{m0}, \rho_0, z, w_{cp0}$.

Коэффициент K_W учитывает влияние среднерасходной скорости потока в плане циклона w_{cp} на относительный унос пыли:

$$K_W = \frac{1 - \eta_W}{1 - \eta_{W0}} = 1,7432 - 0,1071 \cdot w_{cp}, \quad w_{cp} = 3 \dots 17 \text{ м/с}, \quad (11)$$

где η_{W0} – эффективность сепарации, характерная для данного циклона при параметрах $D_0, \delta_{m0}, \rho_0, z_0, w_{cp0}$; η_W – эффективность сепарации геометрически подобного циклона при параметрах $D_0, \delta_{m0}, \rho_0, z_0, w_{cp}$.

Приведенные зависимости (8)...(11) позволяют найти эффективность проектируемого циклона η_p для заданных условий работы, характеризующихся величинами $D, \delta_m, \rho, z, w_{cp}$, по известной эффективности пылеулавливания η_a геометрически подобного циклона при параметрах $D_a, \delta_{ma}, \rho_a, z_a, w_{cpa}$ по зависимости:

$$\eta_p = 1 - \frac{K_D K_{\delta p} K_z K_W}{K_{Da} K_{\delta pa} K_{za} K_{Wa}} (1 - \eta_a), \quad (12)$$

где коэффициенты уноса $K_D, K_{Da}, K_{\delta p}, K_{\delta pa}, K_z, K_{za}, K_W, K_{Wa}$ рассчитываются по

(8)...(11).

Из (12) следует, что погрешности определения коэффициентов уноса на точность расчета эффективности сепарации влияют незначительно, так как эти коэффициенты являются функциями уноса $(1 - \eta_a)$ – малой величины по отношению к эффективности сепарации η_a . Это подтверждается статистическим анализом сопоставления опытных и расчетных значений эффективностей сепарации. Формула (12) позволяет рассчитывать эффективность сепарации и при изменении лишь одного параметра, например w_{cp} . В этом случае оставшиеся коэффициенты принимаются попарно равными: $K_D = K_{Da}$, $K_{\delta p} = K_{\delta pa}$, $K_z = K_{za}$.

По предлагаемому методу была рассчитана эффективность сепарации η_p для 35 прямоточных циклонов различных видов. Ее сопоставление с экспериментальными значениями η_a представлено на рис. 15. Источники данных приведены в таблице 9. В табл. 7 приведена статистическая достоверность гипотезы: $\eta_a = \eta_p$. (13)

На рис. 16 приведено сопоставление η_a с расчетной эффективностью очистки η_{pH} , полученной по методике НИИОГАЗ для 19 прямоточных циклонов. В табл. 7 приведена статистическая достоверность гипотезы: $\eta_a = \eta_{pH}$. (14)

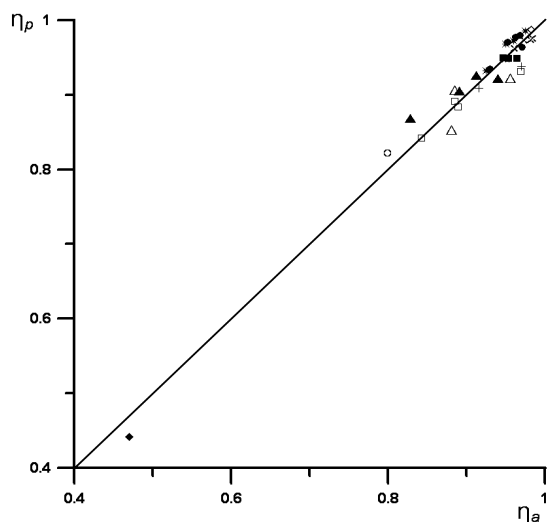


Рис. 15. Корреляция эффективности η_p , рассчитанной по предлагаемому методу, и экспериментальной η_a

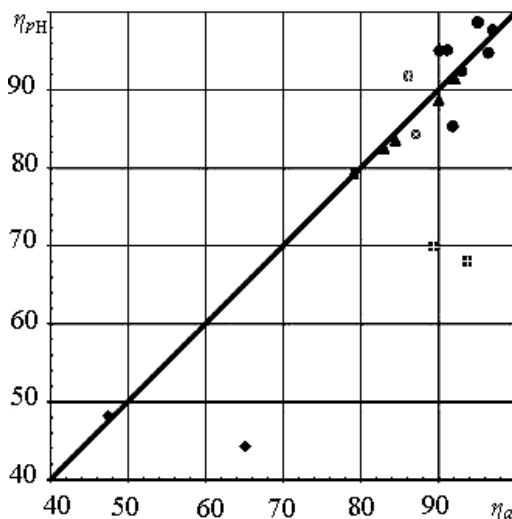


Рис. 16. Корреляция эффективности η_{pH} , рассчитанной по методике НИИОГАЗ, и экспериментальной η_a

Сравнительный анализ рис. 15 и 16 показывает, что расчет по предлагаемому методу в указанных пределах применимости является более точным по сравнению с методикой НИИОГАЗ. Погрешности гипотез (13) и (14) определялись величиной средней относительной ошибки $\varepsilon_{омп} = \left(\sum_{i=1}^n |\eta_{ai} - \eta_{pi}| / \eta_{ai} \cdot 100 \right) / n_e$, %, которая составила 1,88 % и 6,54 % соответственно. Достоинства предлагаемого усовершенствованного метода: простота расчетов, учет влияния диаметра циклона, концентрации пыли, ее плотности и масс-медианного диаметра частиц, среднерасходной скорости потока, возможность расчета эффективности пылеулавливания проектируемого циклона при отсутствии сведений о его фракционной эффективности и о характере распределения тангенциальной скорости воздуха, хорошая точность прогнозного значения.

В цементном производстве ОАО «Ангарскцемент» используется сухая зола. Выявлено, что существующая технологическая схема разгрузки из полувагонов зо-

лы с золоотвала ТЭЦ-1 ОАО «Иркутскэнерго» не удовлетворяет нормам ПДВ. При работе аспирационной системы происходит частое забивание газоходного тракта и самого циклона, вследствие чего увеличивается нагрузка на ткань рукавного фильтра и быстрый её износ. Инструментальными замерами санпромлабораторией выявлено, что эффективность циклона СЦН-40 в аспирационной системе снижается до 53 %, рукавного фильтра МФУ-72 на 8 %, нагрузка на ткань увеличивается с 0,09 до 0,8 м³/м² · мин, а количество пыли на выходе возрастает с 0,2 до 8,5 кг/ч.

Для повышения эффективности аспирационной установки по обеспыливанию воздуха от золы предложены следующие мероприятия:

- модернизировать аспирационный трубопровод из бункера приёма золы путём установки жалюзийных воздухозаборников и кольцевого трубопровода, установить новые аспирационные зонды в области люков приемного бункера;

- заменить низкоэффективный циклон СЦН-40 $D = 1200$ мм на скоростной высокоэффективный групповой циклон из 3-х высокопроизводительных скоростных элементов типа ПЦПО диаметром 175 мм с углом установки лопаток ОНА 28,3° и с эжекционными отверстиями воздуха из бункера уловленной золы с суммарной площадью 0,4 – 1,1 % от проходного сечения выхлопного патрубка.

На рис. 17 представлена разработанная технологическая схема разгрузки золы с групповым циклоном ПЦПО. На основе экспериментальных данных (табл. 10) по предлагаемому методу эффективность очистки групповым циклоном составила 91,8 %. Повышение эффективности очистки по сравнению с табл. 10 объясняется более скоростным режимом эксплуатации и большей запылённостью входного потока.

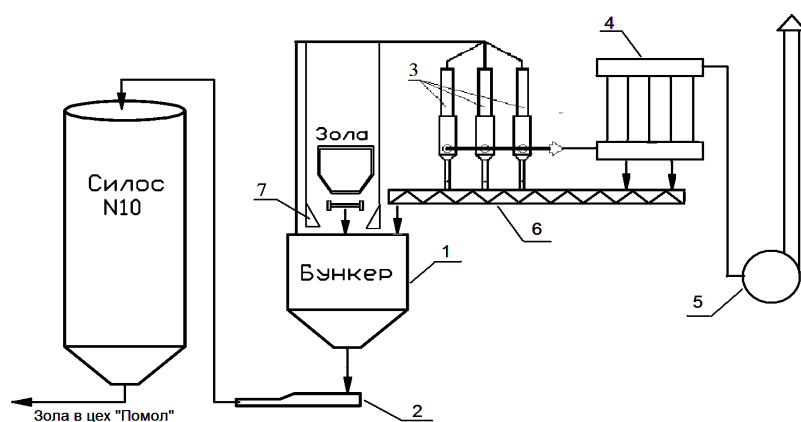


Рис. 17. Схема узла разгрузки золы уноса: 1– бункер приёма золы; 2– насос; 3 – групповой циклон ПЦПО, 4 – рукавный фильтр, 5 – вентилятор, 6 – шнек; 7 – аспирационные зонды.

Таблица 10 – Результаты эксперимента исследованию процесса сепарации золы

t °C	ΔP, Па	w _{ср} , м/с	Q, м ³ /ч	z, г/м ³	η _{по} , %	η _{оо} , %	η, %	Кэф. гидравл. сопр., ξ
19	2500	7,99	293,713	21,1	0,4806	0,3158	79,64	65
17	1750	5,93	217,823	41,3	0,4119	0,3700	78,19	83

Выполнен эколого-экономический расчет предлагаемой системы газоочистки. За счет ее внедрения сократятся выбросы золы и плата за нормативные выбросы на 83 %. При выборе для конкретного производства из двух систем газоочистки, отличающихся эффективностью сепарации, относительная экологическая эффективность системы оценивается технологическим параметром θ , служащим критерием относительной экологической эффективности и предложенным Л.А. Тарасовой, С.А. Канерной, О.А. Трошкиным: $\theta = \frac{\eta_1(100 - \eta_0)}{\eta_0(100 - \eta_1)}$, где η_0, η_1 – эффективность сепарации пер-

вой и второй системы газоочистки. Чем критерий относительной экологической эффективности θ больше единицы, тем совершеннее и экологически предпочтительней система газоочистки.

Для циклона СЦН-40 $\eta_0 = 53 \%$, а для группового циклона ПЦПО $\eta_1 = 91,8 \%$.

Тогда $\theta = \frac{91,8(100 - 53)}{53(100 - 91,8)} = 9,93$. Так как значение критерия θ существенно больше единицы,

то замена циклона СЦН-40 на групповой циклон ПЦПО целесообразна. Разработанные рекомендации, чертежи группового циклона переданы на предприятие ОАО «Ангарскцемент». Данное техническое предложение рассматривается руководством предприятия в качестве базового для внедрения в производство.

В **заключении** подведены основные итоги выполненных исследований и обобщены теоретические следствия.

Выводы

1. Управление структурой течений в сепарационной камере переменного сечения прямоточного циклона ПЦПО с помощью конструктивных изменений с целью оптимизации процесса сепарации пыли позволяет повысить степень очистки и снизить гидравлическое сопротивление аппарата.

2. Наличие максимума у полей вектора полной скорости свидетельствует, что и при коническом, и при профилированном вытеснителях имеется квазитвёрдое течение в центральной части сепарационной камеры, переходящее в потенциальное на периферии. При коническом вытеснителе квазитвёрдое течение обусловлено вихреобразованием в центральной части потока, при профилированном вытеснителе – круговым поверхностным трением о вытеснитель. Аппроксимация вектора полной скорости в зависимости от относительного радиуса включает гиперболический член и степенной с показателем 0,3. Радиус максимального значения полной скорости r_m при коническом вытеснителе смещен к границе вихря ($r_m / R \rightarrow 0,29$), а при профилированном вытеснителе – к стенке сепарационной камеры циклона ($r_m / R \rightarrow 0,87$). Величина максимальной скорости существенно изменяется по длине сепарационной камеры, и достигает максимума на входе в выхлопной патрубок.

3. Перепад давлений на поверхностях конфузорной и диффузорной части вытеснителя вызывает соответствующее пристенное противоточное течение. Перекрёстное вращение основного потока и пристенного течения при их закольцованном перетекании друг в друга формирует в самом узком месте вращающийся кольцевой вихрь. Оребрение конфузорной части вытеснителя, параллельное углу крутки потока; цилиндрико-конический рассекающий вдоль той же поверхности и перепускной канал от зоны промежуточного отбора до выхлопного патрубка нейтрализуют этот эффект, снижают гидравлическое сопротивление циклона и увеличат степени очистки за счёт рационального взаимодействия существующих течений.

4. Для достижения максимальной эффективности сепарации циклона следует устанавливать выходные кромки лопаток осевого направляющего аппарата под углом $28,3^\circ$ к радиальной плоскости, и выполнить эжектирующую перфорацию оголовка в объёме $0,4 - 1,1 \%$ от площади выхлопного патрубка.

5. Полученные многопараметрические регрессионные зависимости позволяют прогнозировать показатели работы ПЦПО при изменении условий его эксплуата-

ции.

6. Использование коэффициента уноса, описывающего совместное влияние на относительный унос пыли масс-медианного диаметра ее частиц и ее плотности, позволяет усовершенствовать эмпирический метод расчета эффективности очистки прамоточных циклонов.

7. Технологическая схема процесса пылеулавливания в системе аспирации воздуха на узле разгрузки золы ТЭЦ на ОАО «Ангарскцемент» совместно с заменой аспирационных воздухозаборников позволит исключить нештатные ситуации, сократить выбросы золы и на 83 % плату за нормативные выбросы.

Список публикаций по диссертационной работе

1. **Аршинский, М.И.** Эмпирический метод расчета эффективности очистки прамоточных циклонов при масштабном переходе / Асламова В.С., Асламов А. А., Жабей А.А., Аршинский М.И.// Известия высших учебных заведений. Серия «Химия и химическая технология». – 2008. – Т. 51. – № 12. – С. 80-83.

2. **Аршинский, М.И.** Исследование прамоточного циклона с промежуточным отбором пыли / В.С. Асламова, М.И. Аршинский, Н.А. Брагин, А.А. Жабей // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2009. – № 6. –С. 37-38.

3. Кулаков, А.Ю. Автоматизация расчета и проектирования деталей прамоточного циклона / А.Ю. Кулаков, А.А. Асламов, И.М. Кулакова, **М.И. Аршинский**, В.С. Асламова // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2011. – № 2 (30). – С. 105-112.

4. Кулакова, И.М. Влияние угла закрутки потока и эжекции части воздуха на эффективность сепарации прамоточного циклона / Кулакова И.М., **Аршинский М.И.**, Асламова В.С. // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2012. – № 4 (36). – С. 129-133.

5. **Аршинский, М.И.** Исследование полей скоростей и давлений закрученного потока в кольцевом канале переменного сечения / Кулакова И.М., Асламов А.А., Аршинский М.И., Асламова В.С.// Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2012. – № 4(36). – С. 75-78.

6. Асламов, А.А. Аппроксимация полей скоростей и давлений в прамоточном циклоне с сепарационной камерой переменного сечения / Асламов А.А., **Аршинский М.И.**, Кулакова И.М., Асламова В.С.// Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2013. – № 2 (38). – С. 163-168.

7. Асламова, В.С. Эмпирический метод расчета эффективности очистки в прамоточных циклонах при масштабном переходе / В.С. Асламова, А.А. Жабей, А.А. Асламов, **М.И. Аршинский** // Материалы научно-практической конф. «Безопасность регионов – основа устойчивого развития». – Иркутск: Изд-во ИрГУПС.– 2007.–Т.3.– С.100-105.

8. Асламова, В.С. Аппроксимация результатов исследования прамоточного циклона с промежуточным отбором пыли / В.С. Асламова, Н.А. Брагин, **М.И. Аршинский**, А.А. Жабей.// Сб. Тр. 21-й Международной конференции «Математические методы в технике и технологиях». – Т. 3. – Саратов : Изд-во СГТУ, 2008. – С. 256-258.

9. Жабей, А.А. Оптимальное проектирование прамоточного циклона с промежуточным отбором пыли / А.А. Жабей, И.М. Кулакова, **М.И. Аршинский**, В.С. Асламова // Международная научно-техническая конференция «Информационные и управляющие системы в пищевой и химической промышленности». – Воронеж: ВГТУ, 2009. – С. 4-6.

10. Брагин Н.А. Экспериментальное исследование прамоточного циклона с промежуточным отбором пыли / Н.А.Брагин, А.А. Жабей, **М.И. Аршинский**, В.С. Асламова // Вестник Ангарской государственной академии, 2009. – Т. 3. – № 1.– С. 8-11.

11. **Аршинский, М.И.** Разработка прамоточного циклона для визуального наблюдения / М.И. Аршинский, А.Ю. Кулаков, В.С. Асламова // Сб. трудов молодых ученых и студентов. – Ангарск: АГТА, 2010.– С. 68-70.

12. Асламов, А.А. Геометрическая модель лопастного бицилиндрического закручивателя / А.А. Асламов, **М.И. Аршинский**, А.Ю. Кулаков, В.С. Асламова // Сб. трудов молодых ученых и

студентов.– Ангарск : АГТА, 2010. – С. 65-67.

13. Кулакова, И.М. Экспериментальное и визуальное исследование сепарации в прозрачной модели прямоточного циклона с промежуточным отбором пыли / И.М. Кулакова, **М.И. Аршинский**, А.Ю. Кулаков, В.С. Асламова // Сб. науч. тр. Техническая кибернетика. Химия и химические технологии. Строительство. Общественные науки. Спортивная медицина. – Ангарск: АГТА. – 2012. – С. 77-86.

14. Кулакова, И.М. Поля скоростей и давлений закрученного потока в кольцевом канале / И.М. Кулакова, А.А. Асламов, **М.И. Аршинский**, О.Н. Карпачева, В.С. Асламова // Безопасность регионов – основа устойчивого развития: Материалы 3-й Международной научно-практической конф., Иркутск, 12-15 сентября 2012. – Иркутск : ИрГУПС, 2012.– С. 139-144.

15. Кулакова И.М. Регрессионная модель эффективности пылеулавливания прямоточного циклона с промежуточным отбором / И.М. Кулакова, **М.И. Аршинский**, А.Ю. Кулаков, В.С. Асламова // Математические методы в технике и технологиях: сб. трудов XXV Междунар. науч. конф.: в 10 т. Т 2./ Под общ. ред. А.А. Большакова. – Волгоград: Волгогр. гос. техн. ун-т; Харьков: Национ. тех. ун-т «ХПИ», 2012. – С. 147-149.

16. **Аршинский, М.И.** Экспериментальное определение полей скоростей и давлений закрученного потока в кольцевом канале прямоточного циклона / М.И. Аршинский // Сб. трудов молодых ученых и студентов.– Ангарск : АГТА, 2012. – С . 6-13.

17. Асламов, А.А. Регрессионные модели полной скорости и статического давления в прямоточном циклоне переменного сечения / А.А. Асламов, **М.И. Аршинский**, В.С. Асламова, И.М. Кулакова // Математические методы в технике и технологиях: сб. трудов XXVI Междунар. науч. конф.: в 10 т. Т 2./ Под общ. ред. А.А. Большакова. – Нижний Новгород : Нижегород. гос. техн. ун-т, 2013. – С. 147-149.

18. **Аршинский, М.И.** Аэродинамика в прямоточном циклоне с сепарационной камерой переменного сечения / М.И. Аршинский, А.А. Асламов, И.М. Кулакова, В.С. Асламова // Современные технологии и научно-технический прогресс: тез. Докл. межвуз. науч. техн. конф. – Ангарск : АГТА, 2013. – С. 18.

19. **Аршинский, М.И.** Технологическая схема разгрузки золы уноса ТЭЦ / М.И. Аршинский, А.А. Асламов, В.С. Асламова // Современные технологии и научно-технический прогресс: тез. докл. межвуз. науч. техн. конф. – Ангарск : АГТА, 2013. – С. 17.

20. **Аршинский, М.И.** Анализ процесса сепарации на ОАО «АНГАРСКЦЕМЕНТ» / М.И. Аршинский, А.А. Асламов, В.С. Асламова // Сб. науч. тр. Ангарской технической академии – Ангарск: АГТА. – 2013. – С. 92-96.

21. **Аршинский, М.И.** Прогноз эффективности очистки группового циклона ПЦПО по усовершенствованному методу/ М.И.Аршинский, А.А. Асламов, В.С. Асламова //4-я Всероссийская научно-практ. конф. Транспортная инфраструктура сибирского региона Иркутск, 13-17 мая 2013. – Иркутск : ИрГУПС, 2013.– С. 130-134.

22. **Аршинский, М.И.** Поля осевых и тангенциальных скоростей закрученного потока в кольцевом канале переменного сечения / М.И.Аршинский, А.А. Асламов, Т.А. Комлева, В.С. Асламова //4-я Всероссийская научно-практ. конф. Транспортная инфраструктура Сибирского региона Иркутск, 13-17 мая 2013. – Иркутск : ИрГУПС, 2013.– С. 140-144.

Подписано в печать 07.07.13. Формат 60х90 1/8. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1,3. Уч. печ. л. 1,3. План 2013.Тираж 100 экз. Заказ 2055.

Ангарская государственная техническая академия, 665835, Ангарск, ул. Чайковского, 60