МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

Замалиева Альбина Таврисовна

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ГАЗООЧИСТНЫХ ЦИКЛОННО-ФИЛЬТРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ГОРОДСКИХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Специальность 05.14.01 – Энергетические системы и комплексы

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, доцент
Зиганшин Малик Гарифович

Казань - 2020

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ 4

Глава 1 АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ СУЩЕСТВУЮЩИХ СПОСОБОВ ЦИКЛОНИРОВАНИЯ И ФИЛЬТРАЦИИ ГАЗОВОГО ТОПЛИВА ГОРОДСКИХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ 13

1.1. Способы очистки топливных газов городских энергетических систем в циклонных сепараторах 13

1.1.1. Преимущества и недостатки циклонных сепараторов 17

1.1.2. Анализ способов повышения энергоэффективности циклонирования газового топлива 21

1.2. Тканевые фильтры для очистки топливных газов, их преимущества и недостатки 25

1.3. Циклонная фильтрация топливных газов 30

1.3.1. Принцип циклонной фильтрации 30

1.3.2. Существующие схемы и аппараты, реализующие принципы циклонной фильтрации газового топлива в городских энергетических системах 31

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 1 39

Глава 2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЦИКЛОННЫХ СЕПАРАТОРОВ ДЛЯ ОЧИСТКИ ГАЗОВОГО ТОПЛИВА ГОРОДСКИХ ЭНЕРГОИСТОЧНИКОВ 40

2.1. Движение дисперсного потока и сепарация взвеси в циклонных аппаратах 40

2.2. Применение безразмерного комплекса Re_r для определения эффективности установки фильтра в циклонный сепаратор 45

2.3. Результаты расчетов относительного числа Рейнольдса Re_r для определения фракционных коэффициентов при очистке газового топлива городских энергоисточников 47

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2 52

Глава 3 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЦИКЛОННЫХ СЕПАРАТОРАХ С ЦЕЛЬЮ УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ОЧИСТКИ ГАЗОВОГО ТОПЛИВА ГОРОДСКИХ ЭНЕРГОИСТОЧНИКОВ 53

3.1. Обзор используемых методов численных исследований 53

3.2. Построение геометрической модели численных исследований 63

3.3. Постановка граничных условий и устранение сеточной зависимости 63

3.4. Обработка результатов исследований 65

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3 68

Глава 4 ЛАБОРАТОРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ЦИКЛОНА-ФИЛЬТРА ДЛЯ ОЧИСТКИ ГАЗОВОГО ТОПЛИВА ГОРОДСКИХ ЭНЕРГОСИСТЕМ 69

4.1. Обзор существующих методов натурного эксперимента по очистке топливных газов в городских энергосистемах 69

4.2. Построение модели для проведения лабораторных испытаний на усовершенствованном циклон-фильтре 74

4.3. Описание методики выполнения лабораторных испытаний 75

4.4. Проведение испытаний усовершенствованного циклона-фильтра для очистки газового топлива 77

4.5. Обработка результатов исследований 78
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4 81
Глава 5 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЦИКЛОННОЙ ФИЛЬТРАЦИИ С ЦЕЛЬЮ СЕПАРАЦИИ ДИСПЕРСНЫХ ПРИМЕСЕЙ ГАЗОВОГО ТОПЛИВА ГОРОДСКИХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ 82
5.1. Описание экспериментальной установки 82
5.2. Методика измерений 84
5.2.1. Приготовление эталонной пробы пыли для проведения экспериментов 84
5.2.2. Определение дисперсного состава пыли после прохождения циклона-фильтра 89
5.2.3. Регистрация числа частиц, осажденных на поверхности фильтра 89
5.2.4. Измерения давления, массы и скорости 91
5.3. Проведение стендовых испытаний 93
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 5 110
Глава 6 ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ГОРОДСКИХ ЭНЕРГОСИСТЕМ, ВСЛЕДСТВИЕ УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ПОДГОТОВКИ И ОЧИСТКИ ТОПЛИВА 112
6.1. Расчет технико-экономического эффекта от внедрения усовершенствованного циклона-фильтра на базе ППГ ТЭЦ г.Казани 112
6.2. Расчет технико-экономического эффекта внедрения усовершенствованного циклона-фильтра на базе ГРС г.Арск 117
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 6 120
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 122
СПИСОК ИСТОЧНИКОВ ЛИТЕРАТУРЫ 124
ПРИЛОЖЕНИЯ 135
Приложение А. Конструкция разработанного циклона-фильтра 135
Приложение Б. Инструкция по эксплуатации циклона-фильтра 137
Приложение В. Акт внедрения циклона-фильтра на АГРС «Арск» 143
Приложение Г. Теоретические расчёты определения эффективности инерционного осаждения опытного циклона 145
Приложение Д. Алгоритм расчета циклонов в программе ЭВМ 149
Приложение Е. Обработка результатов экспериментальных исследований. Определение погрешностей расчёта 152
Приложение Ж. Сертификация измерительных приборов 163
Приложение З. Результаты численного моделирования на основе CFD 168

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность проблемы. Существуют технические и экономические проблемы развития энергетических систем и комплексов, которые необходимо выявить и проанализировать с целью поиска решений для повышения эффективности их функционирования. Повышение эффективности и обеспечение устойчивого функционирования энергетических систем и комплексов крупных городов с минимизацией их опасного воздействия на окружающую среду является актуальной проблемой на сегодняшний день. Необходимость повышения энергетической и экологической эффективности городских газотранспортных сетей, а также систем топливоподготовки на ТЭС предусмотрена Федеральным законом №261-ФЗ от 23.11.2009 (ред. от 29.07.2017) «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации», требованиями по контролю за выбросом парниковых газов (напр., приказа Минприроды России №330 от 29.06.2017 года «Об утверждении методических указаний по количественному определению объёма косвенных энергетических выбросов парниковых газов»), и становится безотлагательной с ратификацией Правительством РФ Постановления от 21.09.2019 №1228 о «Парижском соглашении по климату».

Энергетические предприятия имеют свои особенности и производственные условия, отличающие их от других предприятий городской инфраструктуры. Постоянное ужесточение экологических нормативов и требований к надежности работы основного оборудования городских энергетических объектов обязывает совершенствовать технологии и технологические схемы обработки топлива в газораспределительных сетях с повышением эффективности отделения взвешенной части потока природного газа непосредственно в пунктах подготовки газа (ППГ) при газовой генерации, и степени очистки атмосферных выбросов систем пылеприготовления при угольной генерации.

Одна из актуальных задач, которые представляются важными в данной работе, заключается в осаждения мелкодисперсных взвешенных частиц классов PM_{10}, $PM_{2,5}$, что, кроме улучшения экологических метрик энергетических комплексов, предполагает и минимизацию отказов установок и элементов городских энергетических систем.

По мере развития современной энергетики, увеличения мощности технологических агрегатов возрастает количество выбросов в атмосферу. Загрязнение воздушной среды в системе пылеприготовления при угольной генерации ужесточает требования по эффективности очистки газов от высокодисперсных пылевых частиц с размерами менее 10 мкм, оказывающих наиболее неблагоприятное воздействие на организм человека [1]. Согласно документам Всемирной организации здравоохранения, взвешенные вещества $PM_{2,5}$ и PM_{10}, содержащиеся в

атмосферном воздухе, являются по степени своего вредного воздействия одним из наиболее значимых факторов влияния загрязнения воздуха на здоровье населения [2].

В России гигиеническое нормирование взвешенных частиц PM_{10} и $PM_{2,5}$ принято в 2010 году. В США и Евросоюзе (ЕС) такое нормирование существует с 1993 года и сопровождается большим количеством наблюдений, исследований, методических разработок [3]. Согласно принятому дополнению №8 к ГН 2.1.6.1338–03, введенному в действие в 2010 году, в России, установлены соответствующие предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест PM_{10} - 0,3 мг/м^3 и $PM_{2,5}$ - 0,16 мг/м^3. Среднесуточные предельно допустимые концентрации взвешенных веществ PM_{10}, $PM_{2,5}$ в атмосферном воздухе в США составляют– 0,15 мг/м^3, 0,035 мг/м^3 [4]. В странах Европейского Союза нормирование по этим частицам ведется более 20 лет и нормы становятся год от года все более жесткими. ПДК для PM_{10} составляет $\leq$ 0,0500мг/м^3, для $PM_{2,5}$ от 0,0085 до 0,018мг/м^3 [5].

По исследованиям, проведенным ВОЗ [6, 7, 8, 9] можно прийти к выводу, что пороговая концентрация PM_{10} располагается в нижней части диапазона наблюдаемых в настоящее время концентраций PM_{10} в Европейском регионе, но этого недостаточно, чтобы устранить все существенные последствия воздействия PM_{10}. Вдыхаемая пыль способна оседать на слизистой оболочке носа, трахей, бронхов, альвеол и вызывать хронический бронхит, пневмокониозы, онкологические заболевания, аллергические реакции, отравления, радиационные поражения. При длительном воздействии пыли возникают гипертрофические и атрофические процессы, гибель клеток [10]. Имеются достаточные доказательства влияния кратковременной экспозиции PM_{10} на дыхательную систему, однако с точки зрения смертности (и особенно смертности в результате долговременной экспозиции) более значимым фактором риска, чем грубая фракция PM_{10} (частицы с диаметром в пределах 2,5–10 мкм), являются $PM_{2,5}$. По имеющимся оценкам ВОЗ, при увеличении концентрации PM_{10} на 10 мкг/м^3 суточная смертность от всех причин возрастает на 0,2–0,6%. В условиях хронической экспозиции $PM_{2,5}$ каждое повышение концентрации $PM_{2,5}$ на 10 мкг/м^3 сопряжено с ростом долговременного риска кардиопульмональной (сердечно-лёгочной) смертности на 6-13% [7]. PM_{10} и $PM_{2,5}$ содержат респирабельные частицы, которые имеют настолько малый диаметр, что могут проникать в торакальный отдел дыхательной системы. Влияние респирабельных мелкодисперсных частиц на здоровье имеет полное подтверждение в [11]. Простые методы обработки выбросов современных городских энергетических систем не обеспечивают необходимой степени очистки, предотвращающей ощутимый ущерб окружающей среде и здоровью населения. Это определяется высокой зависимостью снижения вредного воздействия энергетических систем и комплексов на окружающую среду городов и энергосбережения при их функционировании.

Энерго- и ресурсосбережение, в свою очередь – это непосредственный путь сокращения потребления энергии, и, следовательно, снижения выбросов, в том числе парниковых газов.

В последние годы в России предпринимаются активные меры по энергосбережению и повышению энергоэффективности в совокупности со снижением выбросов парниковых газов. По приказу Минприроды России от 30 июня 2015 г. №300 [12] была установлена цель по снижению выбросов парниковых газов до уровня «70-75% выбросов 1990 года к 2030 году при условии максимально возможного учета поглощающей способности лесов». В 2019 году выбросы были ниже уровня 1990 года на 32,4%, однако это снижение было обусловлено спадом в экономике России в 1990-х годах.

В декабре 2015 г. в Париже на 21-й Конференции сторон РКИК ООН было разработано и одобрено большинством стран новое глобальное соглашение по климату. Из соглашения следует, что увеличение среднемировой температуры не должно превышать 2 градуса к 2050 г. [13]. 21 сентября 2019 года ратифицировано постановление № 1228 «Об участии России в Парижском соглашении по климату».

На сегодняшний день в России рассматриваются ориентиры для перехода на низкоуглеродный путь развития, увеличение энергоэффективности совершенствовать существующие аппараты в направлении повышения эффективности очистки и уменьшения энергозатрат. В связи с этим необходимо находить новые решения проблемы и совершенствовать существующие и разрабатывать новые более эффективные и надежные в работе установки по подготовке газового топлива в ППГ при газовой генерации и очистке атмосферных выбросов систем пылеприготовления при угольной генерации.

К росту надежности теплоэлектроцентралей, как базисных энергоисточников энергетических систем крупных городов РФ, в первую очередь приводят мероприятия, направленные на увеличение рабочего ресурса их агрегатов. В современных условиях перехода на парогазовые циклы большое влияние на увеличение рабочего ресурса оказывает качество подготовки газового топлива с точки зрения содержания взвешенных частиц. Этого можно достичь, повышая эффективность отделения взвешенной части потока в ППГ ТЭЦ.

Одним из простых способов очистки газов является осаждение взвесей в циклонах. По сравнению с другими видами сепараторов взвешенных частиц циклоны отличаются рядом преимуществ по технико-экономическим показателям, таким как относительно небольшие габариты, простота конструкции, изготовления и эксплуатации, небольшие инвестиционные и эксплуатационные расходы. Этими преимуществами объясняется и большой интерес, проявляемый к разработкам по их усовершенствованию особенно за рубежом. Однако пока циклонирование позволяет улавливать достаточно эффективно пыли среднего размера, а основным недостатком существующих циклонных сепараторов является резкое возрастание

энергозатрат на обеспечение высокой степени осаждения частиц размером менее 10 мкм. Мелкодисперсные частицы хорошо улавливаются тканевыми фильтрами, однако они также имеют ряд недостатков, например, высокую материалоемкость и др.

Указанные недостатки требуют решения задачи обеспечения надежности функционирования крупных энергоисточников как инфраструктуры энергетики города с переходом к усовершенствованным конструкциям усовершенствованных пылеуловителей для очистки топливных газов и запыленных выбросов без существенного увеличения энергетических и материальных затрат.

Поэтому исследования, направленные на снижение энергетических и материальных затрат пылеуловителей с обеспечением ими высокой эффективности осаждения мелкодисперсных частиц классов PM_{10}, $PM_{2,5}$, являются на сегодняшний день весьма актуальными.

Степень разработанности проблемы исследования

Существенный вклад в исследования по оптимизации соотношения величин степени улавливания и энергетических затрат газоочистительного оборудования, вопросов экспериментального и математического моделирования движения потока внесли: E.A. Bielefeldt, G. Staudinger, F.J. Souza, S.H. Amini, Д.И. Мисюля, K.W. Chu, J. Chen, A.B. Yu, M.A. Mokhtar, S.C. Thakur, J.Y. Ooi, H. Ahmadian, А.А. Халатов, А.И. Хазбулатов, Ю.А. Кныш, Я.В. Чистяков, З.Р. Горбис и др. Однако на сегодня остаются нераскрытыми вопросы по ряду особенностей движения двухфазных потоков в криволинейных каналах. Также отсутствуют исследования устройств, обеспечивающих при подготовке топлива городских энергетических систем высокую степень осаждения (выше 90%) мелкодисперсных частиц классов PM_{10}, $PM_{2,5}$, и имеющих одновременно невысокие энергозатраты.

Целью работы является повышение энергетической и экологической эффективности крупных городских энергетических систем и комплексов посредством улучшения качества подготовки топлива.

Задачи исследований:

1. Провести анализ научно-технической литературы по исследованию методов осаждения взвесей из двухфазных закрученных потоков.
2. Теоретически исследовать степень осаждения твёрдых частиц в циклонно-фильтрующих аппаратах.
3. Выполнить численные исследования аэродинамических процессов в циклонном сепараторе и верифицировать полученные результаты.
4. Провести экспериментальные исследования степени осаждения твёрдых частиц в лабораторном и стендовом циклонно-фильтрующих аппаратах.

5. Определить технико- экономический эффект от внедрения усовершенствованного циклонно-фильтрующего сепаратора при очистке газового топлива на ГРС и ППГ ТЭЦ, на объектах газораспределения городских газотранспортных систем, а также выбросов загрязняющих веществ в системе пылеприготовления ТЭЦ с угольной генерацией.

Соответствие паспорту 05.14.01

Диссертация соответствует специальности: 05.14.01 «Энергетические системы и комплексы» в части:

1. Использование на этапе проектирования и в период эксплуатации методов математического моделирования с целью исследования и оптимизации структуры и параметров энергетических систем, и комплексов и происходящих в системах энергетических процессов.
2. Разработка научных подходов, методов, алгоритмов, программ и технологий по снижению вредного воздействия энергетических систем и комплексов на окружающую среду.
3. Разработка и исследование в области энергосбережения и ресурсосбережения при производстве тепловой и электрической энергии, при транспортировке теплоты и энергоносителей в энергетических системах и комплексах.

Отрасль наук: технические науки.

Основная идея работы заключается в создании технического решения по совершенствованию таких инфраструктурных элементов энергоисточников, как система подготовки газа на ТЭС с газовой генерацией, система пылеприготовления ТЭС с угольной генерацией, а также городские газотранспортные сети.

Объектом исследования является система очистки топливной инфраструктуры городских энергетических систем.

Предметом исследования являются методы повышения эффективности очистки топлива городских энергетических систем.

Методология и методы исследования включают:

- теоретическое определение эффективности очистки газового топлива городских энергоисточников с использованием циклона-фильтра;
- численные исследования на основе методов CFD движения потока в кольцевом пространстве и выхлопной трубе циклона;
- экспериментальные исследования характеристик скоростей и давлений в циклонном фильтре в зависимости от режимов его работы;
- верификация и валидация результатов теоретических и численных расчётов по данным экспериментальных исследований.

Достоверность результатов определяется тем, что теоретические и численные исследования основываются на использовании апробированных теорий и методов

гидродинамического расчета, в том числе вычислительной гидродинамики. Подтверждением достоверности результатов исследований также служит согласованность расчетных результатов с данными экспериментов, а также с результатами исследований других авторов.

Научная новизна работы:

1. Способ расчётного определения фракционных коэффициентов очистки газов городских энергоисточников в усовершенствованном циклоне-фильтре.

2. Выбор и постановка условий, необходимых для выполнения численных расчётов методами вычислительной гидродинамики (CFD) в математической модели, позволяющей определять конструктивные и эксплуатационные параметры циклона-фильтра, входящего в состав технологического оборудования газоочистки городских энергетических систем, с целью объективного выбора очистных устройств до этапа проектирования.

3. Результаты, полученные при исследовании нового газоочистного устройства – циклона-фильтра предлагаемой конструкции, обеспечивающей повышение степени очистки газа в городских энергетических системах при улучшении экологических показателей и без существенного увеличения энергозатрат.

Практическая значимость работы заключается в разработке усовершенствованного энергоэффективного циклона-фильтра и его использовании при проектировании объектов ООО «Газпром трансгаз Казань», на автоматической газораспределительной станции АГРС «Арск» ООО «НПП «Авиагаз-Союз+».

Теоретическая значимость работы заключается в дополнении результатов численного моделирования закрученных потоков теоретическими расчётами определения степени очистки от твердофазных загрязнителей газовых потоков в циклоне-фильтре.

Личное участие заключается: в участии в разработке инновационной конструкции циклона-фильтра; в подготовке исходных данных для расчета на ЭВМ; в выполнении численных и экспериментальных исследований, а также в анализе полученных данных с последующей верификацией результатов расчетов.

Реализация результатов работы: разработаны и внедрены усовершенствованные энергоэффективные циклоны при проектировании и строительстве объектов ООО «Газпром трансгаз Казань», в блоке очистки газа на газораспределительной станции АГРС «Арск» ООО «НПП «Авиагаз-Союз+».

На защиту выносятся:

- результаты расчетов с использованием относительного числа Рейнольдса Re_r и программы ЭВМ «Программа расчёта газоочистных устройств с циклонно-фильтрующими аппаратами» эффективности очистных устройств с целью повышения энергоэффективности и экологической безопасности функционирования городских энергетических систем;

- результаты численного и опытного определения траектории потоков, полей скоростей и давлений в циклоне-фильтре;
- результаты численного определения радиальной, тангенциальной и осевой компонент вектора скорости потока, с верификацией данных по значениям давлений и векторов скорости, полученных в натурном эксперименте;
- зависимости гидравлического сопротивления циклона-фильтра от расхода газа, необходимые для оптимизации его эксплуатационных характеристик в производственных условиях при функционировании городских энергетических и газотранспортных систем;
- результаты совокупного экономического системного эффекта при эксплуатации запатентованной конструкции циклона-фильтра от повышения степени очистки газового топлива городских энергоисточников при газовой генерации и атмосферных выбросов систем пылеприготовления при угольной генерации.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и получили одобрение на ряде научных конференций Казанского государственного архитектурно-строительного университета, начиная с 2009г., на Международной научно-практической интернет - конференции «Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании» (Одесса, 2011), на Международной научно-технической конференции “XVII Бенардосовские чтения” ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина» (Иваново, 2013), на Международной заочной научно-практической конференции «Теоретические и практические аспекты развития современной науки» «Институт Стратегических Исследований» (Москва, 2013), на Международной заочной научно-практической конференции «Наука, образование, общество: тенденции и перспективы» «АР-Консалт» (Москва, 2014), на Национальном конгрессе по энергетике «Казанский государственный энергетический университет» (Казань 2014), на Всероссийской студенческой олимпиаде «Энерго- и ресурсосбережение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии» ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» (Екатеринбург, 2014), на IV-й Международной научно-практической конференции «Исследования в строительстве, теплогазоснабжении и энергообеспечении» ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ им. Н.И. Вавилова (Саратов, 2016), на VII-й Всероссийской научно-технической конференции «Безопасность критичных инфраструктур и территорий» Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (Екатеринбург, 2016), на X-м семинаре молодых ученых и специалистов имени академика РАН В.Е.Алемасова КазНЦ РАН (Казань, 2016), на III Международной конференции «НАСКР-2016» ФГБОУ ВО «ЧГУ им. И.Н. Ульянова» (Чебоксары, 2016), на XV-й Международной научной конференции

«Качество внутреннего воздуха и окружающей среды» НИИСФ РААСН (Волгоград, 2017), на Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов «Экология и безопасность в техносфере: современные проблемы и пути решения» ФГАОУ ВО НИ ТПУ «Юргинский технологический институт» (Юрга, 2017), на VII-й Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы и перспективы развития строительства, теплогазоснабжения и энергообеспечения» ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ им. Н.И. Вавилова (Саратов, 2018), на XIII-й Всероссийской научно-практической конференции «Социально-экономические и естественно-научные парадигмы современности» ЧОУ ВПО «Южный Университет «ИУБиП» (Ростов-на-Дону, 2018), на XIII-й Всероссийской научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные разработки естественных и гуманитарных наук: современные концепции, последние тенденции развития» ЧОУ ВПО «Южный Университет «ИУБиП» (Ростов-на-Дону, 2018), на IV-й Международной конференции «Проблемы безопасности строительных критичных инфраструктур» Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина (Екатеринбург, 2018), на Международной научно-практической конференции «Водно-энергетический форум-2018» ФГБУ ВО КГЭУ (Казань, 2018), на международном круглом столе «Фундаментальные и прикладные разработки в области технических и физико-математических наук» ООО «Газпром трансгаз Казань» (Казань, 2018г), на X-й Международной научно-практической конференции «Инновационные технологии в машиностроении» Юргинский технологический институт Национального исследовательского Томского политехнического университета (Томск, 2019), на IX Национальной конференции с международным участием. Под ред. Ф.К. Абдразакова «Современные проблемы и перспективы развития строительства, теплоснабжения и энергообеспечения» ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ (Саратов, 2019), на IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 481 (Екатеринбург, 2019), на IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 288 (Казань, 2019), на IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 972 (Екатеринбург, 2020).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 38 печатных работ, в том числе 4 статьи в изданиях, индексируемых в международных базах, данных SCOPUS, 8 в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 26 публикаций в прочих изданиях, получен патент РФ на полезную модель «Батарейный циклон с циклонными элементами «циклон-фильтр» и 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Имеется 17 цитирований публикаций автора в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 5 цитирований в SCOPUS, в том числе 2 в журнале Q1.

Структура и объем работы. Диссертация включает введение, шесть глав (глава 1: «Анализ эффективности существующих способов циклонирования и фильтрации газового

топлива городских энергетических систем»; глава 2: «Теоретические расчеты эффективности применения циклонных сепараторов для очистки газового топлива городских энергоисточников»; глава 3: «Математическое моделирование аэродинамических процессов в циклонных сепараторах с целью усовершенствования очистки газового топлива городских энергоисточников»; глава 4: «Лабораторные испытания циклона-фильтра для очистки газового топлива городских энергосистем»; глава 5: «Экспериментальное исследование эффективности циклонной фильтрации с целью сепарации дисперсных примесей газового топлива городских энергетических систем»; глава 6: «Повышение эффективности эксплуатации топливно-энергетической инфраструктуры городских энергосистем, вследствие усовершенствования технологии подготовки и очистки топлива») заключение, список использованной литературы (128 наименований). Содержание работы изложено на 134 стр. основного текста и 36 стр. приложений, имеется 106 рисунков, 10 таблиц.

Глава 1 АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ СУЩЕСТВУЮЩИХ СПОСОБОВ ЦИКЛОНИРОВАНИЯ И ФИЛЬТРАЦИИ ГАЗОВОГО ТОПЛИВА ГОРОДСКИХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

1.1. Способы очистки топливных газов городских энергетических систем в циклонных сепараторах

Повышение энергетической и экологической эффективности городских газотранспортных сетей, а также систем топливоподготовки на ТЭС крупных городов является актуальной проблемой на сегодняшний день. Постоянное ужесточение экологических нормативов и требований к надежности работы основного оборудования городских энергетических объектов обязывает совершенствовать технологии и технологические схемы обработки топлива в газораспределительных сетях с повышением эффективности отделения взвешенной части потока природного газа непосредственно в пунктах подготовки газа (ППГ) при газовой генерации, и степени очистки атмосферных выбросов систем пылеприготовления при угольной генерации. Загрязнители классов $PM_{2,5}$ и PM_{10} могут поступать в окружающую городские энергоисточники воздушную среду не только с дымовыми газами, но и с вентиляционными выбросами, и необходимость их очистки указана в СП 90 “Электростанции тепловые” [14].

Подбор технологии очистки газового топлива основывается на нахождении наиболее эффективных способов, которые требуют минимум энергетических затрат на очистку. Однако на практике распространенность отдельных способов очистки определяется, прежде всего, их стоимостью и сложностью эксплуатации, и только затем – энергозатратами и степенью очистки. Циклоны, как правило, используют для грубой и средней очистки воздуха от неслипающейся сухой пыли. Они обладают сравнительно небольшой фракционной эффективностью в области фракций пыли размером до 5…10 мкм, что является их основным недостатком.

Циклонные пылеуловители могут классифицироваться по различным признакам. По организации движения потоков их можно разделить на возвратно-поточные, прямоточные циклоны, вихревые пылеуловители. Иногда циклоны разделяют по конструкции ввода запыленного потока на следующие типы: с простым тангенциальным вводом газа; с тангенциальным вводом газа с винтовой верхней частью; с простым спиральным вводом газа; со спиральным вводом газа с винтовой верхней частью; с осесимметричным вводом по направляющим лопаткам [15].

Простота конструкции циклонных аппаратов обеспечивает надежность и удобство их эксплуатации, невысокую стоимость. Корпус возвратно-поточного циклона содержит

цилиндрическую и коническую части. На цилиндрической части установлен входной патрубок, который направляет поток внутрь неё тангенциально. Выхлопная труба частично погружена в центр цилиндрической части. Нижний бункер, или сборная камера, служит для сбора частиц, которые отделяются в конической части и поступают на выгрузку. В некоторых конструкциях циклонов нижняя сборная камера может и не использоваться [16]. Прямоточные циклоны отличаются низким гидравлическим сопротивлением и меньшей по сравнению с другими моделями эффективностью пылеулавливания. Вихревые пылеуловители или пылеуловители со встречными закрученными потоками подразумевают установку дополнительного дутьевого устройства, чем усложняют установку.

На сегодняшний день имеются много исследований, в которых получены данные о характеристиках потоков в циклонных пылеуловителях. В [17] дана оценка турбулентной вязкости потока с использованием полуэмпирических соотношений для градиентных потоков. Скорость турбулентного перераспределения частиц в зоне сепарации с радиусом цилиндрической камеры циклона $R_к$ определяется соотношением $\varepsilon/R_к$, причем коэффициент турбулентного перемешивания равен (1.1):

$$\varepsilon = W_r R / (n+1), \tag{1.1}$$

где W_r - радиальная скорость газа, R - радиус выходного патрубка, n-показатель степени в уравнении (1.2):

$$W_\phi R^n = W_{\phi k} \cos\beta R_k^n , \tag{1.2}$$

где W_ϕ - тангенциальная скорость частицы, которая приравнивается тангенциальной скорости газа, β - угол наклона входного патрубка, R_k^n - радиус цилиндрической камеры, $W_{\phi k}$ - скорость турбулентного перераспределения частиц в зоне сепарации с радиусом $R_к$.

Обобщенный параметр α представляет отношение скорости частиц относительно газа под действием центробежных сил к скорости перераспределения частиц турбулентным переносом (1.3):

$$\alpha = \Delta U / (\varepsilon \cdot R_k), \tag{1.3}$$

где ΔU - скорость частицы относительно газа, который зависит от режима обтекания частицы газом и может быть найдена из уравнения равенства центробежной силы и силы сопротивления движению частицы (1.4):

$$\frac{\pi \rho_\delta \delta^3}{6} \frac{W_\phi^2}{R} = \Psi(\mathrm{Re}_\delta) \frac{\pi \delta^2}{4} \rho \Delta U^2, \tag{1.4}$$

где ρ_δ, ρ - плотности частиц и воздуха, δ - диаметр частиц переменный, $\Psi(\mathrm{Re}_\delta)$- коэффициент сопротивления движению частицы. Критерий Re_δ, выражающий соотношение действий частицы и потока равен (1.5):

$$\mathrm{Re}_\delta = \Delta U \delta / \nu, \tag{1.5}$$

где ν - кинематический коэффициент вязкости.

Введя обозначение $w_ф = W_ф / W_ц$, $\Delta u = \Delta U / W_ц$, $r = R / R_k$, где $W_ц$- среднерасходная плановая скорость, из выражения (1.4) путем аппроксимации получим (1.6):

$$\mathrm{Re}_\delta = \left[Stk\, \mathrm{Re}_{\delta,w} (w_ф^2 / r) \right]^{0.75}, \; w_ф \xi w_{вх} \cos\beta \frac{1}{r^n}, \tag{1.6}$$

где Stk – число Стокса, $w_{вх} = 1 / f_{вх}$, $f_{вх} = 4F_{вх} / \pi D^2$, где $F_{вх}$ - площадь входного патрубка, D- диаметр циклона.

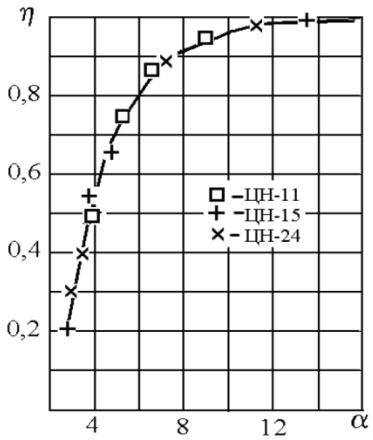


Рисунок 1.1. Зависимость фракционной эффективности обеспыливания газов от показателя α [17]

На рисунке 1.1 представлена кривая зависимости фракционного обеспыливания газа от показателя α. Видно, что кривая эффективности одна и та же для разных циклонов, если их данные представлены в зависимости от показателя α.

Проведенные исследования [17] показали, что турбулентная вязкость определяется интенсивностью радиального переноса закрученного потока к оси, а также показателем распределения тангенциальных скоростей. В зависимости от конструкции камеры оказывается возможным проводить оценку интенсивности турбулентного перемешивания частиц. Периферийная и центральная области связаны за счёт диффузионного переноса частиц. Диффузионные потоки частиц в тангенциальном и аксиальном направлениях много меньше потоков частиц в осредненном движении в тех же направлениях [18]. Упрощенно считая, что траектории движения взвешенных частиц близки к окружностям, величину возникающей силы

инерции принимают пропорциональной квадрату тангенциальной скорости, массе частиц и обратно пропорциональной радиусу вращения. Поскольку инерционная сила пропорциональна массе, а масса – размеру в третьей степени, то мелкие частицы улавливаются в циклонах плохо. Степень очистки аэрозолей с размерами частиц свыше 10 мкм находится в пределах 80...90%, а более мелких частиц PM_{10} и $PM_{2,5}$ намного хуже.

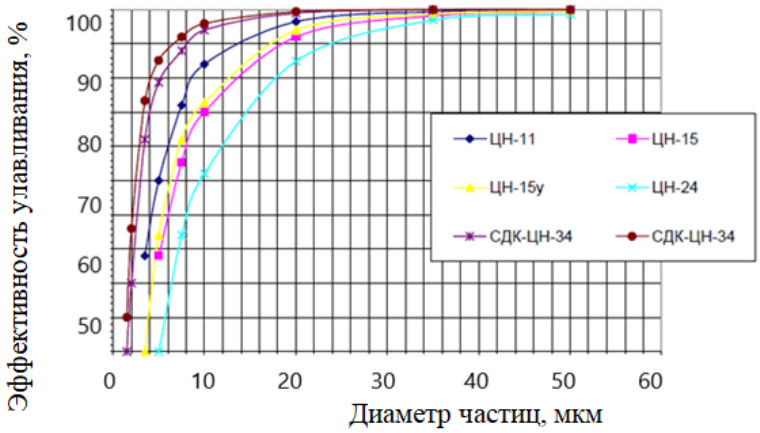


Рисунок 1.2. Эффективность циклонов ЦН различных марок [19]

Сравнительные испытания ряда широко распространенных в настоящее время циклонов, представленные на рисунке 1.2, показывают, что эффективность циклона тем выше, чем больше диаметр частиц пыли, скорость вращения газового потока и чем меньше диаметр циклона [19]. Все эти соотношения влияют на такие технические характеристики циклонов, как производительность, удельные энергозатраты, эффективность улавливания пыли, фракционный состав улавливаемой пыли, потери давления в аппарате.

За счет уменьшения диаметра циклона и повышения скорости потока возможно увеличение степени очистки, но только до определенного предела, которая ограничена техническими и экономическими факторами, например как рост энергетических затрат, ухудшение очистки вследствие повторного захвата отсепарированных частиц, увеличение металлоемкости, абразивный износ и другими. Для широко распространенных циклонов оптимальные значения скоростей потоков и конструктивных параметров установлены опытным путем и приводятся в справочной литературе [20].

Подбор циклона производят по расчетной производительности аппарата и расчетной скорости газа (воздуха) при входе в циклон с целью обеспечения высокой степени очистки при минимальных энергетических затратах (т.е. при минимальном гидравлическом сопротивлении). Оптимальное значение скорости равно (1.7):

$$V_{ц}^{опт} = \sqrt{\frac{2\Delta p^{опт}}{\zeta_{ц} \cdot \rho_{z}}}, \qquad (1.7)$$

где $\zeta_ц$ - коэффициент гидравлического сопротивления, $\Delta p^{опт}$ - оптимальное гидравлическое сопротивление. При этом оптимальные значения гидравлического сопротивления ($\Delta p^{опт}$) всех конструкций циклонов принадлежат определенному диапазону величин, ограниченному с одной стороны стремлением достигнуть наибольшей эффективности пылеулавливания, а с другой стороны - уложиться в допустимые эксплуатационные показатели – энергозатраты и износ корпуса. Сопротивление циклонов $\Delta p^{опт}$ рассчитано исходя из значений $V_ц^{опт}$ и $\zeta_ц$ при $t_z = +20°C$.

По формуле 1.7 определены энергозатраты по нескольким видам циклона. Например по данным [21], в СЦН-40 гидравлическое сопротивление такое же, как в СК-ЦН-34, однако в 5 раз больше, чем в ЦН-11, так как коэффициент гидравлического сопротивления в СЦН-40 и СК-ЦН-34 $\zeta_ц$=1100 и $\zeta_ц$=1150, соответственно, а в ЦН-11 $\zeta_ц$=147 и поэтому для численных и опытных экспериментов выбран циклон ЦН с минимальными энергозатратами. К тому же небольшая скорость в циклоне СЦН-40 (1,3-1,9 м/с) по сравнению с ЦН-11 (3,0-4,0 м/с) увеличивает его габаритные размеры, металлоемкость и уменьшает производительность по воздуху.

Возможность применения циклонов, как самостоятельного устройства для очистки дисперсных потоков в связи с усилением экологических требований постоянно уменьшается. В настоящее время их рекомендуется использовать для первой ступени очистки и устанавливать перед устройствами с высокой степенью очистки, например тканевыми или электрофильтрами.

При создании пылеулавливающих установок необходим обоснованный выбор или разработка оптимальной конструкции циклона с наибольшей эффективностью пылеулавливания и минимальными энергетическими затратами. В зависимости от физико-химических и гидродинамических свойств пылегазовых потоков и с учетом технико-экономических условий конкретного производства за аналог выбран циклон ЦН-11 с минимальными энергетическими затратами, с относительно высокой скоростью и производительностью по сравнению с другими циклонами, такими как СЦН-40 и СК-ЦН-34.

1.1.1. Преимущества и недостатки циклонных сепараторов

Широкое применение циклонных пылеуловителей в энергетике объясняется тем, что по сравнению с другими видами пылеуловителей они отличаются рядом преимуществ по технико-экономическим показателям. Это сравнительно небольшие габариты при больших производительностях по воздуху, простота конструкции и изготовления, небольшие эксплуатационные расходы, надежная работа при температуре до 300-350°С без охладителей, возможность улавливания пыли в сухом виде, улавливание абразивных материалов при защите

внутренних поверхностей циклонов специальными покрытиями, высокая производительность и сохранение требуемого уровня фракционной эффективности очистки с ростом массовой концентрации частиц.

Однако у существующих циклонных аппаратов имеется ряд недостатков, таких как обеспечение высокой степени осаждения частиц классов PM_{10} и $PM_{2,5}$ только при высоких энергетических затратах. Аппараты же с низким сопротивлением, и, соответственно, энергоэффективные, имеют невысокую степень очистки частиц указанных классов. Коэффициент сопротивления циклона зависит от числа Рейнольдса Re, но в отличие от обычного коэффициента трения он возрастает с увеличением Re в определенных пределах и, наоборот, снижается с уменьшением этого числа [22]. Это означает, что коэффициент сопротивления также возрастает с увеличением скорости потока в циклоне при постоянных диаметрах и вязкости. Такое изменение объясняется влиянием сопротивления трения в циклоне на интенсивность вращения потока. Чем меньше Re, тем больше коэффициент трения λ и, следовательно, тем большее тормозящее действие оказывают стенки циклона на поток при его вращении. Так как основные потери в циклоне связаны с вращательным движением среды, то уменьшение интенсивности вращения приводит к снижению коэффициента полного сопротивления циклона [22]. Скорость запыленного воздушного потока, подводимого в циклон, можно принимать 16-22 м/с, при этом достигается максимальная эффективность работы циклона. Однако здесь следует отметить при таких высоких скоростях, предлагаемых авторами, будут большие энергозатраты. Верхний предел скорости обусловливается тем, что с ее повышением эффективность очистки увеличивается незначительно, а сопротивление при этом возрастает пропорционально квадрату входной скорости воздуха. По данным, приведенным в [23], при входной скорости воздуха выше 30 м/с эффективность очистки может значительно снизиться, пояснений автор не приводит.

Еще одним недостатком циклонных пылеуловителей является то, что улавливая крупные частицы, циклоны при высоких входных скоростях подвергаются абразивному износу. Этому способствует многовитковое вращение газового потока, несущего дисперсную фазу. В результате вращения и возникновения сил происходит концентрирование крупных абразивных частиц у стенок аппарата, следствием чего является эрозия, то есть истирание стенок циклона вплоть до образования сквозных отверстий. Скорость такого истирания в отдельных случаях может доходить до12 мм в год [24, 25].

Авторы [26] в результате экспериментальных исследований разработали простую конструкцию сепарирующей части пылеуловителя, которая отличается минимальным гидравлическим сопротивлением, которая представлена на рисунке 1.3.

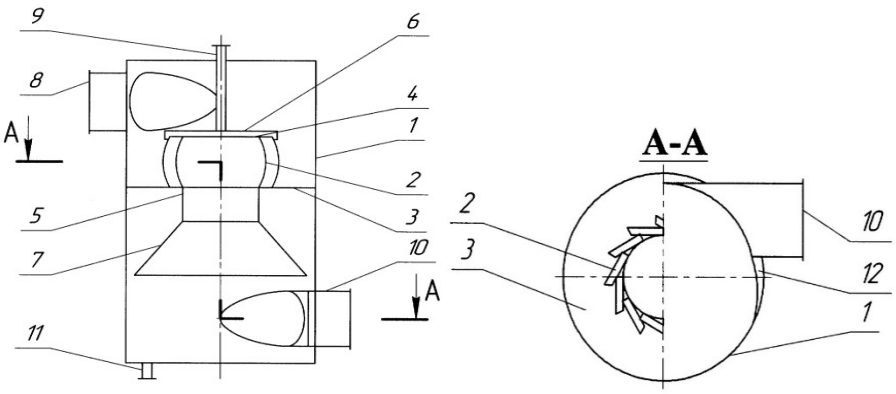


Рисунок 1.3. Вихревой пылеуловитель (Патент №2314146РФ), где 1-корпус, 2-пластина, 3,4- тарелки, 5-сепаратор, 6-ороситель, 7-диффузор, 8- тангенциальный патрубок подвода газа, 9-патрубок подвода жидкости, 10- тангенциальный патрубок отвода газа, 11-патрубок отвода жидкости, 12-вставка

Экспериментальные исследования [26] подтвердили снижение гидравлического сопротивления аппарата оптимальной конструкции во всем диапазоне изменения скоростей газа на 35 % по сравнению с конструкцией по рисунку 1.3.

В [27] представлены конструкции (рисунок 1.4) циклонов с пониженными затратами энергии (циклоны с перфорированной погружной трубой Киттлера). В данной работе обращается внимание на значительные неравномерности радиальной скорости. В центре погружной трубы образуются обратные токи, которые ведут к понижению эффективности, при этом до 90% потерь энергии происходит в погружной трубе.

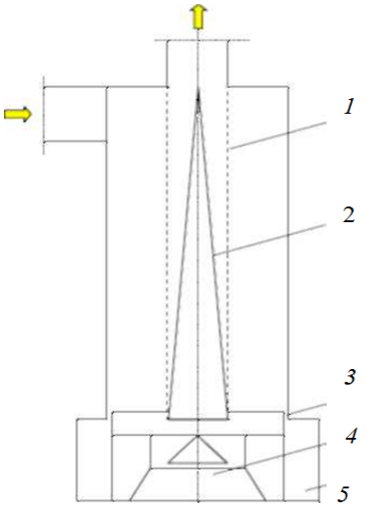


Рисунок 1.4. Циклон с перфорированной погружной трубой Киттлера:
1-перфорированная погружная труба; 2- коническое ядро; 3- корпус устройства; 4- сборный первоначальный контейнер пыли; 5-сборный вторичный контейнер пыли

Проведённые исследования [27] показали, что если погружную трубу заменить центральной трубой, то улучшение составляет 20-30%. Если в центральной трубе установить центральные рёбра, то улучшение превысит 30%. Если вместо сосредоточенного впускного канала применить щелевой впуск, с центральной трубой и рёбрами, то возможно улучшение более 40%. Можно сделать вывод, что при использовании погружной трубы уменьшаются энергозатраты, но при этом снижается эффективность очистки (рисунок 1.5).

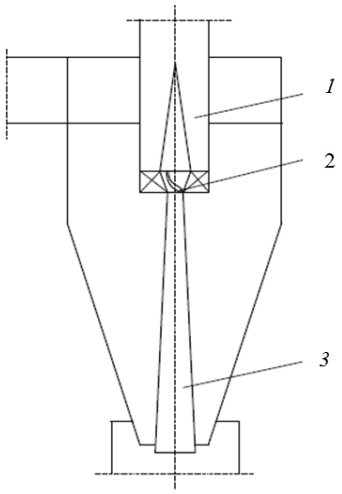


Рисунок 1.5. Устройство для уменьшения потери давления в циклоне [28]: 1-диффузор, 2- направляющий аппарат для регенерации энергии крутки, 3-конусообразная «выемка» (зона пониженного давления) ядра вихря

Авторами работы [29] представлен HL-циклон высокой производительности (Hochleistungszyklon). Он отличается от стандартных классических циклонов сквозной центральной («направляющей») трубой по оси циклона, сильно зауженным входным патрубком запыленного газа, существенно укороченной конической частью циклона, впадающей в бункер. По мнению авторов разработки, конструктивное дополнение в виде центральной трубы, расположенной по оси HL-циклона (рисунок 1.6), обеспечивает высокоэффективную работу аппарата данной конструкции. По представлениям авторов [30], в классических стандартных циклонах без центральной направляющей трубы переход от ламинарного к турбулентному течению происходит внутри выхлопной трубы аппарата. В результате ядро вихря потока в аппарате становится нестабильным, что вызывает большие потери давления и энергозатраты, по-видимому, на перестройку структуры потока, заключающуюся в разрушении организованного вращательного движения потока с образованием мелких вихрей стохастического характера. По [31] это вызывает, в свою очередь, высокие потери (до 90% от общей потери давления) вследствие диссипации энергии в потоке. Авторы [32] утверждают, что роль центральной («направляющей») трубы на оси циклона заключается в стабилизации вращающегося течения потока, и в сдвиге перехода от ламинарного к турбулентному режиму в

область более высоких чисел Рейнольдса. В этом случае потеря статического давления ΔP_{stat} снижается, а степень разделения улучшается ввиду увеличения динамического напора. Однако опыты на конструкции HL-циклона проводились авторами при нагрузках в 1,5…2 раза ниже оптимальных для классических стандартных циклонов такого типоразмера. Следовательно, испытанные режимы могут не соответствовать условиям промышленной эксплуатации аппаратов, и эффективность, достигнутая в экспериментах, в реальных условиях может не подтвердиться.

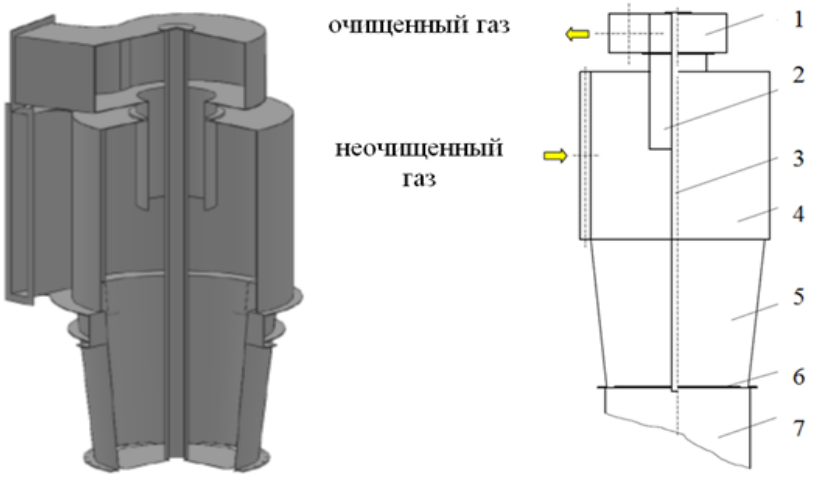


Рисунок 1.6. HL-циклон: 1 – выходной патрубок, 2 – погружная труба, 3 – центральная часть трубы, 4 – цилиндрическая часть циклона, 5 – коническая часть циклона, 6 – бункер с пылью

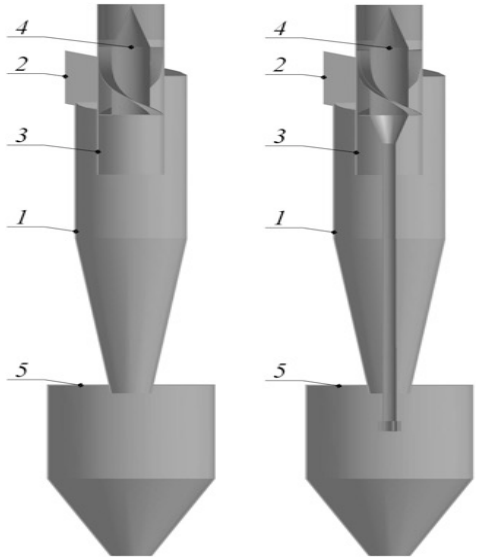
Основное техническое противоречие, которое должно быть решено при создании новых конструкций циклонов, можно сформулировать следующим образом. Для того чтобы повысить эффективность очистки пылегазового потока в циклоне, необходимо увеличить скорость потока воздуха, что приводит к росту сил инерции, действующих на частицу пыли. Однако при возрастании скорости потока растут энергозатраты на очистку и абразивный износ. Попытки минимизировать спад давления противоречат попыткам повысить эффективность улавливания частиц. Любой показатель, направленный на повышение эффективности, связан с ростом энергетических затрат. Решить такое противоречие необходимо путем усовершенствования существующих моделей газоочистных устройств.

1.1.2. Анализ способов повышения энергоэффективности циклонирования газового топлива

Уменьшение энергозатрат и пылевых выбросов в энергосистемах можно достичь в случае усовершенствования применяемых систем пылеулавливания, что к тому же косвенно приведёт к уменьшению накопления в атмосфере парниковых газов [33]. В свою очередь энерго- и ресурсосбережение – это непосредственный путь сокращения потребления энергии, а,

следовательно, и снижения выбросов парниковых газов. Повышение энергоэффективности является одним из приоритетов развития технического уровня энергосистем. Анализ структуры энергозатрат и учета различных влияющих на их величину факторов показывает, что на вентиляцию и очистку газов затрачивается 10-12 % всей электроэнергии, более 20 % теплоты, вырабатываемой и потребляемой промышленными предприятиями [34].

В последние годы в России предпринимаются активные меры по энергосбережению и повышению энергоэффективности в совокупности со снижением выбросов парниковых газов. Учёные констатируют тенденцию к потеплению климата. Средняя температура на планете к 2030 г. не должна повыситься более чем на 2,0°С, иначе спектр негативных последствий может быть очень широким, от повышения уровня Мирового океана до перераспределения осадков [35]. Следовательно, обеспечивая необходимый уровень жизни населения, государство должно стремиться к прорабатыванию перспективных структур энергетических систем и комплексов, разрабатывать новые методы исследования и оценки качества энергетических систем и комплексов с целью повышения их экономичности, надежности, безопасности и снижения вредного воздействия на окружающую среду. Снижение энергозатрат способствует энергосбережению, что приводит к снижению выбросов парниковых газов. Например, по мнению авторов работы [36], установка завихрителя роторного типа в центробежных пылеуловителях, способствует уменьшению энергозатрат. С целью минимизации энергозатрат и повышения эффективности улавливания твердых частиц при циклонной очистке газов авторами [37, 38, 39, 40, 41] усовершенствованы конструкции наиболее распространенных и универсальных циклонов НИИОГАЗ типа ЦН (рисунок 1.7). В циклонах с лопастным раскручивателем (рисунок 1.7, *а*) кинетическая энергия вращательного движения восходящего вихревого потока преобразуется в потенциальную энергию статического давления, что снижает общие потери давления. При одинаковой эффективности разделения они имеют на 26–30% меньшее гидравлическое сопротивление по сравнению со стандартными циклонами типа ЦН. В циклонах с раскручивающим устройством с рециркуляцией потока (рисунок 1.7, б), наряду с преобразованием кинетической энергии вращательного движения восходящего вихревого потока в потенциальную энергию статического давления, осуществляется внутренняя рециркуляция наиболее концентрированного пылью потока из выхлопной трубы в бункер. В данных циклонах раскручивающее устройство практически не влияет на степень очистки, но понижает на 19 - 23% гидравлическое сопротивление.



а) б)

Рисунок 1.7.Усовершенствования конструкций стандартных циклонов типа ЦН: *а* – с лопастным раскручивателем; *б* – с раскручивающим устройством с рециркуляцией потока:*1* – корпус; *2* – входной патрубок; *3* – выхлопная труба; *4* – раскручивающее устройство; *5* – бункер

В работе [42] Хазбулатовым А.И. были детально рассмотрены различные способы закрутки потока и соответствующие им типы и виды закручивающих устройств, приведены их положительные стороны и недостатки. Дана понятийная база и характерные особенности закрученного течения. И наиболее перспективным оказался тангенциальный лопаточный завихритель. Он прост в изготовлении, обеспечивает достаточную закрутку потока, необходимое время для разгона частиц до скорости газа и высокую эффективность очитки.

Пылеуловитель (рисунок 1.8) представляет собой циклон, корпус которого выполнен из вертикально ориентированных сегментов специального профиля, образующих полусферические уступы, внутри корпуса установлен соосно усеченный конус (обращенный вниз) или обечайка (полый цилиндр), отделяющие пространство у стенок от центральной части [43]. Результаты экспериментов, проведенных авторами [43] показали, что у циклона с внутренними элементами гидравлическое сопротивление в 2 раза ниже, чем в традиционном циклоне НИИОГАЗ. Результаты измерения давления по высоте цилиндрической части циклона позволяют получить оптимальные геометрические размеры расположения внутренних элементов циклона для эффективного пылеулавливания с низкой кажущейся плотностью. Однако, экспериментальные исследования эффективности показали, что в традиционных циклонах эффективность пылеулавливания выше.

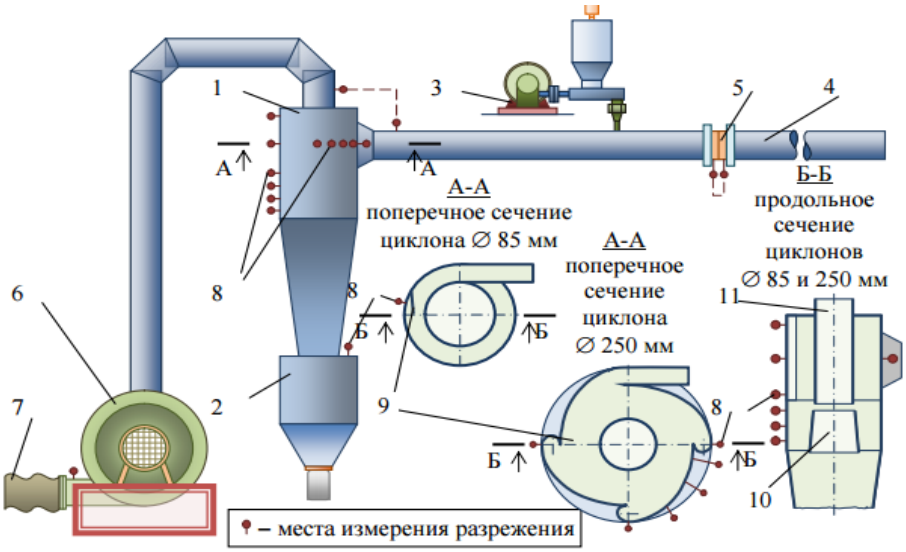


Рисунок 1.8. Циклон с внутренней рельефной поверхностью: 1 – верхняя часть пылеуловителя, 2 – бункер, 3 – спиральный дозатор-питатель, 4 – трубопровод, 5 – диафрагма, 6 – воздуходувка, 7 – рукавный фильтр, 8 – места измерения давления или разрежения, 9 – уступы, 10 – выхлопная труба, 11 – внутренний конус

Сравнение удельных энергозатрат на очистку газов в пылеулавливающих установках приведено в [44], однако при различных исходных и конечных условиях: разные физические свойства пыли и газа, разные эффективности пылеулавливания. Известно, что чем выше требуется эффективность пылеулавливания, тем выше должны быть энергозатраты на газоочистку. Мелкая пыль может быть уловлена с той же эффективностью, что и крупная, при более высоких энергозатратах. Поэтому необходимо выполнить расчёт степени осаждения мелкодисперсных частиц в сепараторах циклонного типа при эксплуатации городских энергосистем с целью снижения вредного воздействия на окружающую среду теоретическим путём.

Выбор типа циклона, как и в целом аппаратов газоочистки, не на основе традиционно сложившихся предпочтений - минимальности габаритных размеров или стоимости аппарата, а на основе анализа их энергетической и экологической эффективности, обеспечит не только минимальность затрат на очистку газа, но и в условиях высоких цен на электроэнергию будет способствовать широкому применению более энергоэффективного оборудования. Это также явилось бы одним из экономических механизмов, стимулирующих повышение эффективности использования энергоресурсов, развитие и совершенствование которых является одним из приоритетных направлений республиканской (Республика Татарстан, РТ) программы энергосбережения.

1.2. Тканевые фильтры для очистки топливных газов, их преимущества и недостатки

Фильтрация топливных газов, а также аспирационного воздуха в тканевых фильтрах является техническим решением для обеспечения высокой степени осаждения взвешенных частиц с размерами до субмикронных [45]. Преимуществом тканевых фильтров является высокая степень очистки – свыше 99%. Поэтому тканевые фильтры применяют на конечной стадии очистки для улавливания частиц пыли класса $PM_{2,5}$ и менее.

Основные требования к фильтрам: задаваемая величина выходной концентрации; допускаемое сопротивление фильтра; размер установки; требуемая площадь; место расположения; необходимое вспомогательное оборудование для кондиционирования очищаемых газов перед фильтрами; место установки вентилятора и требования к нему; климатические условия, в которых происходит эксплуатация фильтра; потребность в воде, паре и сжатом воздухе и их параметры; наличие контрольно-измерительных приборов, средств автоматики и сигнализации; выполнение санитарных норм при обслуживании установки, её ремонте и демонтаже; состояние площадки для обслуживания; возможность проведения технологического процесса при аварийной остановке фильтра; меры по технике безопасности; капитальные и эксплуатационные затраты. Эффективность очистки газов в тканевых фильтрах достаточно высока, но величина эта часто зависит от многих факторов и может снижаться при браке ткани, плохом прижиме рукавов на патрубках или в гнездах, негерметичности трубных решеток, срыве, износе или вытяжке рукавов. Величина выходной концентрации в значительной мере обусловливается проскоком пыли в периоды, следующие сразу же за регенерацией, и уносом частиц из ткани в результате локальных изменений скоростей газов и чрезмерной деформации ткани. Основным фактором, определяющим площадь фильтровальной ткани в установке, является перепад давления на ткани, а не величина эффективности очистки газа. Максимальные скорости фильтрации для различных типов фильтров в основном определяются свойствами используемой ткани. При более высоких скоростях возрастает перепад давлений, и возникают динамические пробои накапливающихся пылевых слоев, в результате чего происходит проскок пыли на сторону чистого газа. Кроме того, при эксплуатации на повышенных скоростях фильтрации наблюдается снижение срока службы рукавов вследствие деформации тканевой перегородки [46].

При расчете и выборе типа тканевого фильтра учитываются, следующие основные факторы [21]:

– характеристика очищаемых газов на входе в фильтр: объём очищаемых газов в рабочих и нормальных условиях, состав газов и их взрывоопасность, температура и давление,

допустимость подсоса, содержание влаги, температура точки росы с указанием предельных колебаний перечисленных величин;

– характеристика источника выделения пыли: технологические сведения о процессе и применяемом оборудовании, периодичность или непрерывность процесса, места отсоса запыленных газов.

Тканевые фильтры можно применять для улавливания сухой пыли любой концентрации, если имеется возможность регенерации фильтрующего материала (обратной продувкой, встряхиванием или в результате других механических воздействий), а также, если тканевые фильтры обладают термической и химической стойкостью и механической прочностью [47].

Недостатками тканевых фильтров является недостаточная надёжность в работе при высоких температурах и влажности газов, в агрессивной среде, с разрушающей материал морфологией частиц [48].

Развитие техники фильтрации направлено в основном по двум путям: создание способов регенерации для фильтровальных материалов, позволяющих работать при повышенной скорости с сохранением эффективности пылеулавливания, и разработка новых фильтровальных материалов, позволяющих повысить производительность аппаратов по газу и увеличить срок службы фильтровальных элементов.

В фильтровальных тканях применяются следующие виды волокон: естественные волокна животного и растительного происхождения (шерстяные, льняные, хлопчатобумажные, шелковые); искусственные органические (лавсан, нитрон, капрон, хлорин и др.); естественные минеральные (асбест); искусственные неорганические (стеклоткань, металлоткань) [20]. По данным автора [45] ткани из хлопковых волокон выдерживают температуру до 80°С. Льняные ткани находят ограниченное применение для фильтрации. Капроновое волокно характеризуется высокой устойчивостью к истиранию и воздействию знакопеременных нагрузок растяжение - сжатие, обладает хорошей устойчивостью к щелочным средам. В концентрированных кислотах капрон растворяется. Ткани из капрона длительно выдерживают температуру 90°С. Стеклянное волокно отличается высокой термостойкостью, выдерживает значительные разрывные нагрузки. Недостатком всех стеклянных волокон является их низкая стойкость к перегибам и истиранию. Лавсановое волокно эластично, устойчиво к истиранию, слипанию, изгибу. Прочность лавсана в 4 - 5 раз выше прочности шерстяных тканей. Лавсан устойчив к истиранию, хорошо служит в условиях изгиба волокон, поэтому он может применяться в каркасных и бескаркасных фильтрах практически с любым методом регенерации. Лавсановая ткань может применяться для очистки топливных газов, например, в энергетической системе. Лавсановые фильтровальные ткани при длительной эксплуатации выдерживают температуру 130°С [45].

По мере запыления сопротивление ткани увеличивается. Если не принимать никаких мер, оно может возрасти до величины напора, развиваемого вентилятором. Дальнейшее накопление пыли приведет к уменьшению подачи вентилятора. Часть пыли при повышенных перепадах давления может проникнуть в поры между нитями и "забить" ткань, сделав ее непригодной для фильтрования [20]. Во избежание этого явления фильтры через определенное время эксплуатации необходимо регенерировать. Процесс регенерации является неотъемлемой частью технологии фильтрации и разрабатывается в проекте наряду с другими параметрами фильтрации. При выборе способа регенерации имеют значение вид ткани, конструкция аппарата, характеристики пыли и технологического процесса, другие факторы. Способ регенерации является одним из важнейших конструктивных признаков фильтра.

Регенерация фильтровальных элементов сводится к приложению тех или иных нагрузок к запыленному фильтровальному материалу, обеспечивающих в конечном итоге разрушение и отделение пылевого слоя от материала. Механическое приложение нагрузки сочетается, как правило, с непрерывной обратной продувкой [45]. После определенного периода (от нескольких десятков до нескольких сотен часов в зависимости от условий эксплуатации) работы фильтра с чередованием циклов фильтрации и регенерации остаточное количество пыли в ткани стабилизируется и соответствует так называемому равновесному пылесодержанию ткани и остаточному сопротивлению равновесно запыленной ткани [47].

Основной величиной при выборе необходимой поверхности фильтра является газовая нагрузка $q_ф$, или используемое как эквивалентное понятие «скорость фильтрования» $w_ф$, представляющее собой расход запылённого потока на площадь поперечного сечения фильтрующей среды. По мнению авторов [49] в тканевых фильтрах целесообразно использовать небольшие «скорости фильтрации», в пределах 0,5-1,2 см/с. При большей нагрузке происходит чрезмерное уплотнение пылевого слоя, сопровождающееся резким увеличением его сопротивления. При повышенных перепадах давления частицы проникают вглубь слоя и ткани, наблюдается нарушение первоначально сформированного пылевого слоя.

Эффективным методом регенерации фильтровального материала является обратная продувка очищенным газом или напорным воздухом. Обратная продувка может применяться в сочетании с другими способами: механическим встряхиванием, перекручиванием, вибрацией, покачиванием рукавов и др. Такие фильтры довольно эффективны, удобны в эксплуатации и обслуживании. Однако производительность их несколько снижена за счет подсоса воздуха в период регенерации фильтровального материала. Обратная продувка обычно сопровождается плавной деформацией фильтровального материала, которая не действует так отрицательно на волокна как, например, механическое встряхивание [50]. Энергетические затраты и эффективность процесса пылеулавливания непосредственно зависят от сопротивления,

создаваемого фильтрующим слоем, т.е. тканью и слоем пыли, осевшей на ткани в процессе фильтрации (автослоем) [20].

По мнению авторов [21] при подборе фильтров важна оценка ожидаемого гидравлического сопротивления, определяющего энергетические затраты на фильтрование, для чего им предлагается следующее. Гидравлическое сопротивление фильтра складывается из сопротивления корпуса $\Delta P_к$ и сопротивления фильтрующего материала $\Delta P_п$, Па:

$$\Delta P_ф = \Delta P_к + \Delta P_п \tag{1.8}$$

Гидравлическое сопротивление корпуса аппарата [21] определяется величиной местных сопротивлений, возникающих на входе в аппарат и на выходе из него. В закрытом металлическом корпусе фильтра подвешиваются матерчатые рукава цилиндрической формы, которые собраны в секции по 8…12 штук. Секции разделены вертикальными перегородками на отдельные камеры. В общем виде гидравлическое сопротивление может быть оценено коэффициентом сопротивления корпуса аппарата, отнесенным к скорости газа во входном патрубке [21]:

$$\xi_к = \Delta P_к^2 / (v_{вх}^2 \cdot \rho_г), \tag{1.9}$$

где $v_{вх}$- скорость газа во входном патрубке, м/с.

Величина $\xi_к$ при конструировании фильтров обычно принимается равной 1,5…2,0. Гидравлическое сопротивление фильтрующего материала включает потери напора за счет самой вертикальной перегородки ($\Delta P_п'$) и потери за счет осевшей на перегородку пыли ($\Delta P_п''$):

$$\Delta P = \Delta P_п^{I} + \Delta P_п^{II} \tag{1.10}$$

Величину $\Delta P_п'$ (Па) можно вычислять по выражению:

$$\Delta P_п^{I} = K_п \cdot \eta \cdot w_ф, \tag{1.11}$$

где $K_п$- коэффициент, характеризующий сопротивление фильтрующего материала, м$^{-1}$; η – динамический коэффициент вязкости газа, Па·с; $w_ф$ - скорость фильтрования, м/с [21].

Коэффициент $K_п$ зависит от толщины и проницаемости фильтрующего материала, количества пыли, оставшейся на тканевом фильтре после регенерации, свойств пыли. Сопротивление в Па, вызванное осевшей на фильтрующий материал пылью, рассчитывается по уравнению:

$$\Delta P_п^{II} = \eta \cdot \tau \cdot c_{вх} \cdot \omega^2 \cdot K_1, \tag{1.12}$$

где τ- продолжительность фильтровального цикла, с; $c_{вх}$ - концентрация пыли на входе в фильтр, кг/м^3; K_1- параметр сопротивления слоя пыли, м/кг [21].

Величина K_1зависит от свойств пыли и порозности слоя пыли на перегородке. Пользуясь формулой (1.12), можно найти продолжительность фильтровального цикла [21]:

$$\tau = \Delta P_n^{ll} / (\eta \cdot c_{вх} \cdot \omega^2 \cdot K_1) \qquad (1.13)$$

Таким образом, рекомендациями [21] можно воспользоваться только в случае, когда гидравлическое сопротивление слоя пыли известно. В целом параметры фильтрации в пористом слое реальной структуры имеют стохастический характер, а процесс является нестационарным. Надежно оценить степень очистки и оптимальные условия работы действующих фильтров можно только опытным путем. Результаты расчетов по теоретическим моделям корректируются на основе численных исследований.

Параметры прохождения потока при фильтрации через пористую среду в определенной степени зависят от структуры фильтра, характерными параметрами которого при использовании тканых материалов являются расстояния между нитями (элементами), формы их сечения, способы сочетания, расположение относительно потока [37].

Интенсивность перекрытия ячеек и образования автослоя является стохастической величиной. Она зависит от начальной запыленности и параметров выбросов, структуры и состояния ткани, а также от всех свойств пыли: дисперсного состава, слипаемости, морфологии и т.д. Поэтому расчетные способы определения степени очистки или оптимальных параметров работы тканевых фильтров отсутствуют. Взвешенные в потоке частицы, оседая на препятствия, могут удерживаться только за счет взаимодействия молекул, расположенных на их поверхностях. Следовательно, препятствие (волокно, нить) смогло бы удержать (т.е. уловить и удалить из потока) приблизившиеся частицы, если бы межмолекулярные силы могли противостоять действию потока на частицы (рисунок 1.9). Так как действие межмолекулярных сил теоретически считается безграничным, представляет теоретический и практический интерес найти параметры частиц и зоны, в границах которой действие межмолекулярных сил может преодолеть действие отрыва потоком частицы от препятствия.

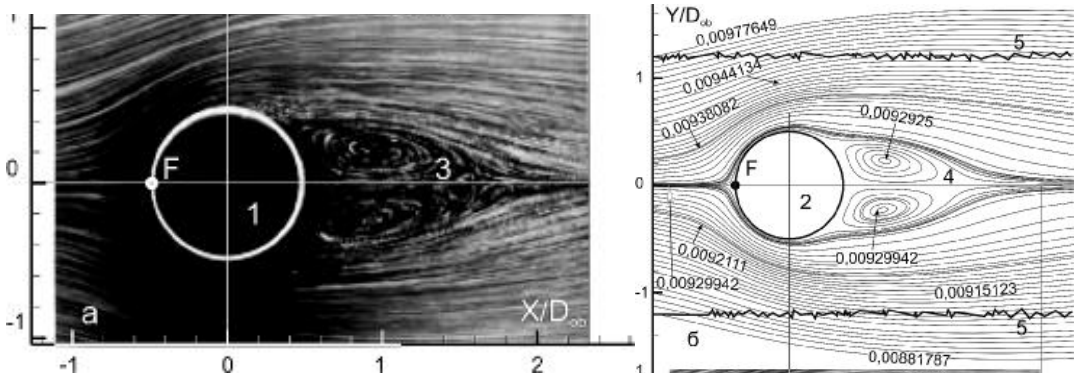


Рисунок 1.9. Обтекание круглого цилиндра в натурном эксперименте по [51] (а) и по результатам численного эксперимента (б): 1, 2 – соответственно, модели препятствия диаметром 0,5 дюйма и 500 мкм; 3, 4 – зоны рециркуляции; 5 – границы зоны трёхкратной адаптации расчётной области в численном эксперименте

1.3.Циклонная фильтрация топливных газов

Для снижения вредного воздействия на окружающую среду при эксплуатации городских энергосистем, а также для усовершенствования очистки топливных газов для энергоисточников городской энергетической системы необходимо применение сепараторов циклонного типа с высокой степенью осаждения мелкодисперсных частиц. Рассмотрение циклонных пылеуловителей и пористых фильтров показывает, что их фильтрационное действие основано на одном и том же физическом явлении. При этом они имеют разнонаправленные преимущества и недостатки: у циклонов это не очень высокая затрата энергии, но возможность очистки пыли только средних и крупных размеров; у фильтров – возможность осаждения мелкой пыли, но высокая затрата энергии. Это указывает на перспективность поиска их сочетания, которое обеспечило бы компенсацию недостатков.

1.3.1. Принцип циклонной фильтрации

При современных требованиях к чистоте атмосферного воздуха одноступенчатая очистка технологического воздуха в большинстве случаев не может обеспечить необходимую степень его очистки при приемлемых энергетических показателях. Современные тенденции совершенствования технологии фильтрования дисперсных сред связаны, в большинстве случаев, с комбинированием двух или нескольких физических принципов. Так, высокая эффективность очистки достигается при сочетании осаждения и механического фильтрования. Одним из технических решений по совершенствованию инфраструктурных газоочистных элементов энергетических систем является многоступенчатая очистка с рациональным подбором пылеуловителей на всех ступенях с учётом физико-химических свойств дисперсной и газовой части выбросов [20]. И с этой точки зрения также представляет практический интерес совмещение механизма улавливания пыли в циклонах с процессом разделения газового потока тканевыми фильтрами, осуществляемое в одном корпусе и реализуемое в аппаратах, получивших название фильтры-циклоны. Объединение в одном аппарате таких положительных качеств циклона, как сравнительно небольшие габариты при больших производительностях по воздуху, простота конструкции и изготовления, небольшие эксплуатационные расходы, надежная работа при температуре до 300-350^{0}С без охладителей, возможность улавливания пыли в сухом виде, улавливание абразивных материалов при защите внутренних поверхностей циклонов специальными покрытиями, высокая производительность, сохранение требуемого уровня фракционной эффективности очистки с ростом массовой концентрации частиц, и положительных качеств тканевых фильтров, таких как высокая эффективность очистки, при правильном подборе должно привести к созданию высокоэффективного устройства с минимальными энергетическими и материальными затратами.

К тому же ограниченность промышленных площадок часто вынуждает искать технические решения по снижению габаритных размеров устройств комплексной очистки, поэтому совмещение в одном устройстве сразу две ступени очистки на сегодняшний день актуально. Кроме того, двухступенчатое улавливание пыли в одном аппарате, облегчает процесс регенерации рукавов при высоких концентрациях пыли.

На основании анализа существующих технических решений для уменьшения отрицательных свойств каждого из этих методов очистки и максимально полного использования их положительных качеств необходимо решение ряда расчётных, численных и экспериментальных задач. На основе этого в данной работе были сформулированы цель и задачи исследования.

1.3.2. Существующие схемы и аппараты, реализующие принципы циклонной фильтрации газового топлива в городских энергетических системах

Известен циклон (рисунок 1.10), содержащий корпус, периферийный ввод газового потока, выполненный в виде входного патрубка, винтообразную крышку, бункер и выходной патрубок для выхода очищенного газа, фильтрующий элемент, установленный вне циклона на общем с ним постаменте, в котором закреплен бункер [52].

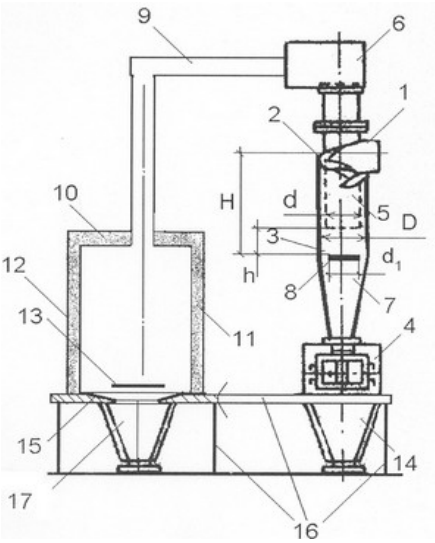


Рисунок 1.10. Циклон Кочетова: 1 – входной патрубок; 2 – винтообразная крышка; 3 – корпус; 4 – бункерный накопитель; 5 – выходной патрубок; 6 – улитка; 7 – коническая часть; 8 – отражающая шайба; 9 – воздуховод; 10 – верхний фланец; 11 – дополнительный фильтрующий элемент; 12 – фильтрпатрон; 13 – отбойная шайба; 14 – бункер; 15 – пластина с коническим отверстием; 16 – опоры; 17 – бункер

Фильтрующий элемент представляет собой фильтрпатрон, выполненный в виде цилиндрического проволочного или стержневого каркаса с верхним глухим и нижним

открытым фланцами, на котором закреплен фильтровальный материал. Однако циклон Кочетова имеет выносной фильтрующий элемент на выходе, который значительно увеличивает габариты и представляет неудобство при размещении очистной системы.

В области циклонной фильтрации также имеется множество конструкций, пока не получивших распространения в топливной инфраструктуре источников тепловой и электрической энергии городской энергетической системы, но защищенных патентами на изобретения и полезные модели. Одним из них является циклон-фильтр для очистки запыленных газов [53]. Циклон-фильтр (рисунок 1.11) содержит корпус с коническим днищем, штуцер для тангенциального ввода запыленного газового потока, вращающуюся выхлопную трубу, которая одновременно выполняет функции фильтра и штуцера для отвода очищенного газа и представляет собой сварную конструкцию, частично изготовленную из пористой металлокерамики, которая обеспечивает дополнительную очистку газа путем его фильтрации через боковую поверхность и нижний торец.

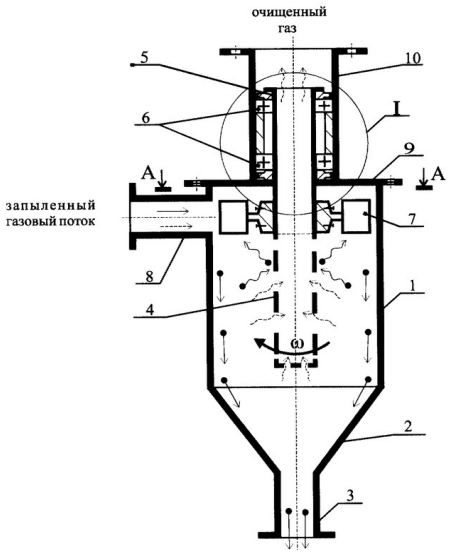


Рисунок 1.11. Общий вид циклон-фильтра: 1 – вертикальный цилиндрический корпус, 2 – коническое днище,3 – штуцер для удаления пыли, вращающуюся 4-выхлопная труба, представляющая собой фильтрующий элемент, изготовленный из пористой металлокерамики, 5 – штуцер для отвода очищенного газа, 6 – подшипниковый узел, 7 – ветровое колесо, 8 – штуцер для подачи в аппарат запыленного газового потока, расположенный тангенциально к корпусу, 9 – крышка, 10 – соединительный штуцер

Авторы [53] также указывают, что вращение обеспечивает непрерывную регенерацию фильтрующей поверхности выхлопной трубы и отмечают достаточно низкое сопротивление установки. Вместе с тем данный циклон-фильтр имеет существенные недостатки, не позволяющие интенсифицировать обработку путем увеличения скорости потока. Высокая эффективность улавливания тонкодисперсных частиц фильтрами из металлокерамических

материалов обуславливается образованием на их жесткой поверхности фильтрующего однородного пылевого слоя, скапливающегося над порами до регенерации. Непрерывная регенерация мешает образованию стабильного фильтрующего однородного пылевого слоя на металлокерамическом материале, и мелкие частицы проскакивают через его очищенные поры на выход установки. Попытка интенсифицировать обработку, увеличив скорость потока, приведет к увеличению скорости вращения выхлопной трубы и более интенсивной очистке металлокерамической поверхности. Следовательно, возрастет проскок мелких частиц через установку. При увеличении скорости потока усугубляется также проблема интенсификации абразивного износа металлической и особенно вращающейся пористой металлокерамической поверхностей циклона [54].

Также существует комбинированный фильтр-сепаратор, представленный на рисунке 1.12 для фильтрования жидкости, имеющий две ступени очистки и предназначенный для применения в составе судовых систем. Первой ступенью является циклонная часть, состоящая из завихрителя с соплом и кольцевого цилиндрического канала, образованного корпусом фильтра и сеткой; второй ступенью – цилиндрический сетчатый фильтроэлемент [55].

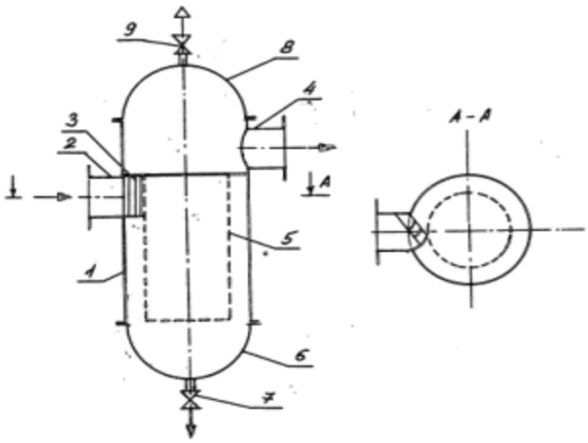


Рисунок 1.12. Схема фильтра-сепаратора: 1 – корпус; 2 – подводящий патрубок; 3 – сопло; 4 – отводящий патрубок; 5 – сетчатый фильтроэлемент; 6 – сборник шлама; 7 – кран отвода шлама; 8 – верхняя крышка; 9 – кран отвода воздуха

При работе данного фильтра-сепаратора большая часть твёрдых загрязнений в вихревом потоке первой ступени оттесняется на периферию и опускается в сборник шлама. Далее жидкость с некоторым количеством неотсепарированных частиц, двигаясь в кольцевом канале и описывая спиральную траекторию, устремляется через отверстия сетчатого фильтроэлемента в его внутреннюю полость. При этом некоторая часть загрязнений задерживается на сетке, обеспечивая вторую стадию очистки. Однако движение жидкости через перфорированный фильтроэлемент при касательном натекании приводит к увеличению сопротивления. Поэтому в

первую очередь необходимо выполнить технико-экономическое обоснование использования циклона-фильтра при газоочистке в топливной инфраструктуре источников тепловой и электрической энергии городской энергетической системы.

На рисунке 1.13 представлено изобретение по патенту [56], которое может быть использовано для очистки производственных выбросов, в том числе загрязненных особо опасными взвесями, а также при необходимости тонкой очистки и обеззараживания вентиляционного воздуха, подаваемого, например, в операционные отделения учреждений здравоохранения. Как считают авторы [56], изобретение решает техническую задачу интенсификации циклонной обработки путем увеличения скорости дисперсного потока с целью повышения степени осаждения тонкодисперсных частиц при условии предотвращения абразивного износа внутренних поверхностей аппарата. Согласно расчётам при переоборудовании серийного циклона ЦН-24 в соответствии с изобретением и увеличении скорости потока с оптимального для этого типа циклона значения 4,5 м/с [43] до 18 м/с диаметр частиц, улавливаемых на 50%, уменьшается с 8,5 мкм до 0,4 мкм, что соответствует максимальному проникающему диаметру частиц через тканые фильтры. Однако, накопление дисперсных частиц на поверхности и в структуре волокнистого фильтра способствует вторичному пылеуносу, либо ограничивает скорость движения неочищенного газа внутри циклона.

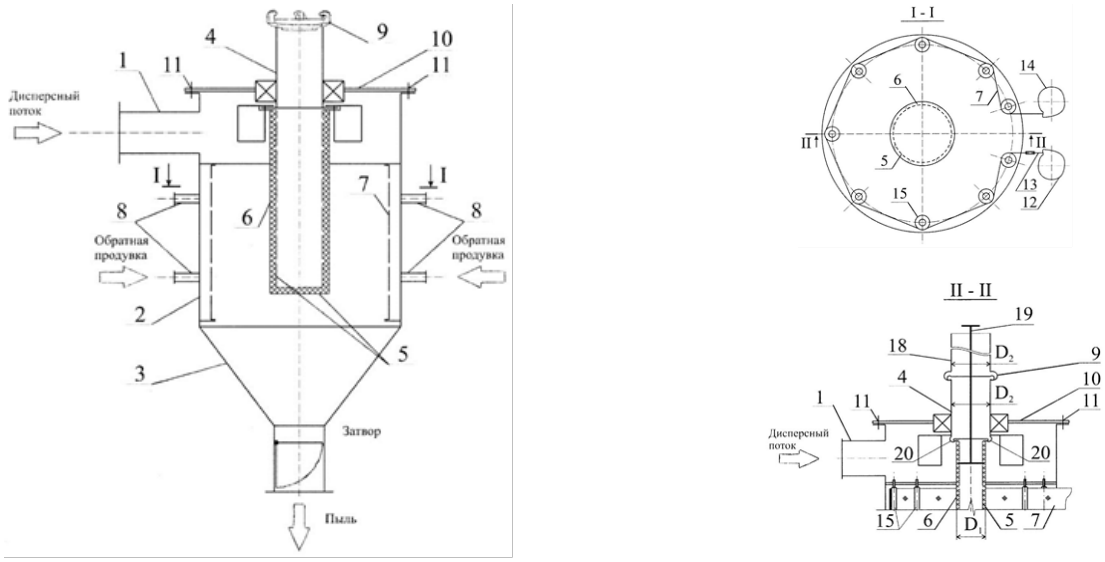
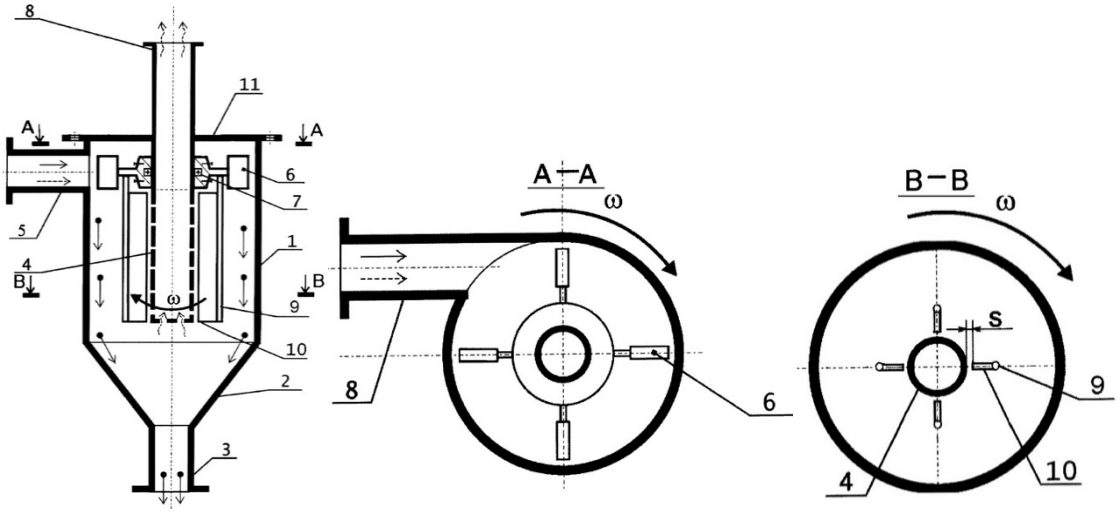


Рисунок 1.13.а) Общий вид циклона-фильтра; б) Поперечный разрез (сечение I-I) и верхняя часть продольного разреза (сечение II-II) циклона-фильтра: 1 – входной патрубок, 2 – корпус, 3 – коническое днище, 4 – штуцер отвода, 5 – цилиндрический каркас, 6 – плотный фильтровальный материал, 7 – тонкая фильтровальная ткань, 8 – продувочные штуцеры, 9 – цапфовый элемент, 10 – верхний торец, 11 – крепежные элементы разъема, 12 – раздаточная кассета, 13 – начало чистой ткани, 14 – приемная кассета, 15 – рольганги, 18 – пенал, 19 – поворотный стержень ключ, 20 – цапфовое соединение

Принцип циклонной фильтрации предложен и авторами [57]. Технико-экономическая эффективность предлагаемого технического решения, по мнению авторов, заключается в следующем: обеспечивается более качественная очистка воздуха от пыли; снижается расход сжатого воздуха на регенерацию фильтрующих рукавов; снижаются энергозатраты. Используется для сухой очистки газов от пыли в различных отраслях народного хозяйства. Недостатком известного устройства является низкая степень очистки газа от волокнистой пыли перед фильтрующим элементом, что приводит к быстрому забиванию последнего, затруднению его регенерации и снижению эффективности очистки газа.

На рисунке 1.14 представлена другая конструкция фильтра-циклона [58] с высокой движущей силой саморегенерации, при проектировании которого была использована модель вращающегося цилиндра. Изобретение относится к технике очистки запыленных газов и может быть использовано в химической, пищевой и металлургической промышленности. Данный фильтр позволяет обеспечить стабильный аэродинамический режим фильтрования и устойчивую непрерывную регенерацию без дополнительных устройств и энергетических затрат. Особенностью фильтра-циклона является использование для вращения лопастей энергии очищаемого пылегазового потока.



а) б) в)

Рисунок 1.14. а) Фильтр-циклон 1 – корпус; 2 – коническое днище; 3 – штуцер для удаления пыли; 4 – фильтрующий элемент; 5 – штуцер запыленного газа; 6 – ветряное колесо; 7 – подшипник; 8 – штуцер для отвода очищенного газа; 9 – соединительные штанги; 10 – лопасти; 11 – крышка; б) крыльчатка ветряного колеса (разрез по А-А), в) схема взаимного расположения фильтровального элемента и лопастей (разрез по В-В)

По мнению авторов [58] предложенный вариант фильтра-циклона обеспечивает: непрерывную регенерацию фильтрующей поверхности выхлопной трубы; повышение

эффективности процесса разделения пылегазовых систем за счет увеличения радиальной составляющей скорости частиц пыли; компактность аппарата в результате использования рабочего объема для центробежной очистки и фильтрования запыленного газа; простоту в изготовлении и надежность в работе. Однако недостатком данного устройства является недостаточная степень очистки топливных газов для энергоисточников городской энергетической системы от частиц тонкодисперсной фазы из-за отсутствия вращения газового потока вблизи стенки корпуса и резкого уменьшения в связи с этим центробежных сил, отбрасывающих эти частицы к стенке для энергоисточников городской энергетической системы.

На рисунке 1.15 авторами [59] предлагается изобретение, которое относится к устройствам для очистки воздуха промышленных предприятий от пыли, в частности к пылеуловителям с зернистым фильтрующим материалом. Техническая задача предлагаемого изобретения, по мнению авторов, это повышение эффективности и энергоемкости работы устройства при очистке газовоздушных смесей, содержащих твердые частицы, за счет снижения гидравлического сопротивления пылегазовоздушной смеси в циклоне и уменьшение времени на формирование зернистого слоя в фильтре в начальном этапе фильтрации [60]. Одним из возможных примеров, такой реализации может быть объединение процесса инерционной очистки грубодисперсных частиц пыли, капельной влаги и тонкой фильтрации в одном моноблоке – циклофильтре. Циклофильтр состоит из одно – четырёхзаходного тангенциального входного патрубка, цилиндрических и конических его частей. Основа циклофильтра – гофрированный регенерируемый фильтр-патрон, расположенный в модифицированном циклоне с двойным корпусом.

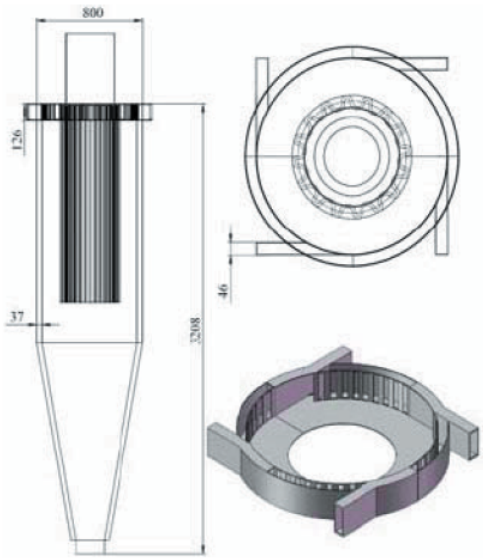


Рисунок 1.15. Общий вид циклофильтра

Циклофильтр работает следующим образом: воздушный поток заходит равномерно через входные патрубки, далее под действием инерционных сил запыленный поток сепарируется, твёрдые частицы через жалюзийный элемент выпадают в изолированный щелевой зазор циклофильтра и выводятся в бункер. Очищенный закрученный поток проходит внутрь циклофильтра и поступает на тонкую очистку в гофрированный фильтр-патрон [61].

Авторы [60] посчитали при помощи математического моделирования CFD, что в циклофильтре (без фильтра тонкой очистки воздуха) диаметр частиц, улавливаемых на 50% равен d_{50}=1,85 мкм. Этот результат сопоставим с аналогичным параметром циклона СКЦН-34, являющимся наиболее эффективным [61]. Авторы считают, что такая эффективность улавливания достигается в циклофильтре при энергозатратах в 3 раза ниже, чем у СКЦН-34, благодаря четырём входам и отводом уловленной пыли в изолированную область циклофильтра. Недостатком указанной конструкции циклофильтра является высокая частота регенерации в связи со значительным повышением гидравлического сопротивления за счёт автослоя, образовавшегося на гофрированном фильтр-патроне, выполненного из бумажного или тканевого фильтровального материала, расположенного параллельно выходному патрубку, повышая пылевую нагрузку на фильтрующий материал. Однако гидравлическое сопротивление как минимум не уменьшится при замене одного входа четырьмя, к тому же снабженными жалюзями. Оно увеличится также при вхождении потока через четырёхзаходный тангенциальный входной патрубок, находящийся под прямым углом относительно корпуса циклона, за счёт резкого изменения направления потока. К сожалению, авторы не приводят сведений о верификации результатов математического моделирования по результатам натурных экспериментов, если таковые были проведены.

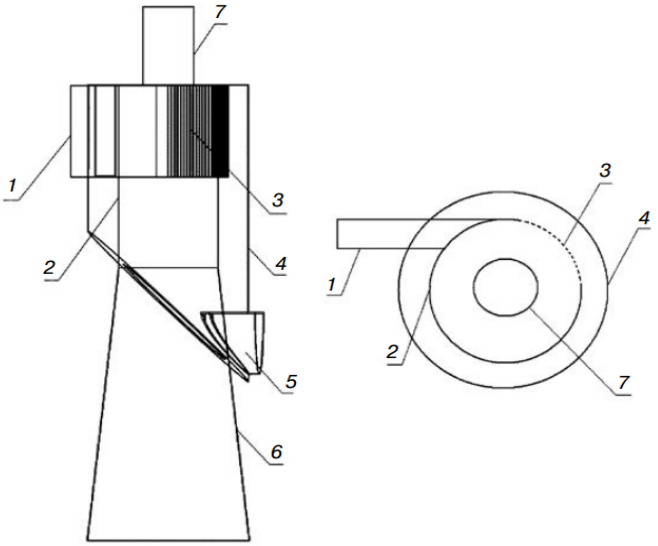


Рисунок 1.16. Общий вид модернизированного пылеуловителя: *1* – входной патрубок; *2* – внутренний корпус; *3* – жалюзийный элемент; *4* – внешний корпус; *5* – наружный бункер-накопитель; *6* – внутренний бункер-накопитель; *7* – выходной патрубок

Авторами [62] разработана конструкция эффективного пылеуловителя - циклофильтра. Конструкция циклофильтра позволяет модернизировать любой тип циклона без существенных капитальных затрат. Пример такой модернизации приведен на рисунке 1.16. Предложенный в данной работе [62] малозатратный метод модернизации циклонных пылеуловителей позволяет в 2-4 раза снизить унос пыли и продлить срок службы аппарата за счет эвакуации концентрированной части потока за входным патрубком в первой трети диаметра циклона в изолированный бункер - пылесборник. В результате проведенных испытаний на цементных предприятиях было установлено, что эффективность улавливания циклофильтром клинкерной и цементной пыли составила менее 90%.

На рисунке 1.17 представлен усовершенствованный прямоточный циклон со второй ступенью инерционной пылеочистки, выполненной в виде жалюзийной решетки с использованием системы активного управления и адаптации технологической системы очистки циклового воздуха к реальным условиям эксплуатации [62].

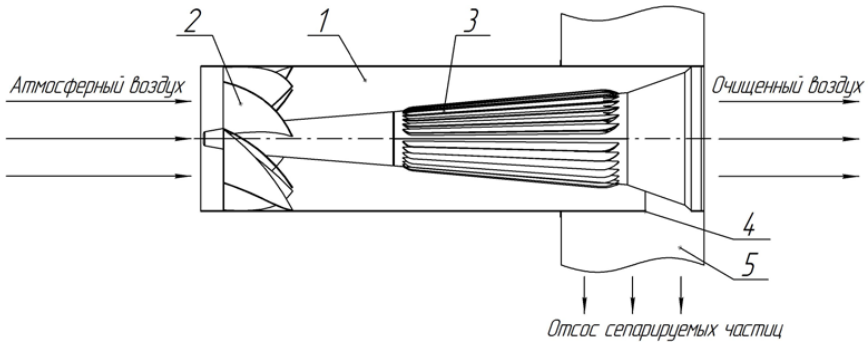


Рисунок 1.17. Схема прямоточного инерционного воздухоочистителя:1 – цилиндрический корпус; 2 – профилированный завихритель; 3 – внутренняя жалюзийная решетка; 4 – окна; 5 – тракт отсоса сепарируемых частиц

Основываясь на работах Ю.А. Кныша и С.В. Лукачева [63], авторам [62] удалось достичь следующих показателей: величина перепада давления на номинальном расходе очищенного воздуха через один циклон 0,5 кг/с составляет 370 Па, а эффективность очистки воздуха от частиц размером от 10 мкм и более – 99%, а в свою очередь, гидравлическое сопротивление возвратно-поточных мультициклонных элементов, установленных в качестве первой ступени очистки на ВОУ «Искра», г. Пермь составила 600 Па, при расходе циклового воздуха 100 кг/с. Однако, если рассматривать среднее давление газа, разница в 200 Па существенной роли не играет, главное достичь высокую эффективность очистки частиц PM_{10} и $PM_{2,5}$ с целью безопасного функционирования энергосистем города.

Проведенный в 1 главе анализ усовершенствований циклонных и фильтрующих пылеуловителей, выполненных рядом отечественных и зарубежных авторов, показал, что существующие решения, направленные на повышение степени очистки, приводят к

повышению энергозатрат, а в решениях, имеющих целью уменьшение энергозатрат, снижается эффективность очистки. Задача нахождения оптимального соотношения степени улавливания и энергетических затрат – актуальное направление модернизации газоочистного оборудования городских энергетических систем, которая может быть успешно решена путём совершенствования установок циклонно-фильтрующего типа.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 1

1. Недостатками существующих циклонных аппаратов является резкое возрастание энергозатрат на обеспечение высокой степени осаждения частиц размером менее 10 мкм.

2. Недостатками очистки воздушных потоков через тканевые фильтры являются необходимость систематической регенерации фильтрующей поверхности, а также высокий расход энергии из-за большого сопротивления осадка и фильтрующей перегородки.

3. Анализ усовершенствований циклонных и фильтрующих пылеуловителей, выполненных рядом отечественных и зарубежных авторов, показал, что существующие решения, направленные на повышение степени очистки, приводят к повышению энергозатрат, а в решениях, имеющих целью уменьшение энергозатрат, снижается эффективность очистки.

Глава 2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЦИКЛОННЫХ СЕПАРАТОРОВ ДЛЯ ОЧИСТКИ ГАЗОВОГО ТОПЛИВА ГОРОДСКИХ ЭНЕРГОИСТОЧНИКОВ

2.1. Движение дисперсного потока и сепарация взвеси в циклонных аппаратах

В последние несколько десятилетий были проведены множество экспериментальных и численных исследований течения запылённого потока в криволинейных каналах, в том числе внутри циклонов [59-74]. Первые модели для выявления методов совершенствования существующих пылеуловителей были построены на эмпирических данных (Shepherd и Lapple,1939; Lapple,1951; Barth,1956; Tengbergen,1965; Sproul, 1970; Leith и Licht,1972; Blachman и Lippmann,1974; Dietz,1981 и Saltzmann,1984). Однако эти модели были построены на основании данных лишь отдельных конструкций циклонов.

В циклонах происходит ряд гидродинамических процессов, таких как реверсирование потока, высокое завихрение, образование циркуляционных зон, нисходящих потоков и др. Проведя многочисленные расчёты авторы [75, 76, 77] сделали вывод, что пространственное распределение частиц в потоке формируются за счет их размера, который влияет на траекторию их движения в циклоне. Это приводит к значительному изменению распределения объемных сил взаимодействия частиц между собой. Полученные результаты полезны для численных расчетов методом дискретных элементов (DEM, Discrete element method), путем использования вычислительной гидродинамики.

Авторы [78] рассмотрели процесс сепарации частиц пыли, как совокупность движения одиночных частиц в потоке, движущихся по окружности в канале с твердой наружной стенкой с радиусом кривизны *R*. При этом взаимодействие частиц, их дробление и слияние не учитывались. Для анализа поведения аэрозольных частиц, авторы рассмотрели поведение одиночной частицы под действием всех сил (рисунок 2.1). Так как плотность частицы ρ_s больше плотности воздуха, частица, попадает в циклон с некой скоростью входящего потока, по инерции стремясь двигаться равномерно и прямолинейно (рисунок 2.1, траектория 1), отклоняется при этом от оси циклона в сторону его внешней стенки (рисунок 2.1, траектория 2). Согласно принятым допущениям, тангенциальная составляющая скорости частицы ν_T равна скорости потока.

Радиальному смещению частицы со скоростью v_R препятствует сила сопротивления среды. Сила сопротивления движению частицы вычисляется по формуле Стокса:

$$F_C = 3\pi\eta\nu_R d, \tag{2.1}$$

где η – динамический коэффициент вязкости газовой среды, ν_R- радиальная составляющая скорости частицы, d - диаметр частицы.

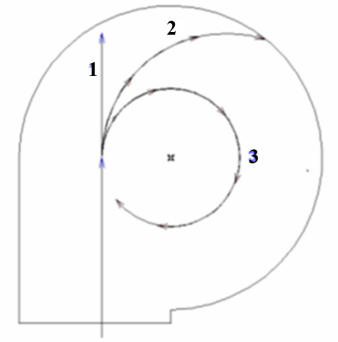


Рисунок 2.1. Траектории движения частиц

В результате частица движется по криволинейной траектории (рисунок 2.1, траектория 2 и 3). Очевидно, что чем меньше масса и чем больше вязкость газа (а, следовательно, и инерция) частицы, тем ближе ее траектория будет к окружности (рисунок 2.1, траектория 3) [78]. Уловленными можно считать частицы, достигшие внешней стенки секции. Из движущихся в потоке частиц наибольшее расстояние в радиальном направлении пройдет частица, которая при входе в циклон находилась вблизи выхлопной трубы, т.е. вблизи внутренней стенки канала (т.к. рассматривается движение частиц по концентрическим каналам). Чтобы такую частицу можно было считать уловленной, ей необходимо пройти расстояние (R_2 – R_1), где R_1 – внутренний радиус цилиндрической поверхности, ограничивающей канал, R_2 – внешний радиус цилиндрической поверхности, ограничивающей канал (рисунок 2.2).

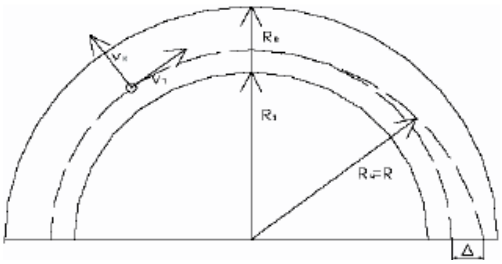


Рисунок 2.2. Движение одиночной частицы по окружности при течении газового потока в концентрическом канале

Радиальное смещение частиц вычисляется по формуле (2.2):

$$\Delta = \frac{\nu_T^2}{18 \cdot R_ц} \cdot \rho \frac{d^2}{\mu} \cdot \frac{\pi \cdot R_ц}{\nu_T} \tag{2.2}$$

Поскольку, согласно принятым допущениям, частицы распределены по всему сечению равномерно, процентное же отношение всех уловленных на конкретном участке частиц, т.е.

частиц достигших наружной ограничивающей поверхности к их общему количеству вычисляется так (2.3):

$$\varepsilon = \frac{\Delta}{R_2 - R_1} \cdot 100\% \tag{2.3}$$

Авторы [78] подставив в формулу 2.3 значение Δ из формулы 2.2 получили:

$$\Delta = \frac{v_T^2 \cdot d^2 \cdot \rho \cdot \pi}{18 \cdot \mu} (R_2 - R_1) \cdot 100\% \tag{2.4}$$

Полученная формула позволяет выявить факторы, от которых зависит эффективность улавливания пыли в циклонных аппаратах. Однако, частицы в потоке могут свободно перемещаться в пределах расчётной зоны в соответствии с силами, приложенными к ним окружающей средой, в том числе сближаться и отталкиваться. Чтобы программа их при этом замечала, возникает необходимость создания очень мелкой сетки, которая охватывала бы близко расположенные частицы. Поэтому, упрощение авторов [78] о равномерном распределении частиц по сечению приведет к грубейшим ошибкам расчёта. Что не позволит определить эффективность улавливания частиц в циклонном аппарате. К тому же формула 2.4 рассчитывает только частицы, прошедшие расстояние ($R_2 - R_1$), так как в ней учитываются два геометрических параметра, R_1 – внутренний радиус цилиндрической поверхности, ограничивающей канал и R_2 – внешний радиус цилиндрической поверхности, ограничивающей канал. В связи с этим необходимо применение такого критерия, который позволял бы нам вычислить фракционный коэффициент очистки примеси в зависимости от параметров потока и одного конструктивного параметра аппарата, определяющего радиус кривизны потока.

Опишем движение взвешенной частицы с массой m_p, кг и скоростью $\vec{w}$, м/с, с помощью закона Ньютона [37]:

$$m_p \frac{d\vec{w}}{d\tau} = \vec{F}, \tag{2.5}$$

где $\vec{F}$ - сила, Н, действующая на движущуюся в потоке частицу; τ - время, с.

Результирующая сила $\vec{F}$ является равнодействующей множества сил, которые могут повлиять на перемещение частицы в потоке. В общем случае, при неравномерном движении, к ним добавятся силы инерции, и силы, характерные для потоков с криволинейной траекторией: сила, возникающая из-за наличия радиального градиента давления, центростремительная сила, сила Магнуса, подъёмная сила, сила Кориолиса. В турбулентном потоке на взвешенные частицы могут оказать воздействие силы, возникающие за счёт энергии турбулентных вихрей [9, 78].

Найдём влияние возможных сил на перемещение частицы во вращающемся потоке при ее движении по круговой линии тока и в момент схода с нее. Сила сопротивления потока:

$$\vec{F}_\zeta = \zeta \rho_G \frac{(\vec{u} - \vec{w})^2}{2} S, \tag{2.6}$$

где ζ – коэффициент местного сопротивления, ρ_G – плотность газа, $\vec{u}$ –скорость потока, м/с, S – площадь частицы в сечении, нормальном сечению потока, или миделево сечение частицы, м^2.

Она направлена навстречу вектору относительной скорости $\vec{w}_r = \vec{u} - \vec{w}$, и будет ускорять частицу, если $\vec{u} > \vec{w}$, или тормозить ее, если $\vec{u} < \vec{w}$. В момент совпадения скоростей частицы и потока как векторов ($\vec{w} = \vec{u}$) силы вязкости перестают оказывать воздействие на частицу, и $\vec{F}_\zeta = 0$. Однако выполнение этого условия не означает, что частица сойдет с линии тока. Она была вовлечена потоком во вращательное движение, приобрела при этом соответствующую энергию, и может продолжать движение по инерции со скоростью, по модулю равной скорости потока (т.е. $\vec{u} - \vec{v} = 0$), но по прямой (т.е. $\vec{u} - \vec{v} \neq 0$). Как только прямолинейная траектория частицы начнет отличаться от круговой траектории молекул газа, т.е. в момент предполагаемого схода частицы с линии тока, $\vec{w}$ перестанет совпадать с $\vec{u}$, и поток вновь окажет воздействие на частицу, которое проявится через вновь возникшие в этот момент силы вязкости. При этом, возможно, силам вязкости удастся воспрепятствовать сходу частицы, и она сможет переместиться далее по линии тока. Если же им не удастся удержать частицы на линии тока, то они сепарируются из потока. Таким образом, процесс сепарации частиц будет определяться соотношением сил вязкости и инерционных сил, возникающих при криволинейном движении частицы.

Сила тяжести $\vec{F}_g = m\vec{g}$, Н, действует на частицу в направлении вектора ускорения $\vec{g}$. Для сферической частицы:

$$\vec{F}_g = \frac{\pi}{6} D_p^3 \rho_p \vec{g}, \tag{2.7}$$

где D_p, ρ_p – диаметр, м, и плотность частиц, кг/м^3.

Сила тяжести ускоряет частицы на нисходящей траектории потока, способствуя их сходу с линий тока, и замедляет на восходящей, противодействуя сепарации. Однако центростремительная сила на криволинейной траектории в типичных для циклонных сепараторов условиях в десятки раз превышает силу тяжести [79], и пренебрежение ею может дать погрешность в пределах 2-3%. Радиальный градиент давления препятствует выходу частицы из потока, и увеличивается от центра к периферии. Различие статических давлений (и, соответственно, плотности потока) по ширине кольцевого сечения может составлять до 30%. Непосредственно же по месту схода частицы с линии тока влияние этого фактора значительно меньше действия центростремительной силы. По порядку величины оно одинаково с влиянием силы тяжести. При этом на нисходящей траектории, в пределах

которой сепарация частиц должна в основном завершаться, направления их действия противоположны. Следовательно, погрешности пренебрежения силами тяжести и давления в определенной мере взаимно компенсируются.

Одна из проблем, которая затрудняет получение аналитической зависимости для определения параметров сепарации частиц в циклонах, заключается в сложности реальной траектории частиц и потока в целом. Поступая в сепаратор, поток закручивается и перемещается по винтовой траектории: опускается вниз по кольцевому каналу, меняет направление движения на противоположное и выходит из центральной трубы. Такое трехмерное движение не поддается удобному математическому объяснению. С учётом механики, движение потока в пределах кольцевого канала можно упростить до вращения в плоскости его поперечного сечения (рисунок 2.3).

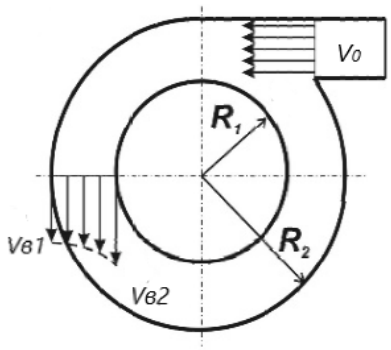


Рисунок 2.3. Схема движения потока в поперечном сечении циклона в верхней его части: V_0 – скорость потока на входе в циклон; $V_{в1}$ и $V_{в2}$ – соответственно скорости на внутренней и внешней границах канала [37]

Радиальное распределение тангенциальных скоростей в двумерной задаче – в поперечном сечении вращающегося потока, описывается уравнением $uR^k = const$. Общепринятая математическая модель вращательного движения с показателем степени k = 0,5 для потока в кольцевом канале (при условии отсутствия центрального стока) [78]:

$$uR^{0,5} = const \tag{2.8}$$

Условие отсутствия в потоке вихрей при уменьшении k от 1 до 0 не нарушается, и движение с показателем степени k = 0,5 также может характеризоваться теоретически как безвихревое. Силы взаимодействия потоков и частиц, возникающие при турбулентном перемешивании, можно не учитывать.

2.2. Применение безразмерного комплекса Re_r для определения эффективности установки фильтра в циклонный сепаратор

Выполнены теоретические расчёты эффективности осаждения взвешенных частиц из потоков городских газотранспортных систем для циклонов-фильтров диаметрами 100 и 200 мм. Расчёты были проведены с использованием безразмерного числового комплекса – относительного числа Рейнольдса Re_r, описывающего движение частицы во вращающемся потоке [54,80]:

$$\frac{V_0(\rho_p - \rho_G)^2 D_p^4}{\rho_G R_2^3 \eta} = \mathrm{Re}_r, \tag{2.9}$$

где V_0 – входная скорость, м/с; ρ_p, ρ_G – плотности частиц и газа, кг/м^3; D_p – диаметр частиц, м; R_2 – радиус криволинейного движения сферической частицы, м; η – динамический коэффициент вязкости, Па·с.

Все результаты теоретических расчётов по определению эффективности инерционного осаждения опытного циклона диаметром 200 мм приведены в приложении *Г*.

Числовые значения Re_r характеризуют в обобщенном виде энергию, требуемую для выхода взвешенной частицы с конкретными инерционными параметрами из вращающегося потока, создаваемого циклоном с данными конструктивными характеристиками, и позволяют таким образом находить фракционную степень инерционной сепарации частиц из криволинейных потоков при существующих или/и допустимых энергозатратах [81].

При расчете эффективности очистки в циклонном сепараторе многокомпонентного гетерогенного потока с учетом его реальной траектории используется ряд общепринятых упрощений: не учитываются взаимодействия взвешенных в потоке частиц между собой, влияние броуновского движения молекул на частицы, фазовые превращения частиц в потоке, различия размеров и форм частиц, влияние частиц на объем и плотность потока. Возможно также решение уравнения движения через критерии подобия, откорректированные эмпирическими коэффициентами. Однако найти аналитически реальные параметры этой траектории проблематично. Возможность получения надежных опытных данных по требуемым характеристикам (средний радиус и центр кривизны, тангенциальная и радиальная скорость частицы на ней, длина пробега и т.д.) такого специфичного вида перемещения частиц также вызывает сомнения. Однако при рассмотрении задачи об осаждении частиц в серийных циклонных сепараторах можно избежать отмеченных затруднений.

Основные параметры осаждения используемых на практике циклонов – диаметр отсекания D_{50} и дисперсия размеров улавливаемых частиц σ_η, являются весьма надежными опытными характеристиками, установленными посредством строгих испытаний по

стандартным методикам на заводах – изготовителях. Таким образом, можно получить искомый обобщенный (безразмерный) параметр осаждения посредством сопоставления энергетических характеристик потока и частицы в виде функции Лагранжа или в виде действия как произведения энергии на характерное время. Соответственно, в качестве наиболее существенных факторов, влияющих на эффективность отделения взвеси, являются скорость и существенно влияющие на вязкость физические параметры потока, а также скорость, радиус кривизны траектории и инерционные свойства частиц, которые в криволинейном движении характеризуются не столько массой, сколько моментом инерции. Параметр Re_r позволяет определять режим инерционной сепарации из потоков с криволинейными линиями тока.

Соответствие числа Re_r степеням осаждения в сепараторах циклонного типа протестировано [54] по аппаратам с достоверно известными характеристиками степени очистки выбросов. Так, для одного из наиболее распространенных типов циклонов – ЦН-11, с табличными значениями всех конструктивных параметров, известны следующие характеристики степени осаждения частиц [44]: D_{50} = 3,65·10^{-6} м, логарифм дисперсии размеров улавливаемых частиц $\lg\sigma_\eta$ = 0,352.

Диаметр частиц, осаждаемых с эффективностью 50%, при рабочих условиях определяли по формуле (2.10):

$$D_{50} = D_{50r}\sqrt{\left(\frac{D}{D_r}\right)\left(\frac{\rho_{pr}}{\rho_p}\right)\left(\frac{\eta}{\eta_r}\right)\left(\frac{w_r}{w}\right)} = 1{,}956 \text{ мкм}, \qquad (2.10)$$

где D_{50r}=3,65·10^{-6} м, D_r=600 мм, ρ_{pr}=1930 кг/м^3, η_r=22,2·10^{-6} Па·с, w_r=3,5 м/с – соответственно средний диаметр, осаждаемых в циклоне частиц, диаметр циклона, плотность частиц, динамический коэффициент вязкости и скорость газового потока, принятые по справочным данным; D_{50}, D=200 мм, ρ_p=1410 кг/м^3, η=18,2·10^{-6} Па·с, w=2,27 м/с – то же, в рабочих условиях для самого продолжительного опыта [14]. Диаметр частиц, улавливаемых на 99,18%, в соответствии с формулой (2.11), составляет: $D_{99,18}$=29,30 мкм.

$$x = \frac{\lg(D_m / D_{50})}{\sqrt{\lg^2\sigma_\eta + \lg^2\sigma_p}} \qquad (2.11)$$

Значения относительного числа Рейнольдса Re_r для частиц с размером, соответствующим 50%-ной (D_{50}, м) и 99%-ной (D_{99}, м) очистке в циклонах ЦН-11, ЦН-15, ЦН-15у, ЦН-24 приведены на графике (рисунок 2.4).

Численные значения параметра Re_r позволяют определить эффективность отделения взвешенной части, а также вычислить фракционную степень инерционной сепарации частиц из потока при существующих энергозатратах.

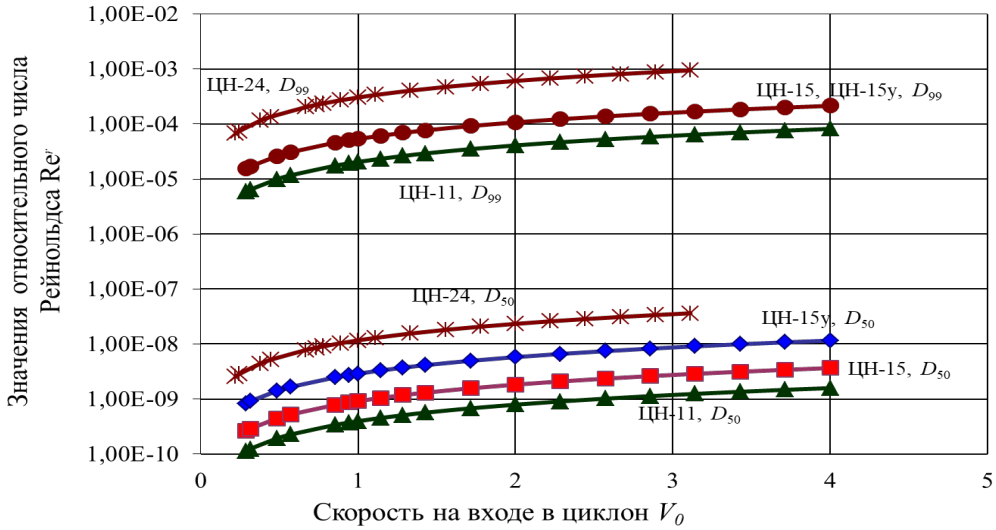


Рисунок 2.4. Зависимость относительного числа Рейнольдса Re_r от скорости потока на входе в циклон V_0, м/с для частиц с размером D_p, м соответствующим 50%-ной (D_{50}, м) и 99%-ной (D_{99}, м) очистке в циклонах ЦН-11, ЦН-15, ЦН-15у, ЦН-24

2.3. Результаты расчетов относительного числа Рейнольдса Re_r для определения фракционных коэффициентов при очистке газового топлива городских энергоисточников

Проведены теоретические расчёты параметра Re_r с целью определения фракционных коэффициентов осаждения примеси для экспериментальной установки – циклонно-фильтрующего аппарата диаметром 100мм. На рисунке 2.5 приведен поперечный разрез циклона, и обозначены предполагаемые места установки фильтра, например, на расстоянии R= 32,5 мм, R= 40,0 мм, R= 50,0 мм. Необходимо определить наиболее эффективное расположение фильтра с помощью параметра Re_r.

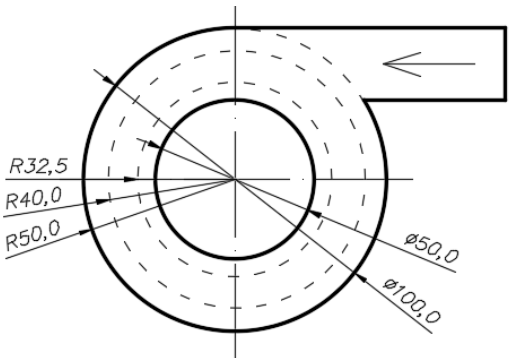


Рисунок 2.5. Циклон-фильтр с указанием радиуса, предполагаемого место установки фильтра (вид сверху)

Результаты расчетов относительного числа Рейнольдса по (2.9) Re_r для размеров частиц D_p= (1…100) 10^{-6} м при скорости потока на входе в опытный циклон V_0 =1,0…14,0 м/с при разных радиусах представлены на рисунках 2.6-2.11.

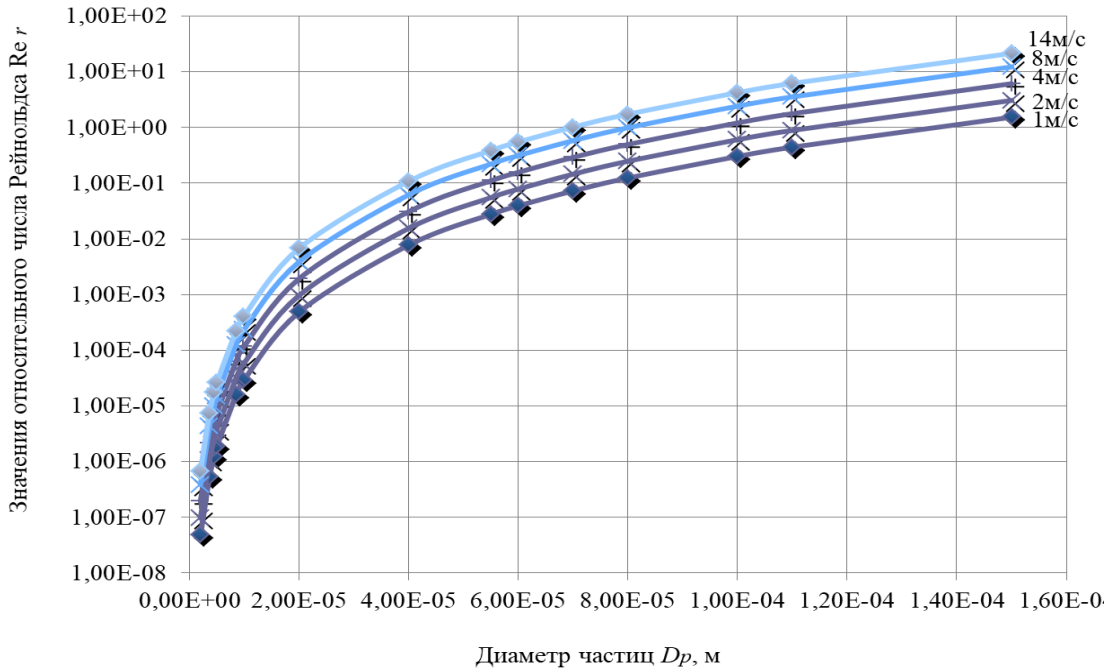


Рисунок 2.6. Зависимость относительного числа Рейнольдса Re_r для циклона диаметром 100 мм от D_p, м, при установке фильтра на расстоянии от оси циклона R=0,0325м

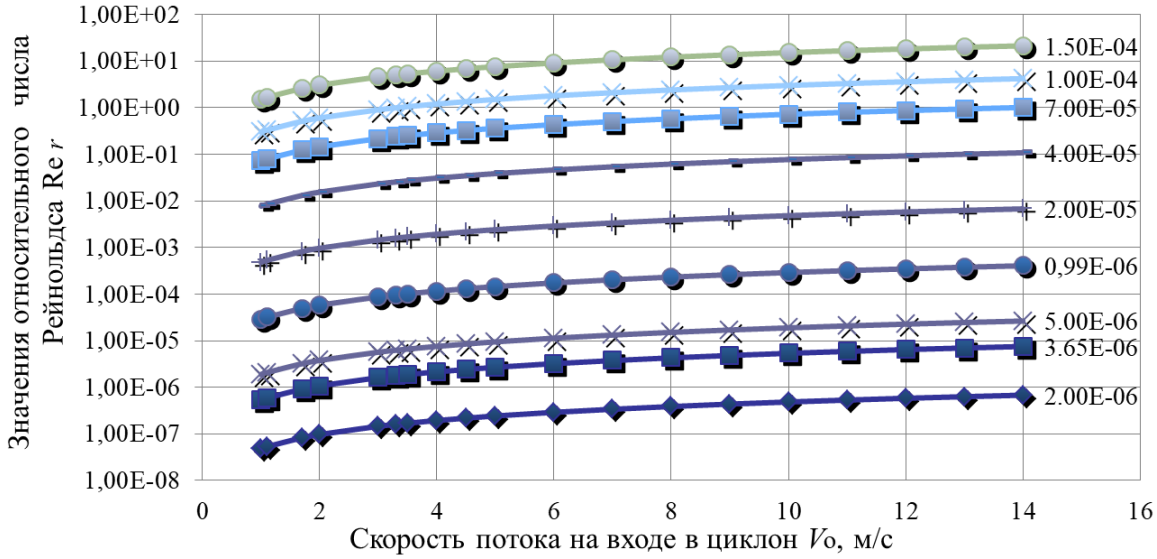


Рисунок 2.7. Зависимость относительного числа Рейнольдса Re_r для циклона диаметром 100 мм от V_0, м/с, при установке фильтра на расстоянии от оси циклона R=0,0325м

Результаты вычислений относительного числа Рейнольдса Re_r, соответствующих сепарации частиц из потока, вращающегося в кольцевом сечении модели циклона при установке фильтра на расстоянии R=0,0325м при скорости потока на входе 3,5 м/с частицы, осаждаемые на 50% диаметром D_{50}=1,27·10^{-6}м соответствуют числа Re_r =2,24·10^{-8}, при

скорости 10м/с D_{50}=0,75·10^{-6}м Re$_r$ =0,78·10^{-8}, при скорости 14м/с D_{50}=0,64·10^{-6}м Re$_r$ =0,58·10^{-8}. Частицам, осаждаемым на 99% при скорости потока на входе 3,5м/с соответствует диаметр D_{99}=19,03·10^{-6}м числа Re$_r$ =11,3·10^{-4}, при скорости 10м/с D_{99}=11,26·10^{-6}м Re$_r$=3,96·10^{-4}, при скорости 15м/с D_{99}=9,52·10^{-6}м Re$_r$=2,83·10^{-4}.

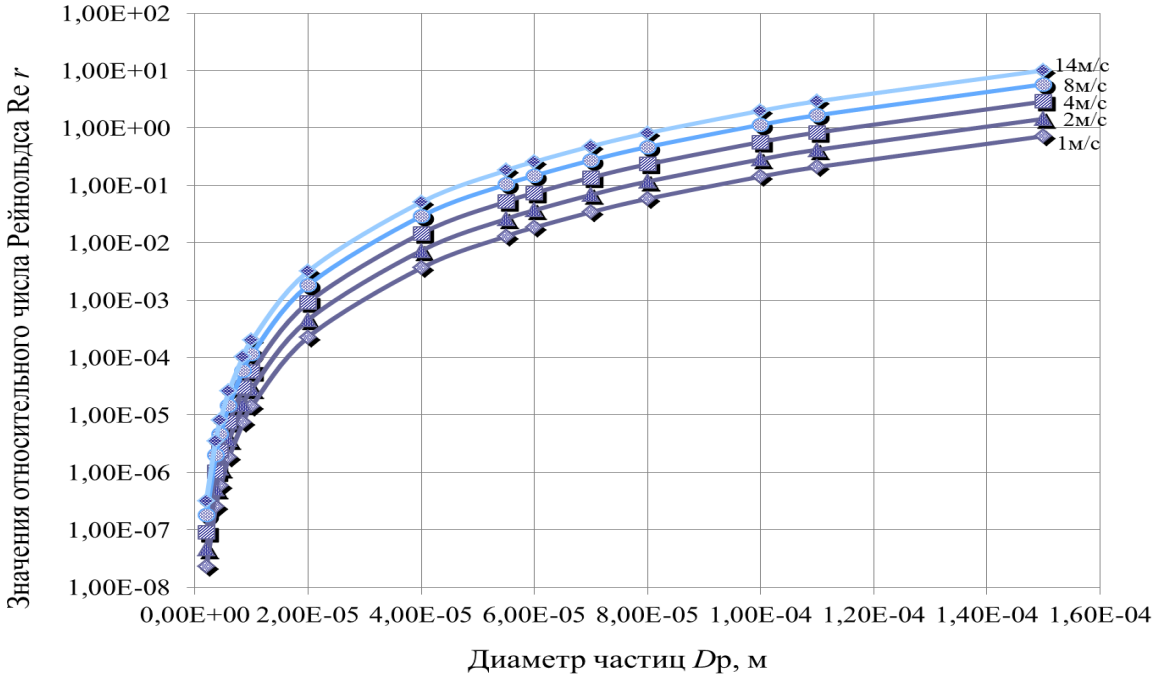


Рисунок 2.8. Зависимость относительного числа Рейнольдса Re$_r$ для циклона диаметром 100 мм от D_p, м, при установке фильтра на расстоянии от оси циклона R=0,04м

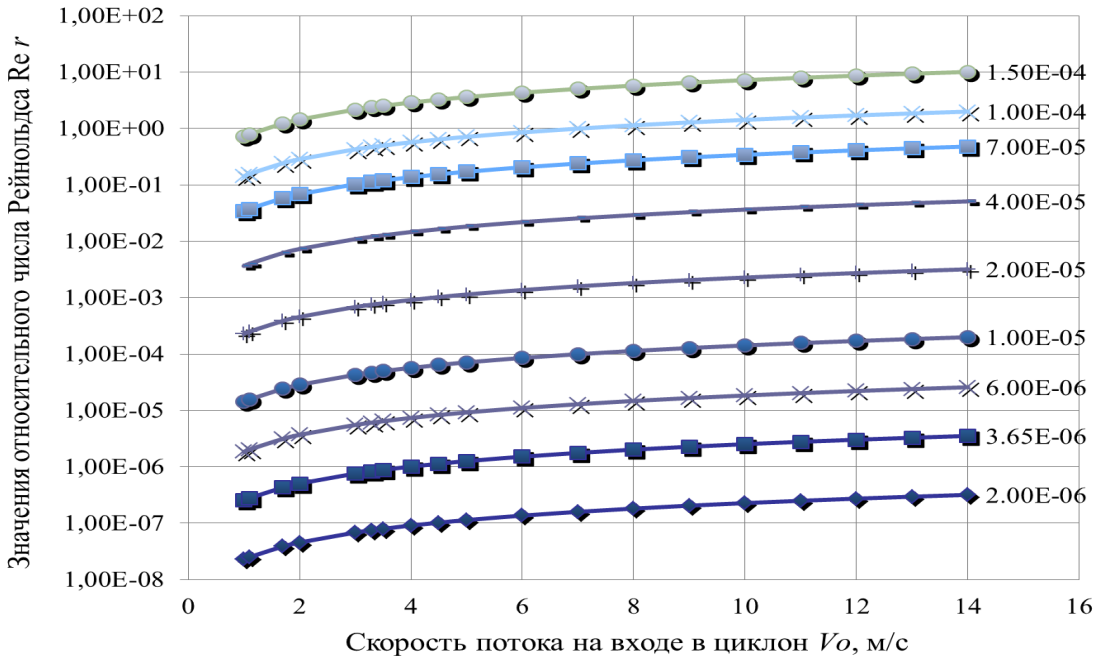


Рисунок 2.9. Зависимость относительного числа Рейнольдса Re$_r$ для циклона диаметром 100 мм от V_0, м/с, при установке фильтра на расстоянии от оси циклона R=0,04м

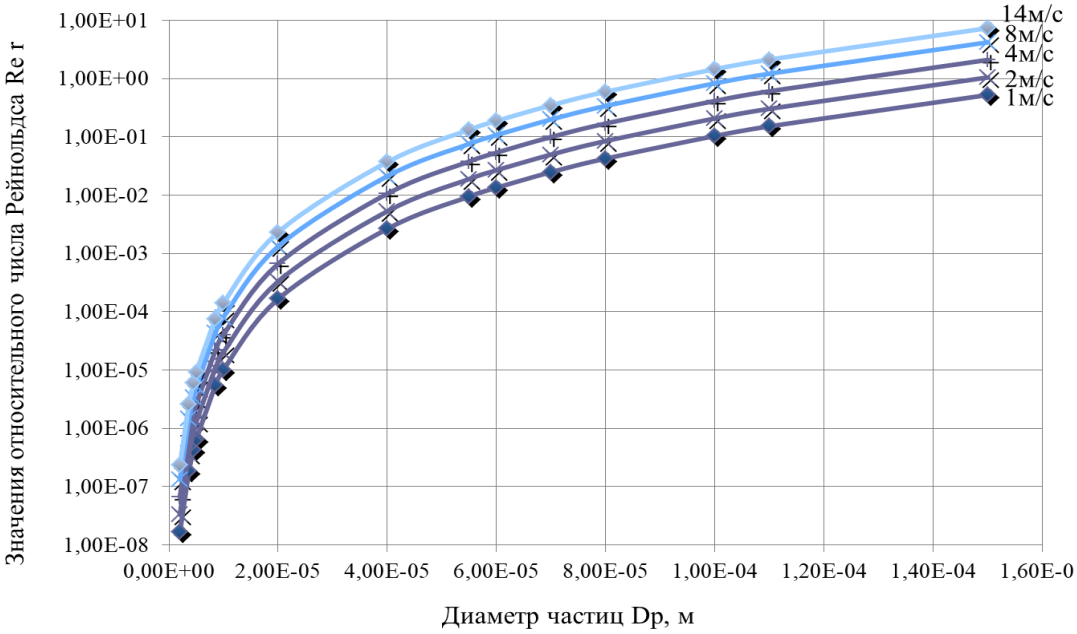


Рисунок 2.10. Зависимость относительного числа Рейнольдса Re_r для циклона диаметром 100 мм от D_p, м, при установке фильтра на расстоянии от оси циклона R=0,05м

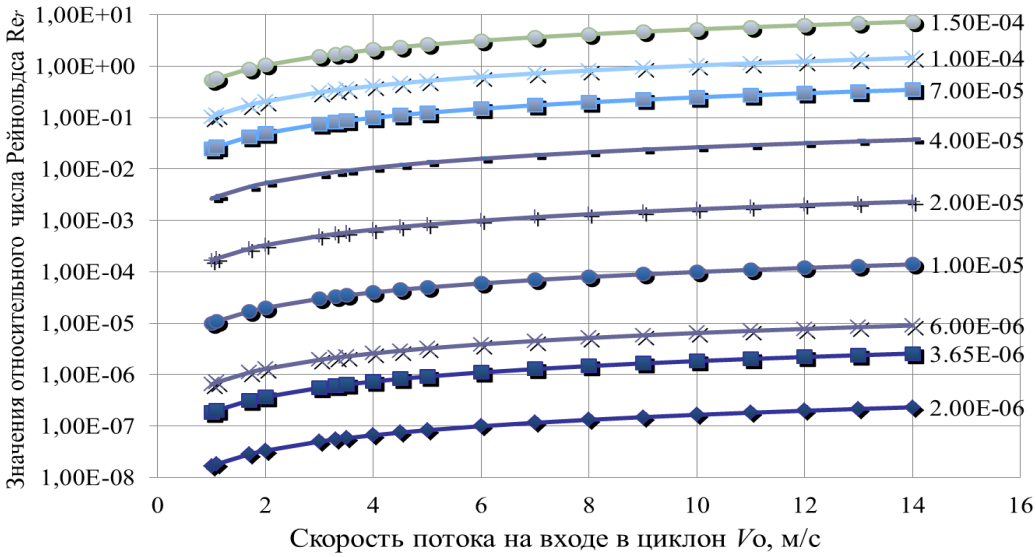


Рисунок 2.11. Зависимость относительного числа Рейнольдса Re_r для циклона диаметром 100 мм от V_0, м/с, при установке фильтра на расстоянии от оси циклона R=0,05м

Результаты вычислений относительного числа Рейнольдса Re_r, соответствующих сепарации частиц из потока, вращающегося в кольцевом сечении модели циклона при установке фильтра на расстоянии R=0,05 м при скорости потока на входе 3,5 м/с частицы, осаждаемые на 50% диаметром D_{50}=1,57·10^{-6} м соответствуют числа Re_r =1,44·10^{-8}, при скорости 10 м/с D_{50}=0,93·10^{-6} м Re_r =0,51·10^{-8}, при скорости 14 м/с D_{50}=0,79·10^{-6} м Re_r =0,37·10^{-8}. Частицам, осаждаемым на 99% при скорости потока на входе 3,5 м/с соответствуют диаметр D_{99}=23,58·10^{-6} м числа Re_r =7,31·10^{-4} , при скорости 10 м/с D_{99}=13,95·10^{-6} м Re_r=2,56·10^{-4}, при скорости 14 м/с D_{99}=11,79·10^{-6} м Re_r=1,83·10^{-4}.

Результаты вычислений относительного числа Рейнольдса Re_r, соответствующих сепарации частиц из потока, вращающегося в кольцевом сечении опытной модели циклона диаметром 100 мм, при скорости потока на входе V_0 = (3,5…14) м/с и при установке фильтра на расстоянии от оси циклона R=0,0325, 0,04 и 0,05 м приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1.

Эффективность осаждения пыли в зависимости от расположения фильтра при разных скоростях

V_0, м/с	3,5	4	5	6	7	8	9	10	14
R=0,0325 м									
D_{50},мкм	1,27	1,19	1,06	0,97	0,90	0,84	0,79	0,75	0,64
Re_{50},10^{-8}	2,24	1,97	1,55	1,31	1,13	0,98	0,86	0,78	0,58
D_{99},мкм	19,03	17,80	15,92	14,53	13,46	12,59	11,87	11,26	9,52
Re_{99},10^{-4}	11,30	9,88	7,90	6,58	5,65	4,95	4,40	3,96	2,83
R=0,041 м									
D_{50},мкм	1,43	1,34	1,20	1,09	1,01	0,95	0,89	0,85	0,72
Re_{50},10^{-8}	1,93	1,7	1,37	1,12	0,96	0,86	0,74	0,69	0,49
D_{99},мкм	21,46	20,07	17,95	16,39	15,17	14,19	13,38	12,69	10,73
Re_{99},10^{-4}	9,8	8,57	6,85	5,72	4,89	4,28	3,81	3,24	2,45
R=0,05 м									
D_{50},мкм	1,57	1,47	1,32	1,20	1,11	1,04	0,98	0,93	0,79
Re_{50},10^{-8}	1,44	1,26	1,03	0,84	0,72	0,63	0,56	0,51	0,37
D_{99},мкм	23,58	22,06	19,73	18,01	16,67	15,60	14,71	13,95	11,79
Re_{99},10^{-4}	7,31	6,40	5,12	4,27	3,65	3,20	2,85	2,56	1,83

Результаты расчетов относительного числа Рейнольдса Re_r для размеров частиц, осаждающихся в циклоне на 50% и 99% ($D_{50}\cdot10^{-6}$ м и $D_{99}\cdot10^{-6}$ м), представлены на рисунке 2.12 и 2.13.

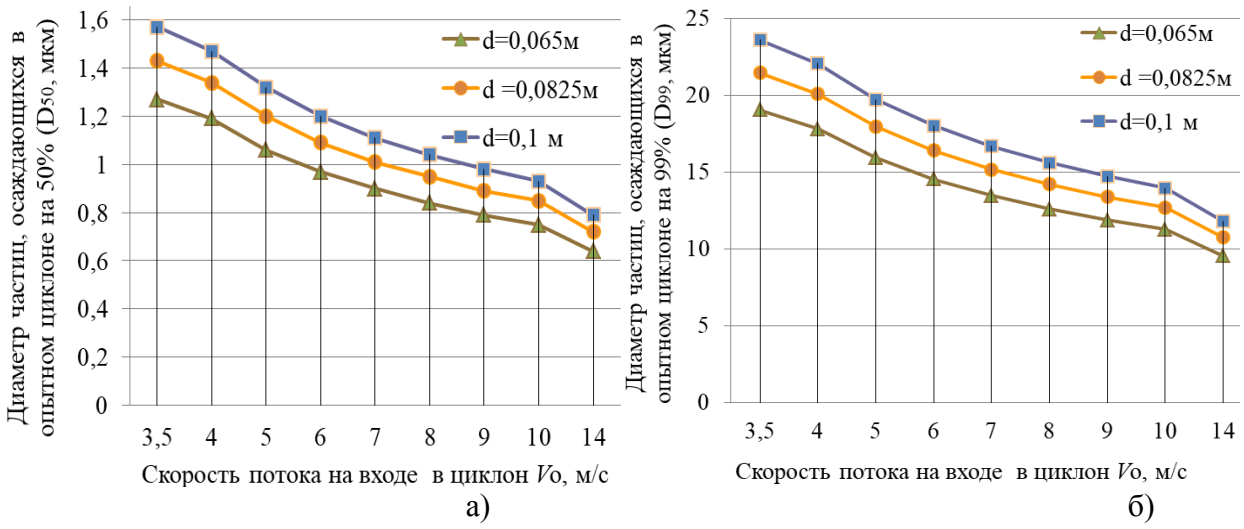


Рисунок 2.12. Зависимость диаметра частиц, осаждающихся в опытном циклоне D_p, мкм от скорости потока на входе в циклон V_0, м/с: а) на 50% (D_{50}, мкм) и б) 99% (D_{99}, мкм)

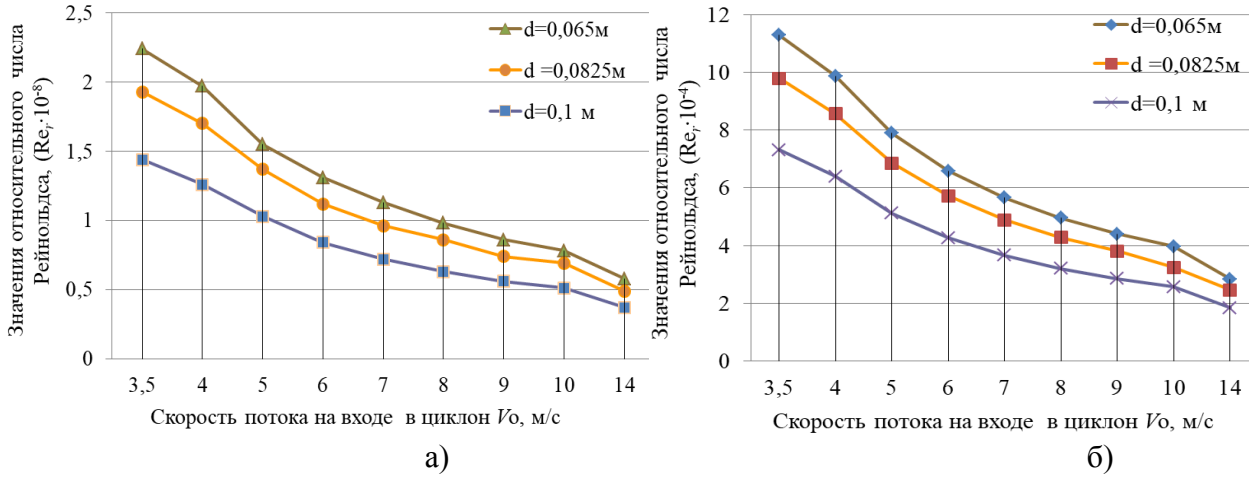


Рисунок 2.13. Зависимость относительного числа Рейнольдса Re_r от скорости потока на входе в циклон V_0, м/с, при: а) 50%-ной ($Re_r \cdot 10^{-8}$), б) 99%-ной ($Re_r \cdot 10^{-4}$) очистке в циклоне

По результатам проведенных расчётов можно сделать вывод, что наиболее оптимальным из трёх радиусов R= 0,0325 мм, R= 0,04 мм, R= 0,05 мм является расположение фильтра на расстоянии от оси циклона R=0,0325 м при скорости потока 14 м/с, при этом D_{50}=0,64 мкм, D_{99}=9,52 мкм. Это максимальный радиус (R=0,0325м), при котором достигается эффективность соответствующая эффективности обычных фильтров D_{50} меньше 1 мкм. При этом Re_r= 2,83·10^{-4}, это число, значение которого как критериальное позволяет определить степень осаждения взвеси: если расчётные значения Re_r окажутся меньше, то частица проскочит дальше по кольцевой траектории, а если значения Re_r будут больше, то частица сойдет с траектории потока и ударится в стенку, т.е. будет уловлена.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2

1. Числовые значения Re_r характеризуют в обобщенном виде энергию, требуемую для выхода взвешенной частицы с конкретными инерционными параметрами из вращающегося потока, создаваемого циклоном с данными конструктивными характеристиками.

2. Значения Re_r позволяют находить фракционную степень инерционной сепарации частиц из криволинейных потоков при существующих или/и допустимых энергозатратах.

3. Результаты теоретических расчетов показали, что эффективность осаждения частиц одного размера растет при уменьшении радиуса, по которому устанавливается фильтр.

4. Проведённые теоретические исследования показали, что при установке фильтра радиусом 0,0325 м в циклоне диметром 100 мм степень осаждения 99% для частиц класса PM_{10} достигается при Re_r = 3,11·10^{-4}.

5. Результаты теоретических расчётов показывают, что параметр Re_r позволяет находить оценочные значения степени осаждения частиц для циклона-фильтра расчётным путём.

Глава 3 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЦИКЛОННЫХ СЕПАРАТОРАХ С ЦЕЛЬЮ УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ОЧИСТКИ ГАЗОВОГО ТОПЛИВА ГОРОДСКИХ ЭНЕРГОИСТОЧНИКОВ

3.1. Обзор используемых методов численных исследований

Математическое моделирование течения газовоздушного потока через циклон необходимо в данной работе прежде всего для нахождения радиальной составляющей скорости, которую затруднительно измерить опытным путём. Вычислительная гидрогазодинамика (Computational Fluid Dynamics, CFD) обеспечивает численное исследование движения криволинейных потоков и учета влияния на него конструктивных особенностей и условий эксплуатации устройств.

При численных исследованиях дисперсного потока в циклоне, возникает ряд проблем, связанных со сложностью процесса циклонной фильтрации [82,83]. Для приближения математической модели явления к реально наблюдаемому в эксперименте необходимо включать в рассмотрение побочные явления и их общее взаимодействие [84], а при натурном эксперименте не все явления поддаются непосредственному наблюдению. В результате численных исследований определяется распределение давлений и скоростей течения газового потока через циклон. Расчетное значение гидравлического сопротивления опытного циклона хорошо согласуется с паспортными данными пылеуловителя.

Поток в циклонных сепараторах характеризуется неустойчивостью, высокой турбулентностью, сильной циркуляцией. Успешное моделирование требует надлежащего разрешения этих функций потока. Для таких потоков следовало бы использовать такие методы, как крупных вихрей (LES, Large Eddy Simulation) или прямого численного моделирования (DNS, Direct Numerical Simulation). Однако эти методы требуют большого объема вычислений, и нереализуемы для многих промышленных применений. Благодаря технологии параллельных вычислений использование методов вычислительной гидрогазодинамики (CFD) для предсказания характеристик потока внутри циклона значительно расширилось.

Движение потока в циклонных сепараторах происходит по сложной трёхмерной спиральной траектории и без упрощений не поддаётся математическому описанию. Не учитываются взаимодействия взвешенных в потоке частиц между собой, влияние броуновского движения молекул на частицы, фазовые превращения частиц в потоке, различия размеров и форм частиц, влияние частиц на объём и плотность потока.

В [82] приведены результаты разработки математических моделей течения жидкости в фильтре-сепараторе (ФС), на базе дифференциальных уравнений количества движения и

неразрывности с привлечением, в качестве замыкающей, модели турбулентности Ментера путём объединения моделей k-ε и k-ω, основанной на том, что модели типа k-ε лучше описывают свойства свободных сдвиговых течений, в модели k-ω имеют преимущество при моделировании пристеночных течений.

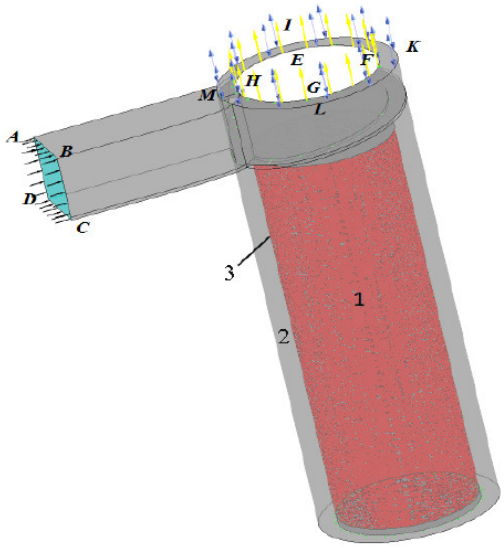


Рисунок 3.1. Схема расчётной области течения: ABCDMH – входной участок от сечения с заданными параметрами течения до выхода из сопла; MH- сопло; 1- восходящий участок в цилиндрическом канале; 2- участок вихревого течения жидкости в кольцевом канале (циклоне); 3- участок течения через пористую поверхность (сетку); HEFG- участок выхода жидкости

Задача решена в трёхмерной постановке, сеточная модель задачи построена на базе сеточного генератора Ansys ICEM CFD, количество узлов в сетке при решении задачи составляло около 1000000. В результате получены два новых эффекта: возможность задержания дисперсных частиц с размерами, меньшими отверстия сетки фильтроэлемента и динамическая самоочистка фильтрующей поверхности. В соответствии с полученной схемой авторами разработаны математические модели объекта исследования, состоящие из трёхмерной твердотельной модели, сеточной модели расчетной области, модели течения вязкой жидкости (рисунок 3.1).

На рисунке 3.2 показана некоторая часть линий тока. В сепарирующей части линии тока - плавные спирали. По мнению авторов [55] это говорит об относительно низкой турбулизации течения в данной области и наличии условий для стабильного перемещения плотных дисперсных частиц в наружную пристенную область кольцевого канала. После прохода через фильтроэлемент линии тока теряют устойчивость, движение потока в большей степени становится хаотичным. Авторами выявлены главные направления совершенствования ФС с целью достижения максимальной эффективности фильтрования: обеспечение ускорения потока

на входе в кольцевую циклонную часть; установка цилиндрического фильтроэлемента вертикально и соосно корпусу; формирование нисходящего вращающегося потока в циклонной проточной части; организация в нижней части ФС камеры сбора загрязнений; создание условий вращения потока с центростремительным ускорением в пределах (100…300) м/с^2; создание условий течения перед сеткой фильтроэлемента с углом натекания (1…6); с целью снижения интенсивности вихреобразования на входе в циклонную часть за соплом целесообразна установка направляющего шнека.

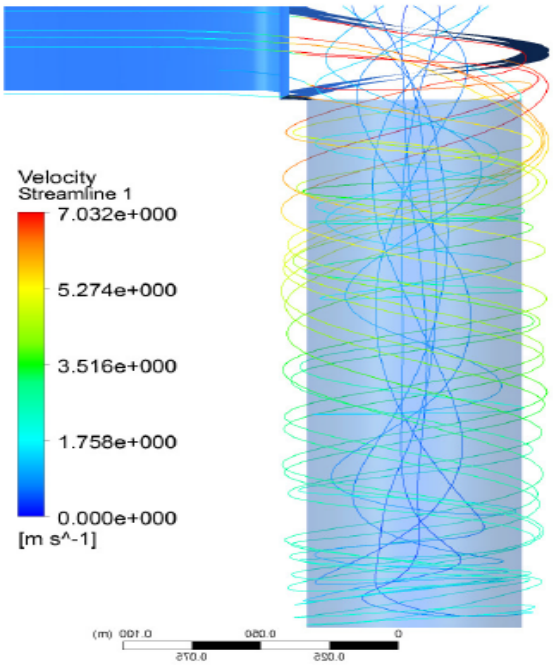


Рисунок 3.2 Линии тока в проточной части сепаратора

Авторами [43] проведены исследования режимов течения в модельном циклоне, приведенном на рисунке 1.7 главы 1.1.2, имеющем рельефные поверхности, создающие отрывные зоны, и в циклоне традиционного исполнения типа НИИОГАЗ с соблюдением масштабных областей. Для расчета использовался программный комплекс σFlow. В качестве граничных условий на входе задавался расход воздуха, на выходе – условия Неймана, т.е. в дифференциальных уравнениях краевая задача с заданными граничными условиями для производной искомой функции на границе области - так называемые граничные условия второго рода. Внутренняя задача Неймана ставится следующим образом: в области Ω найти функцию $u \in C^2(\Omega) \bigcap C^1(\bar{\Omega})$, удовлетворяющую следующим условиям:

$\Delta u = 0$ в области Ω

$$\left.\frac{\partial u}{\partial n}\right|_{\partial\Omega} = u_1(x), u_1 \in C(\partial\Omega), \tag{3.3}$$

где Δ - оператор Лапласа, n - внешняя единичная нормаль к границе области Ω.

Численный анализ течения газа внутри циклонного аппарата выполнен на основе решения широко известных уравнений Навье-Стокса, замкнутых с помощью модели турбулентности *k*-ε. Численный расчет модулей скорости в продольном и поперечном сечении приведен на рисунке 3.3.

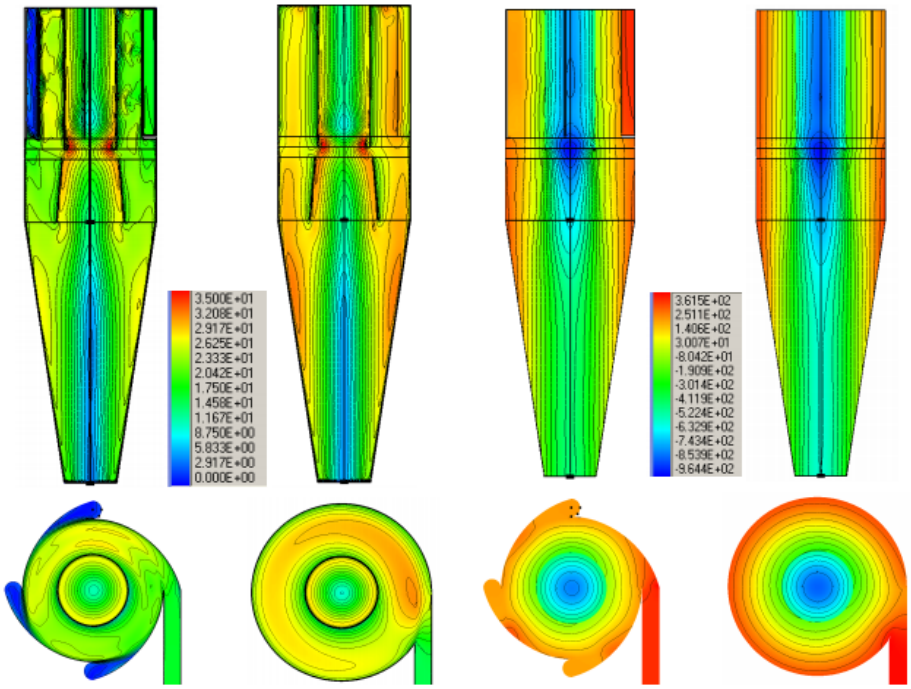


Рисунок 3.3. Изолинии модуля скорости и давления в продольном и поперечном сечении циклона

Приведенные на рисунке 3.3 изолинии давления в продольном и поперечном сечении, для исследуемых циклонов, по мнению авторов [43], говорят о равномерном распределении давлений в гладком циклоне и более низком и неравномерном давлении в циклоне, имеющем каверны, как в восходящем и нисходящем потоках, так и в поперечном сечении циклонов. Неравномерность давлений в циклоне с внутренними элементами понижает эффективность очистки. При сравнении экспериментальных данных для циклонов по степени очистки авторами выявлено, что в традиционном циклоне гидравлическое сопротивление (σ = 491) больше, чем в конструкции с внутренними элементами (σ = 334) в 1,5 раза при тех же начальных условиях, что связано с меньшими тангенциальными и более высокими аксиальными скоростями в конструкции с уступами. Экспериментальные исследования [43] показали снижение перепада давления для конструкции с уступами в 2 раза при ограничении скорости до 5 м/с.

Изготовленный в ООО «Комплексные очистительные устройства» циклофильтр, приведенный на рисунке 1.15. главы 1.3.2., совмещает процесс сепарации грубодисперсных

частиц пыли, капельной влаги и тонкой фильтрации в одном моноблоке – циклофильтре (рисунок 3.4.) [86].

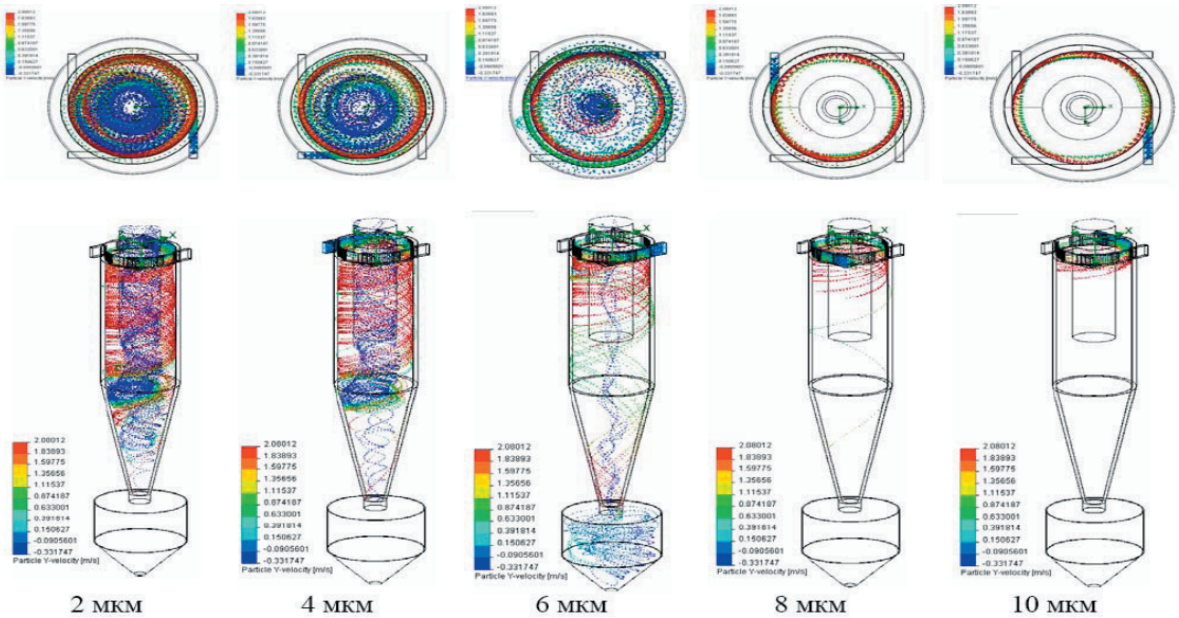


Рисунок 3.4. Распределение осевых скоростей потока в циклофильтре

Движение циклового воздуха моделировалось авторами [87,88] на основании уравнения Навье-Стокса. Результаты расчётов приведены на рисунке 3.4. В результате проведенных авторами [60] расчётов было установлено, что в циклофильтре (без фильтра тонкой очистки воздуха) параметр, определяющий диаметр частиц, улавливаемых на 50% равен $d_{\eta 50}$ =1,5 мкм. К сожалению авторы не объясняют, за счёт чего достигается этот результат, который сопоставим с аналогичным параметром циклона СКЦН-34, являющимся наиболее эффективным в нашей стране. Авторы утверждают, что такая эффективность улавливания достигается в циклофильтре при энергозатратах в 3 раза ниже, чем у СКЦН-34, однако они не указали за счёт чего достигается это преимущество. Результат $d_{\eta 50}$ =1,5 мкм может быть связан с тем, чтозадаётся большая входная скорость. Однако вывод авторов о том, что энергозатраты в 3 раза ниже чем у СКЦН-34 может быть связан с тем, что в статье приводятся ссылки на компьютерное модерование более ранних лет, которое, возможно, было недостаточно совершенным.

В циклоне (рисунок 3.5), созданном авторами [62] эффективность улавливания и гидравлическое сопротивление инерционного фильтра на расход газов до 300 м^3/ч полидисперсной пыли расчётным методом определялись при помощи прикладного CFD пакета, к сожалению авторы не конкретизируют программу. Гидравлическое сопротивление по результатам расчётов составило 686 Па [89]. После получения результатов аэродинамических

расчётов авторы рассчитывали эффективность осаждения пыли различных фракций по каналам инерционного фильтра.

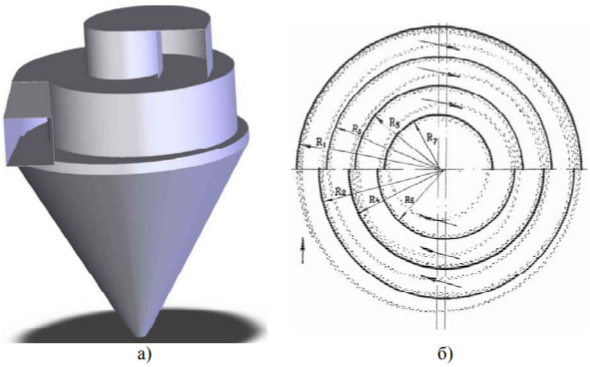


Рисунок 3.5. Газоочиститель с замкнутыми контурами: а) газоочиститель с замкнутыми контурами; б) система каналов с замкнутыми контурами [62]

Для моделирования течения природного газа через циклон, предложенный авторами [90] «построена его конечно-элементная модель, состоящая из 597285 конечных элементов (КЭ), содержащих 150914 узлов» (рисунок 3.6).

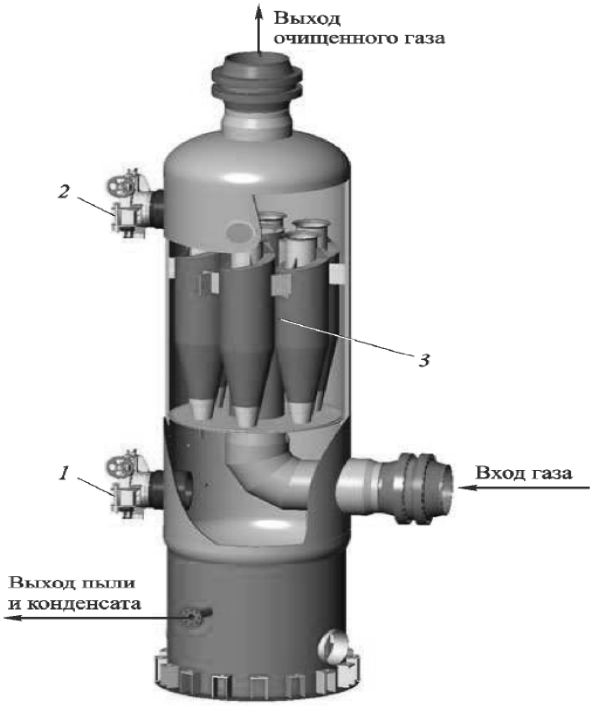
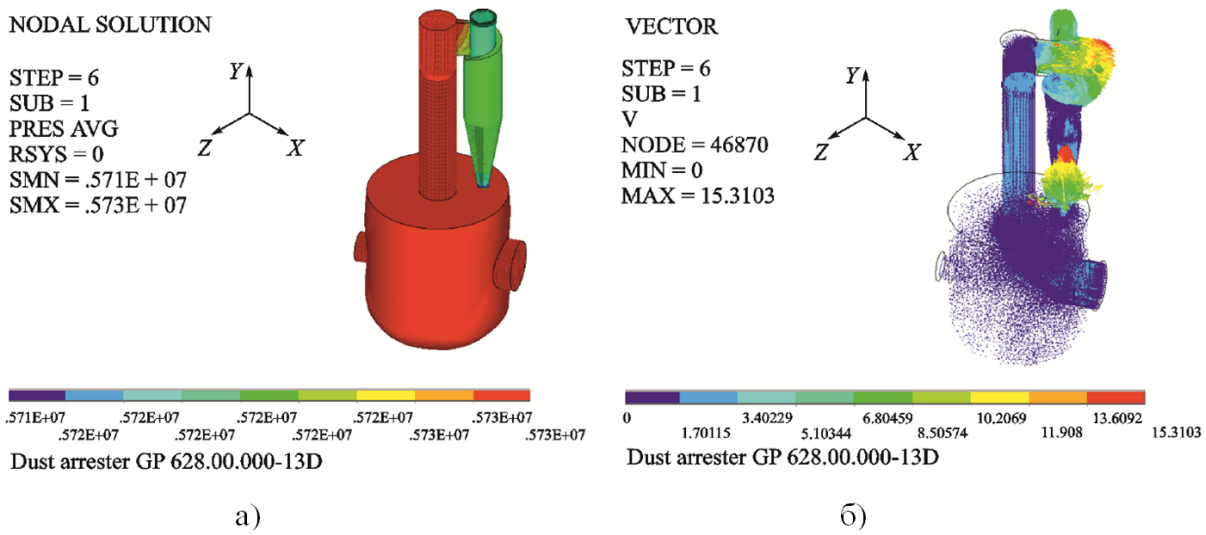


Рисунок 3.6. Пылеуловитель ГП-628: 1, 2 - люк-лаз; 3 - блок циклонов

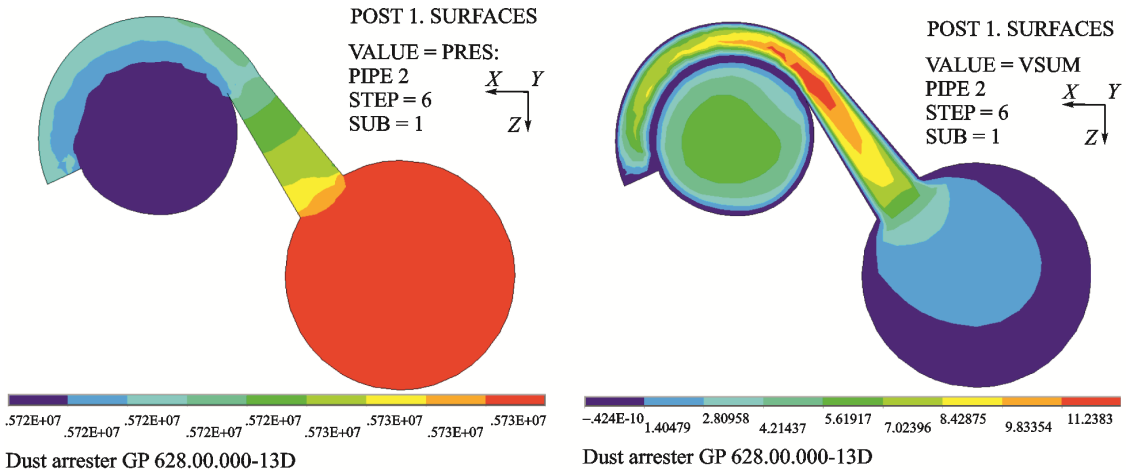
Распределение давлений в циклоне, полученное в результате расчета, представлено на рисунке 3.7, *а*. Наибольшее изменение давлений наблюдается в областях, где скорость потока газа меняется наиболее быстро (рисунок 3.7, *б*).



а) б)

Рисунок 3.7. Распределение давлений (а) и скоростей течения (б) в циклоне пылеуловителя

На рисунке 3.8 приведено поперечное сечение кругового канала циклона по уровню нижнего края его входного раструба. Почти всё падение давления в циклоне пылеуловителя происходит в круговом канале (рисунок 3.8, *а*), соответствуя как наибольшей скорости движения газа в сечении канала, так и наименьшей площади его поперечного сечения (рисунок 3.8, *б*).



а *б*

Рисунок 3.8. Распределение давлений (*а*) и скоростей течения (*б*) в круговом канале циклона пылеуловителя

Скорости движения газа вблизи крыльчатки нижнего торца выхлопной трубы циклона оказываются значительно меньше скорости течения в поперечном сечении входной трубы пылеуловителя (рисунок 3.9) и наличие крыльчатки не оказывает существенного влияния на падение давления в циклоне пылеуловителя.

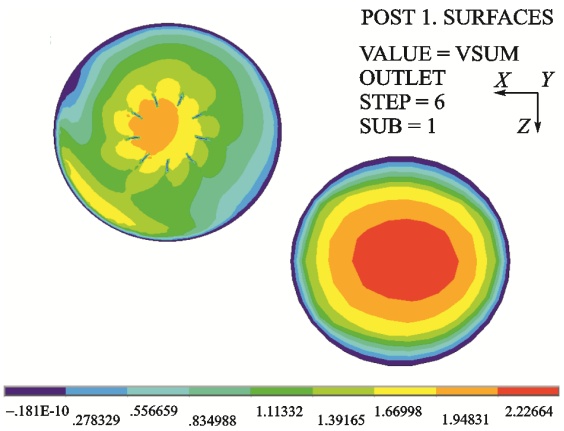


Рисунок 3.9. Распределение скоростей в сечении по нижнему торцу выхлопной трубы циклона пылеуловителя

Авторы [90] делают выводы, что «потеря напора газа при прохождении циклона не превышает 0,01 МПа, что полностью согласуется с техническим паспортом, в котором указано, что полное гидравлическое сопротивление всего пылеуловителя не должно превышать 0,05 МПа. А также, что предложенный численный способ расчета течения газа через циклон позволяет получить надежные данные о распределении скоростей и давлений газа в пылеуловителе и моделировать течение газа при любых заданных условиях работы пылеуловителя».

Авторами [91] была разработана конструкция инерционно-центробежного пылеуловителя-классификатора (ИЦПК), которая улавливает пыль и отделяет её по фракциям (рисунок 3.10).

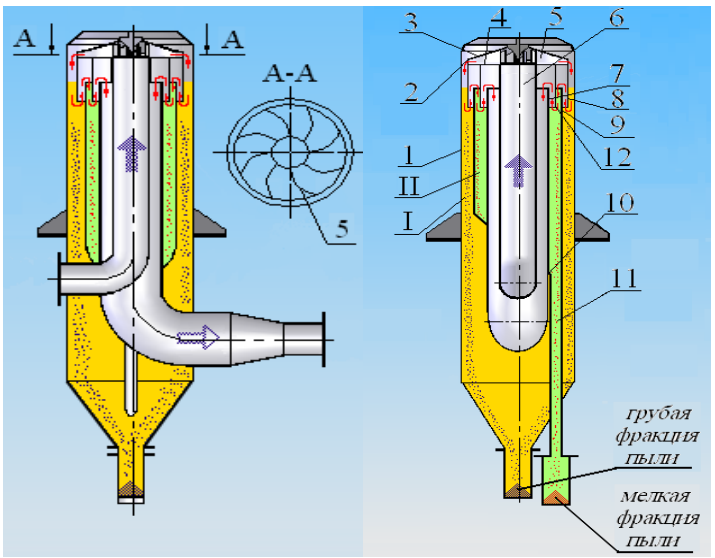


Рисунок 3.10. Инерционно-центробежный пылеуловитель-классификатор: 1 – корпус; 2 – завихритель; 3,4 – стенки; 5 – лопатки; 6 – входной патрубок; 7 – патрубок очищенного газа; 8,12 – экраны; 9 – приемный цилиндр; 10 – днище; 11 – патрубок. I – первая ступень очистки; II – вторая ступень очистки [91]

Расчет аэродинамики аппарата газового потока проводился авторами [91] на основе осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса с учетом турбулентного режима течения потока с использованием k-ε модели турбулентности методом конечных элементов. В результате авторы [91] делают выводы, что с увеличением скорости на входе в ИЦПК увеличивается число витков спирали газового потока и возрастает эффективность пылеулавливания η (%), однако при этом увеличивается сопротивление газового потока.

Авторами [92] была разработана модель пылеуловителя центробежно-инерционного типа, представленная на рисунке 3.11.

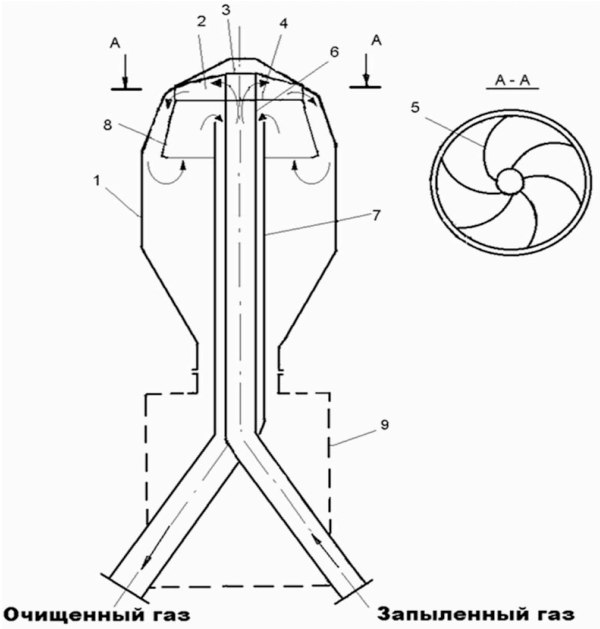


Рисунок 3.11. Конструкция центробежно-инерционного пылеуловителя: 1 – корпус; 2 – завихритель; 3 – верхняя стенка завихрителя; 4 – нижняя стенка завихрителя; 5 – лопатки; 6 – входной патрубок; 7 – выходной патрубок; 8 – экран; 9 – бункер

По результатам численных исследований [93] наиболее перспективным направлением повышения эффективности работы аппарата является поддержание величины инерционной составляющей результирующей силы на протяжении всего пути движение газового потока внутри аппарата за счёт последовательного изменения направлений движения и изменения сечений каналов восходящих и нисходящих потоков.

Авторы [94-99] провели исследования поля осредненной и пульсационной скоростей, на основе физического моделирования воздушного потока в теле циклона, которые были сопряжены с большими, порой технически непреодолимыми трудностями. Поэтому авторы используют методы математического моделирования с использованием трехмерных уравнений Навье-Стокса с использованием k-ε модели турбулентности с помощью программного комплекса Flow 3D.

Одним из возможных путей повышения эффективности циклона, особенно при улавливании мелких частиц является уменьшение радиуса циклона. Ещё одним способом повышения эффективности авторы [100] считают можно достичь приданием входному патрубку прямоугольной формы, вытянутой вдоль оси циклона. Параметры турбулентного течения значительно зависят от наличия стенки. По факту это проявляется в виде изменения профиля скорости вследствие условия прилипания, которое выполняется на стенке [101]. Вблизи стенки происходят следующие изменения: за счет вязкости и кинематического блокирования снижаются нормальные и тангенциальные флуктуации скорости, с другой стороны, из-за большого градиента скорости вблизи стенки порождается турбулентность. Моделирование вблизи стенок существенно влияет на точность решения, так как стенка является основным источником завихренности среднего течения. Кроме того, наибольшие изменения параметров потока наблюдаются именно в пристеночной области. Это говорит о том, что точное решение в области у стенок определяет верность всего расчета для ограниченных стенками потоков. В ряде работ по моделированию турбулентности, выполненных в последнее время, показано, что хорошие результаты в численных исследованиях криволинейных потоков (рисунок 3.12), в том числе в циклонах, дают не только модели типа Reynolds Stress Model (RSM), но и такие, как k-ω, а также менее ресурсозатратные [102].

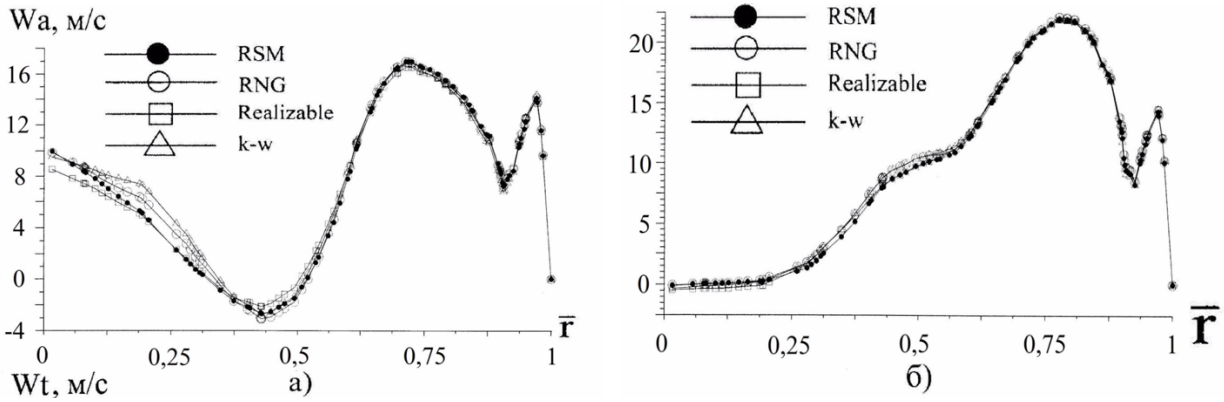


Рисунок 3.12. Профили аксиальной (а) и тангенциальной (б) скоростей (x = 0)

На сегодняшний день существует множество работ по CFD-моделированию потоков в циклонах [102-105]. Однако в них, как правило, наблюдались только отдельные характеристики потока, такие, как распределение давлений и скоростей течения в конкретных модификациях существующих циклонов. Поэтому были проведены численные исследования 3d-модели потока разработанной конструкции циклона-фильтра с целью определения радиальной составляющей скорости, так как экспериментально это сделать невозможно, тангенциальные и осевые составляющие скорости потока, с целью верификации с результатами натурных исследований, к тому же изменения статического давления.

3.2. Построение геометрической модели численных исследований

В данной главе на основе методов вычислительной гидродинамики выполнено моделирование аэродинамических параметров работы циклона-фильтра диаметром 200 мм, соответствующий циклону ЦН-11-200 для стендовых испытаний. В ходе численного эксперимента виртуальное запыление не проводилось, поскольку эффективность осаждения точнее и легче определяется через параметр Re_r. Также вопросы, связанные с характеристиками потока (распределения скорости и давлений) в пределах кольцевого пространства, исследовались численно без моделирования фильтрующей вставки, так как при испытании лабораторной установки циклонного фильтра диаметром 100 мм было показано, что наличие фильтрующей вставки не нарушает траекторию потока. Необходимость численного исследования обусловлена затрудненностью проведения подробного натурного эксперимента с непосредственным определением всех характеристик потока, и в особенности – радиальной составляющей скорости, что достаточно просто идентифицируется в численной 3d-модели.

Построена геометрическая модель циклона в программе Gambit с использованием элементарных объемных фигур. Порядок и процедуры построения трехмерной модели циклона следующие. Сначала строится геометрическая модель с использованием операций «объединения» и «вычитания» для создания единого объема, представляющего циклон («GEOMETRY COMMAND BUTTON»).

Далее построенная плоскость разбивается на конечные элементы («MESH COMMAND BUTTON»). Задаем граничные условия на сторонах модели и тип среды («ZONES COMMAND BUTTON»). В программе ANSYS Gambit осуществляется указание поверхностей вход и выход из расчетной области циклона, к которым будут приложены граничные условия. Последний этап работы в Gambit – это экспорт неструктурированной трехмерной сетки во ANSYS Fluent (численное моделирование динамики газового потока CFD).

3.3. Постановка граничных условий и устранение сеточной зависимости

Численные значения граничных условий задаются в программе ANSYS Fluent. Поверхности, которые не будут указаны как граничные, по умолчанию считаются стенками и к ним применяется соответствующее граничное условие wall.

В разделе «Define» основного меню задаются параметры решателя. В методе конечных объемов дифференциальные уравнения дискретизируются, то есть заменяются системой алгебраических уравнений для переменных в некотором множестве дискретных местоположений (точек) в пространстве и времени. Выполняется задание граничных условий следующим алгоритмом.

- Для входной поверхности задается условие скорости потока:

Zones → Specify Boundary Types

Задается имя входной поверхности Name: «Inlet»

Выбирается тип ГУ Select Type VELOCITY INLET (скорость на входе).

- Для выходной поверхности задается давление:

Zones → Specify Boundary Types

Задается имя выходной поверхности Name: «Outlet»

Выбирается тип ГУ Select Type PRESSURE OUTLET (давление на выходе).

- Для стенки:

Zones → Specify Boundary Types

Задается имя Name: wall

Выбирается тип ГУSelect Type WALL(стенка)

Оставляем включённую опцию по умолчанию – Stationary Wall (стационарная стенка).

- Разбита конечно-элементная неявная сетка.

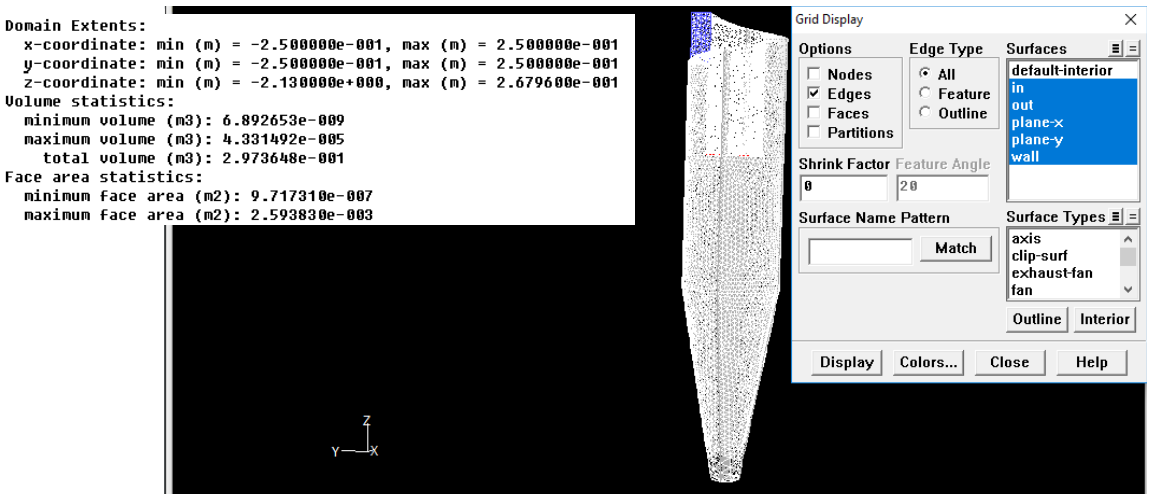


Рисунок 3.13. Объёмная модель циклона с размерами исходной конечно-элементной сетки

На рис.3.13 представлена модель циклона с объемной конечно-элементной сеткой с максимальным объёмом ячейки $4{,}33 \cdot 10^{-5}$, минимальный $6{,}89 \cdot 10^{-9}$. Количество ячейки (исходная / адаптированная): (120783 / 1004211); грани (221771 / 473636); узлы (21500 / 67175).

Процесс схождения контролируется путём наблюдения за изменением величины невязок в ходе итерационного процесса. Для обеспечения сходимости итерационного процесса заданы начальные условия для отдельных областей. При числе итераций, равной 70 000 и достижении невязок, заданных при настройке решение сошлось.

Для описания движения потока через циклон в решателе ANSYS Fluent использована система уравнений движения Навье-Стокса, осреднённых по Рейнольдсу.

Математическая модель течения среды с использованием системы уравнений Навье-Стокса имеет вид:

- уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho v_j)=0 \qquad (3.1.)$$

- уравнение движения:

$$\begin{aligned}
&\frac{\partial v_x}{\partial t}+v_x\frac{\partial v_x}{\partial x}+v_y\frac{\partial v_x}{\partial y}+v_z\frac{\partial v_x}{\partial z}=F_x-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x}+\eta\Delta v_x,\\
&\frac{\partial v_y}{\partial t}+v_x\frac{\partial v_y}{\partial x}+v_y\frac{\partial v_y}{\partial y}+v_z\frac{\partial v_y}{\partial z}=F_y-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial y}+\eta\Delta v_y,\\
&\frac{\partial v_z}{\partial t}+v_x\frac{\partial v_z}{\partial x}+v_y\frac{\partial v_z}{\partial y}+v_z\frac{\partial v_z}{\partial z}=F_z-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial z}+\eta\Delta v_z,
\end{aligned} \qquad (3.2)$$

где: v – скорость газового потока, F – внешняя удельная (приходящаяся на единицу массы) сила, p - давление, η – кинематический коэффициент вязкости, Δ – оператор Лапласа.

В ряде работ по моделированию турбулентности, выполненных в последнее время, показано, что хорошие результаты в численных исследованиях криволинейнных потоков, в том числе в циклонах, дают не только модели типа Reynolds Stress Model (RSM), но и такие, как k-ω, а также менее ресурсозатратные. В нашей работе также исследована возможность применения в расчетах моделей турбулентности RSM и по Буссинеску – k-ω и Spalart-Allmaras (S-A). Дальнейшее сопоставление результатов расчетов с опытными данными различных авторов показало, что найденные по k-ω и S-A значения скорости и давления близки к экспериментальным, и для численных исследований была применена модель S-A как наименее ресурсозатратная. Ее математическая формулировка достаточно полно рассмотрена в литературе, например, в работах [106-110].

3.4.Обработка результатов исследований

После тангенциального входа поток газа приобретает в корпусе циклона осесимметричное винтовое движение вниз. После кольцевой зоны вертикальная составляющая скорости потока вблизи стенки корпуса при перемещении вниз начинает уменьшаться из-за роста давления в сужающейся конической части циклона. Выявлены изменения тангенциальных, осевых и радиальных составляющих скоростей в продольном сечении 1-1 (рисунок 3.14).

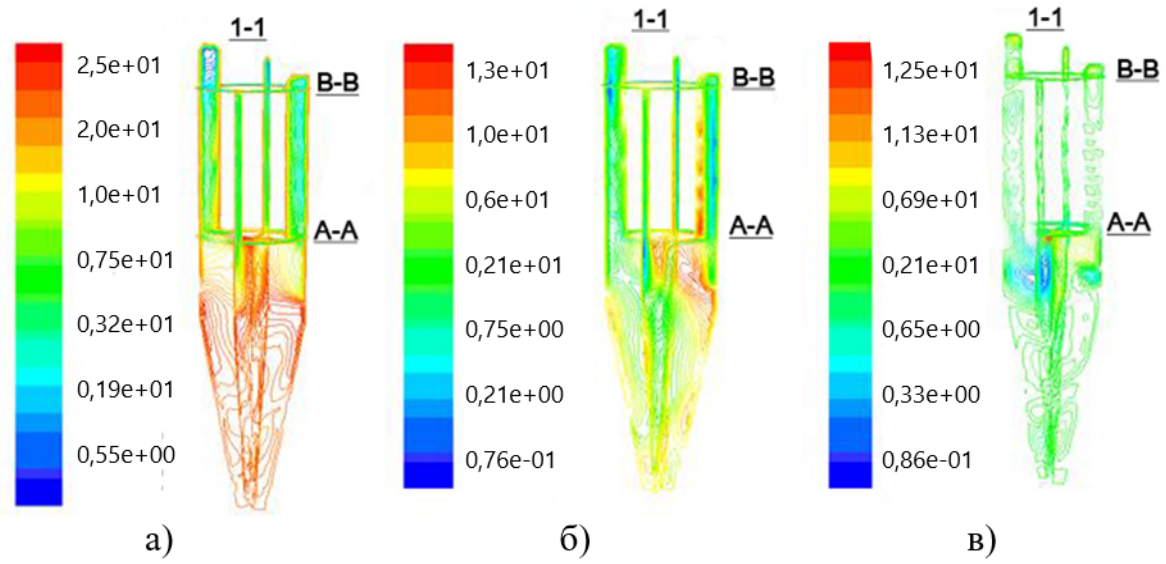


Рисунок 3.14. Распределение скоростей потока в пределах кольцевой зоны циклона: а) тангенциальной; б) осевой; в) радиальной

Во многих работах, посвященных исследованию циклонов, имеются результаты аксиальных и тангенциальных скоростей, тогда как для построения пространственного вектора скорости необходима также и радиальная составляющая [108-112].

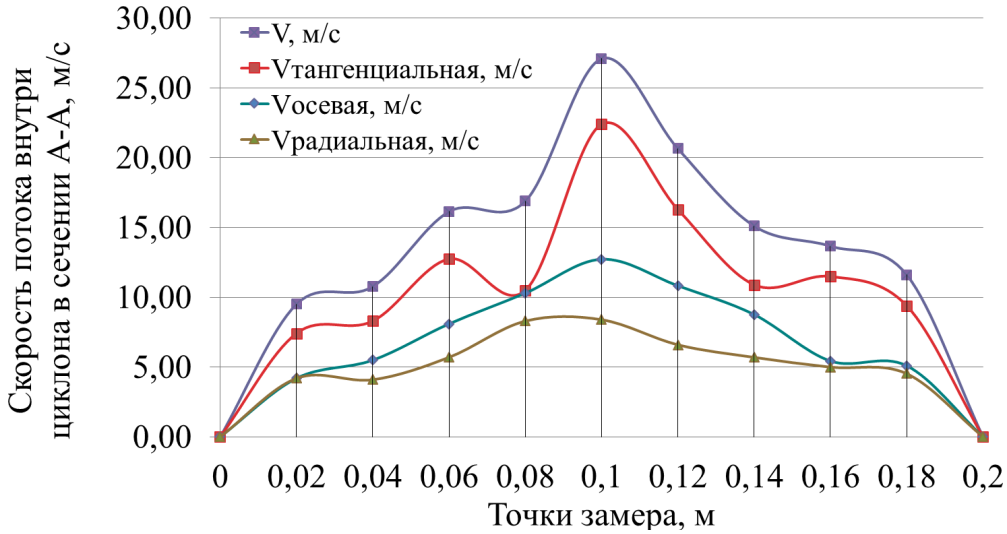


Рисунок 3.15. Изменение тангенциальной (а), осевой (б) и радиальной (в) составляющей скорости в циклоне в сечении *А-А*, полученное в численном эксперименте, при среднем расходе Q=0,07 м^3/с

На рисунках 3.15, 3.16 приведены усреднённые значения тангенциальной (а), осевой (б) и радиальной (в) составляющих скоростей в циклоне, полученные в численном эксперименте, при среднем расходе Q=0,07 м^3/с в сечении *А-А* и *В-В*. Значения, полученные непосредственно *с Fluent* приведены в приложении 3. Согласно рисункам 3.15 и 3.16 в сечениях *А-А* и *В-В* в

периферийной части потока наблюдается увеличение всех трёх составляющих скоростей по радиусу по мере удаления от стенок циклона.

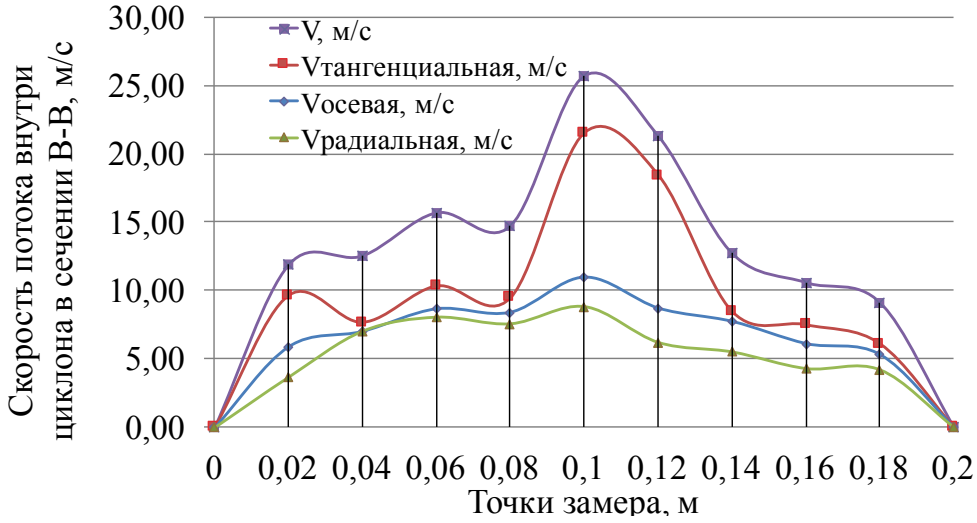


Рисунок 3.16. Изменение тангенциальной (а), осевой (б) и радиальной (в) составляющей скорости в циклоне в сечении *B-B*, полученное в численном эксперименте, при среднем расходе Q=0,07 м^3/с

Полученное в численных исследованиях распределение радиальной скорости потока в циклоне в продольном сечении 1-1, а также в поперечных сечениях *A-A* и *B-B* представлены на рисунке 3.17. Наибольшее значение в сечении *A-A* она имеет на оси циклона и составляет 8,0 м/с.

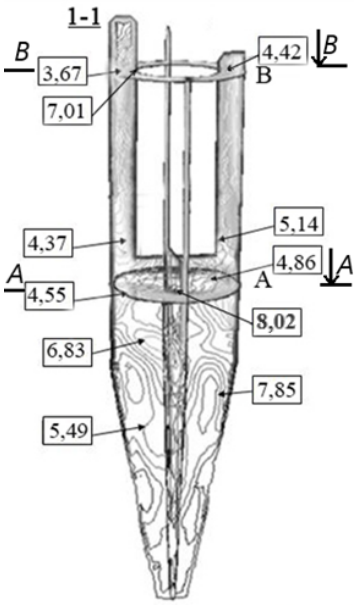
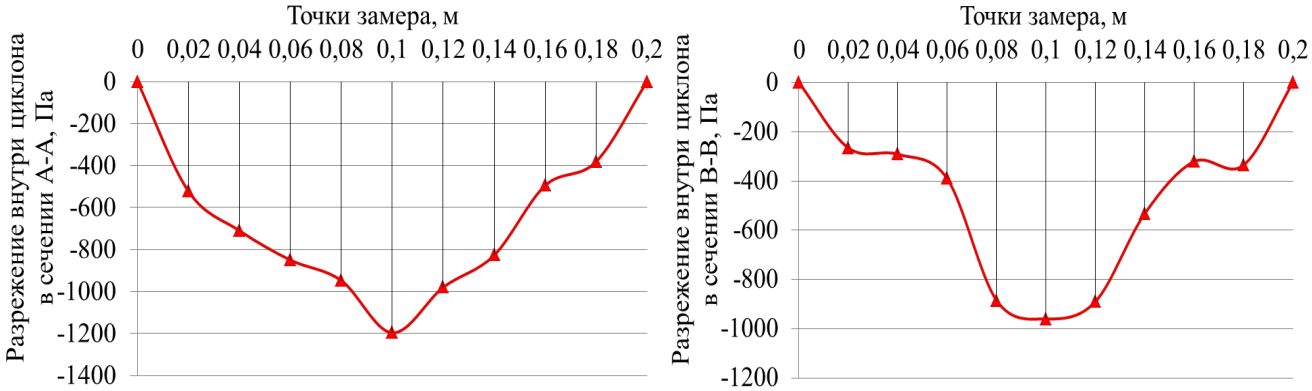


Рисунок 3.17. Распределение радиальной скорости потока в циклоне в продольном сечении 1-1, а также в поперечных сечениях *A-A* и *B-B* (в поле рисунка указаны значения изотах в м/с)

Определены изменения статического давления в поперечных сечениях *А-А* и *В-В* циклона (рисунок 3.18). Статическое давление к центру циклона под выхлопной трубой в сечении *А-А* при среднем расходе Q=0,07 м^3/с (первый режим работы вентилятора) составляет -1205,0 Па.



а) б)

Рисунок 3.18. Изменение статического давления в циклоне, полученное в численном эксперименте при среднем расходе Q=0,07 м^3/с: а) в сечении *А-А*; б) в сечении *В-В*

Из рисунка 3.18 б видно, что на входе в циклон в сечении *В-В* давление составляет -250 Па, а на выходе из циклона -960 Па, следовательно, сопротивление циклона составляет 710 Па, что приемлемо при его использовании в городских газотранспортных системах.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3

1. Построена геометрическая модель на базе серийного циклона ЦН-11 диаметром 200 мм в программе Gambit.
2. Исследованы поля скоростей и давлений на численной 3d-модели, построенной на базе серийного циклона ЦН-11 диаметром 200 мм.
3. Определена радиальная составляющая скорости потока, так как замерить её в натурном эксперименте весьма проблемно из-за искажения измерительной головкой щупа термоанемометра структуры потока в области замеров, которая находится в пределах 1,25-8,02 м/с и необходима для использования совместно с экспериментальными данными.
4. Определены изменения давления в поперечных сечениях циклона: в сечении *А-А* к центру циклона под выхлопной трубой достигает значения - 1205,0 Па; в сечении *В-В* на входе в циклон составляет -250 Па, а на выходе из циклона -960 Па, следовательно, сопротивление циклона 710 Па, что приемлемо при его использовании в городских газотранспортных системах.

Глава 4 ЛАБОРАТОРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ЦИКЛОНА-ФИЛЬТРА ДЛЯ ОЧИСТКИ ГАЗОВОГО ТОПЛИВА ГОРОДСКИХ ЭНЕРГОСИСТЕМ

4.1. Обзор существующих методов натурного эксперимента по очистке топливных газов в городских энергосистемах

На сегодняшний день имеются ряд работ по опытным исследованиям циклонов и циклонно-фильтрующих установок [27-32, 38-43, 62-77, 113-117]. В работе [43] изучались характеристики динамики турбулентного движения струи на циклоне с внутренней рельефной поверхностью. Схема экспериментального стенда представлена на рис. 1.7 в главе 1.1.2. В ходе исследований авторами [43] проводились измерения степени очистки, гидравлического сопротивления, расхода воздуха, разрежения по высоте цилиндрической части и по окружности. Эффективность очистки определяли балансовым методом на основе измерения веса загруженной с точностью до 0,1 г. Измерения гидравлического сопротивления и разрежения проводились при помощи *U*-образных водяных манометров. Погрешность измерения находилась в пределах 2 %.

В [44] приведены оптимальные геометрические размеры внутренних элементов циклона, обеспечивающего степень очистки мелкодисперсной пыли с низкой кажущейся плотностью на 99% и более.

Из литературных источников [118, 119] известно, что в систему аспирации выносится от 6 до 15% цемента, при этом концентрация цемента в аспирационном воздухе находится в пределах 100–560 г/м^3. Увеличение скорости воздуха в сечении мельницы с 0,43 до 0,7 м/с приводит к увеличению производительности мельницы на 15–20% и, соответственно, к увеличению пылеуноса. Немаловажную роль в технологической цепочке производственного оборудования играет первая (центробежная) ступень очистки - циклон. Двухступенчатые системы аспирации трубных шаровых мельниц, как правило, оборудованы циклонами НИИОгаз ЦН-15 либо Крейзеля и на второй ступени - рукавными фильтрами. Реальные значения коэффициента улавливания циклонных пылеуловителей в системах аспирации трубных шаровых мельниц находятся в диапазоне 60–75% при аэродинамическом сопротивлении 1200 Па в зависимости от различных технологических факторов. При такой запыленности перед рукавным фильтром необходима интенсивная регенерация фильтр-элементов, что приводит к нестабильному расходу воздуха в системе аспирации мельницы, быстрому износу рукавов рукавного фильтра и нестабильной производительности цементной мельницы. Для проверки возможности модернизации батарейного циклона системы аспирации шаровой мельницы помола клинкера на АО «Евроцемент-Украина» [62] были проведены

испытания на экспериментальном стенде по аналогии с предыдущими испытаниями (рисунок 4.1).

а б

Рисунок 4.1. Циклофильтры, внедренные на ПАО «Славянские обои – КФТП»

Предложенный в работе [62] малозатратный метод модернизации циклонных пылеуловителей позволяет в 2-4 раза снизить унос пыли и продлить срок службы аппарата за счет эвакуации концентрированной части потока за входным патрубком в первой трети диаметра циклона в изолированный бункер -пылесборник. В результате проведенных испытаний на цементных предприятиях было установлено, что эффективность улавливания циклофильтром клинкерной и цементной пыли составила 90%, что дает возможность говорить о целесообразности модернизации циклонных пылеуловителей на промышленных предприятиях. Коэффициент улавливания циклофильтров составил 94%.

Авторами [26] проведены экспериментальные исследования эффективности очистки газов от пыли в вихревом пылеуловителе с различными конструкциями ВКУ, с различным направлением движения потока газа и жидкости по аппарату и при различной концентрации пыли в газе на входе в аппарат. На рисунке 4.2 представлена зависимость параметра $\eta/\Delta P$ от скорости газа в щелях завихрителя для аппаратов с восходящим и нисходящим потоком фаз при плотности орошения q = 38 м³/м²ч для ВКУ 1. Из графиков видно, что для достижения одной и той же эффективности аппарату с нисходящим потоком фаз требуется меньше затрат энергии газового потока. Наибольшее различие (до 35%) наблюдается при малых скоростях газа. При высоких скоростях это различие незначительное. По данному параметру сравнения аппарат с нисходящим потоком фаз превосходит аппарат с восходящим прямотоком. Зависимость выходной концентрации пыли в газе $C_{вых}$ описывается с погрешностью не более 8,3 % в диапазоне изменения скорости газа в щелях завихрителя $W_щ$ следующим уравнением (4.1):

$$C_{вых} = 3,4 \cdot W_щ^{-0,77} \cdot q^{-0,37} \qquad (4.1)$$

Сравнение эффективности работы различных аппаратов по комплексному параметру η/Δ*P* показало, что аппарат с нисходящим способом взаимодействия фаз обладает более высокой эффективностью. Сравнение разных конструкций вихревых контактных устройств показало, что ВКУ выпуклой формы обладает наиболее высокой эффективностью пылеулавливания [26].

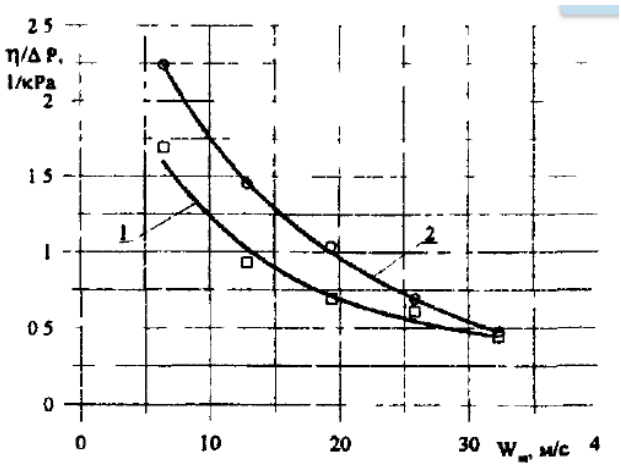


Рисунок 4.2. Зависимость η/Δ*P* от $W_{щ}$ *q* =38 м^3/м^{2}ч, ВКУ № 1, $C_{вх}$ = 30 г/м^3,
1 – восходящий поток, 2 – нисходящий поток

В [120] разработан метод оценки определения перепадов давлений, окружных скоростей в циклоне, в приемнике циклона на запыленном потоке, позволяющий предотвратить забивание частицами датчиков и повысить точность и надежность измерений. Обобщающие кривые распределений скоростей, давлений для камер под напором оказываются независящими от расхода, если они отнесены к базовым значениям $P_к$ – давление на стенке корпуса и $V_Δ$ – окружная скорость вблизи стенки корпуса. Сопротивление камеры связано с коэффициентом сопротивления камеры соотношением (4.2):

$$\xi_к = \bar{R}_1^2 \left[1 + P_k / (0,5\rho V_\Delta^2 \right] \tag{4.2}$$

Анализ полученных распределений [120] показывает, что малые концентрации частиц, характерные для систем обеспыливания газов, оказывают заметное влияние на распределение давлений, причем на оси разрежение по абсолютному значению уменьшается в сторону пылевыводного сечения в отличие от вихревых камер. С увеличением относительного значения отводимого с пылью воздуха разрежение на оси в нижней части увеличивается, градиенты разрежений и радиальных перепадов давлений в осевом направлении уменьшаются.

В [65] приведены результаты проведенных исследований, которые показали влияние плотности частиц на износостойкость при различных скоростях газа (рисунок 4.3).

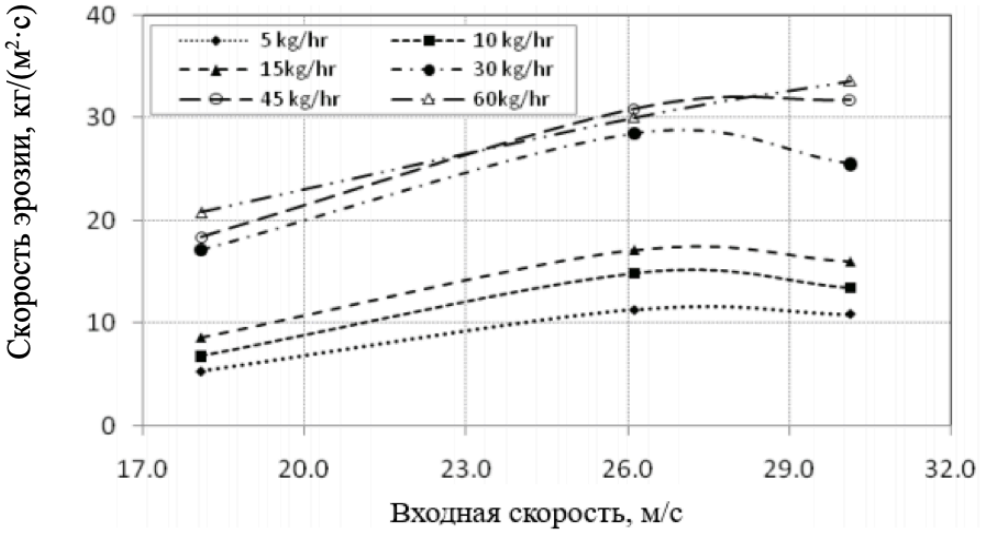


Рисунок 4.3. Сравнение скорости эрозии от входной скорости потока [65]

Как и ожидалось, при заданной скорости газа скорость эрозии уменьшается. Однако при заданной входной скорости средняя скорость эрозии увеличивается со скоростью потока до определенной скорости. За пределами этой скорости скорость эрозии остается постоянная или немного уменьшается.

Результаты моделирования [67] показывают, что установка разделительной пластины в циклоне (рисунок 4.4) позволило добиться авторам эффективности 100% для частиц пыли более 20 мкм. Фильтруя более мелкие частицы, эффективность циклона постепенно снижается примерно до 80%.

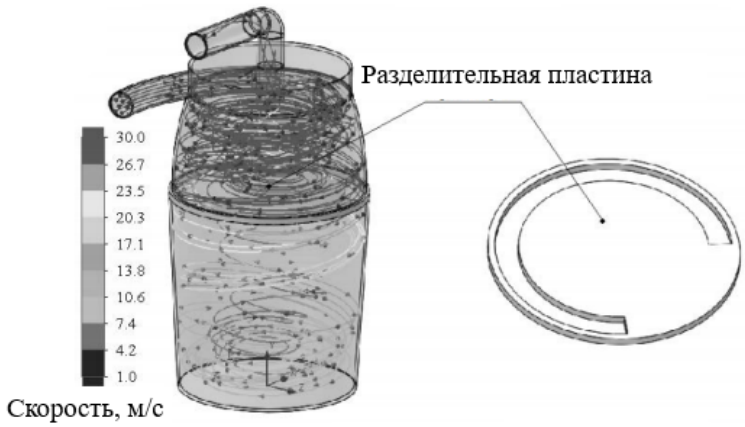
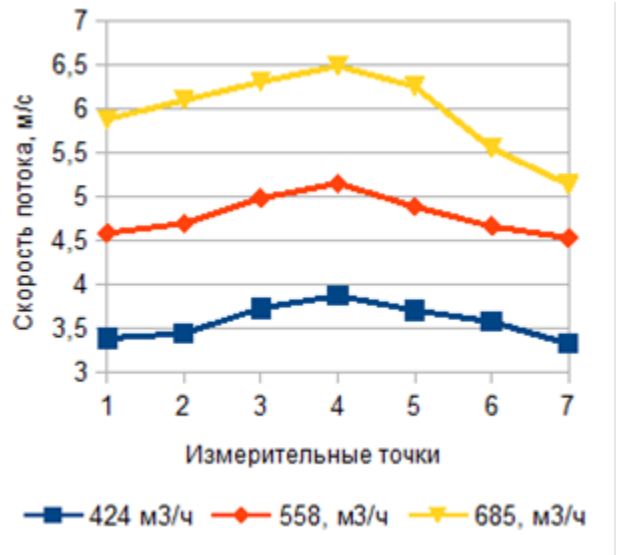


Рисунок 4.4. Моделирование установки очистки воздуха циклонного типа с разделительной пластиной [67]

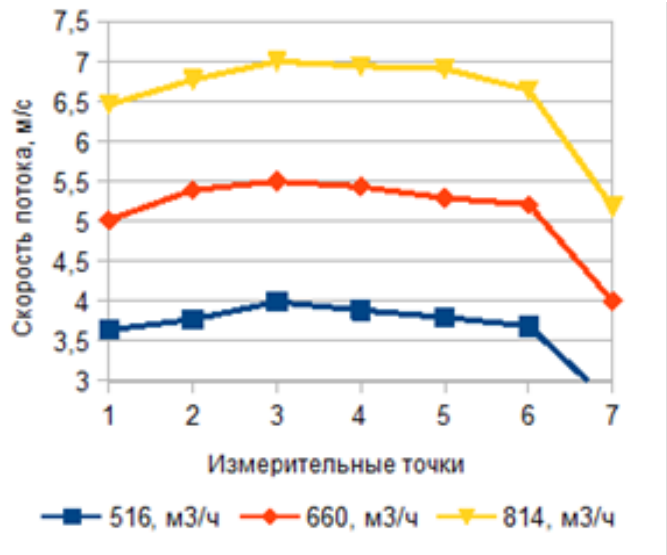
В работе [68] было исследовано влияние уменьшения поперечного сечения выходного канала циклона вместе с удлинением цилиндрического корпуса на характер потока и рабочие характеристики обычного циклона. Применение моделирования Эйлера-Лагранжа для частиц

менее 5 мкм показал, что эффективность улавливания увеличивается при вторичном закрученном потоке, чему способствует уменьшение поперечного сечения циклона. Таким образом, эта конструкция представляет собой многообещающую альтернативу с учётом того, что авторы решат проблему с увеличением сопротивления.

Работа [121] посвящена исследованиям на полупромышленной экспериментальной установке «Циклон», которая позволяет проводить параллельные сравнительные аэродинамические испытания цилиндрического циклона с улиткой «ЦН-15у-300» и запатентованного циклона с обратным конусом «ЦОК-200-300». Для проведения измерения аэродинамических характеристик циклонных аппаратов авторами [121] была собрана схема, в которой использованы дифференциальные микроманометры *Testo* 521-1 с комплектом напорных трубок Пито [122]. Для измерения давлений и скоростей движения воздуха в воздуховодах (каналах) выбраны участки с расположением мерных сечений на расстояниях не менее шести гидравлических диаметров D_h (м) за местом возмущения потока (отводы, шиберы, диафрагмы и т. п.) и не менее двух гидравлических диаметров перед ним [123]. На рисунке 4.5 показаны результаты измерений скоростей воздушного потока во входном патрубке аппаратов «ЦН-15у-300» и «ЦОК-200-300» на разных режимах работы вентилятора. Видно, что величины скорости во входном трапециевидном патрубке «ЦОК-200-300» несколько выше, чем на входе цилиндрического циклона, что обуславливает более высокое значение инерционной силы на первых витках траектории движения воздуха в аппарате.

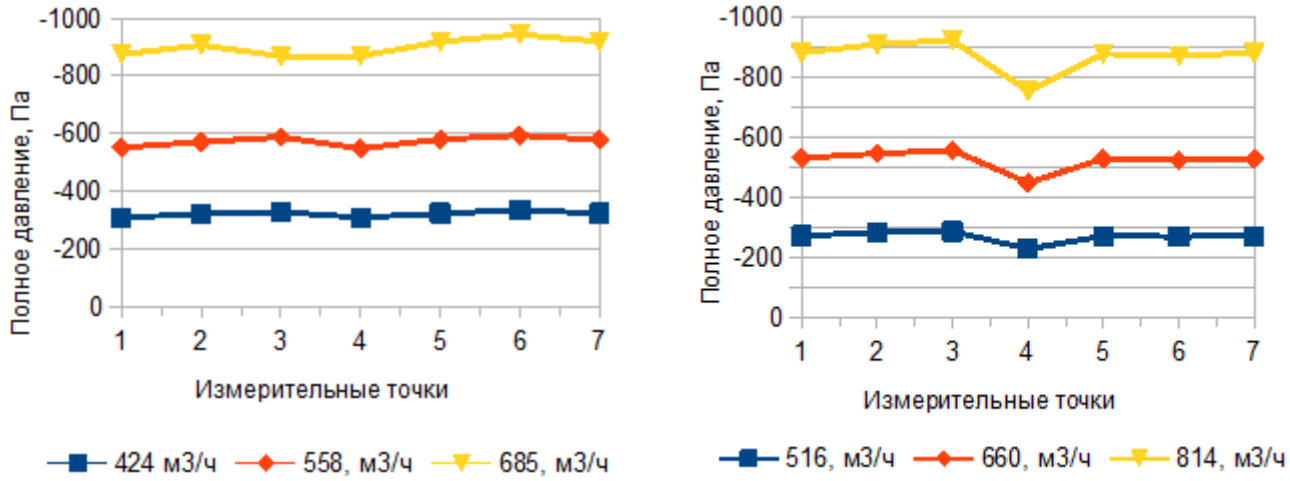


а)



б)

Рисунок 4.5. Скорость воздушного потока при различных режимах работы вентилятора во входных патрубках циклонов «ЦН15у-300» (а) и «ЦОК-200-300» (б)



а) б)

Рисунок 4.6. Полное давление воздушного потока при различных режимах работы вентилятора на выходных патрубках циклонов: а) «ЦН-15у-300», б)«ЦОК-200-300»

На рисунке 4.6 показаны результаты измерений полных давлений воздушного потока в выходном патрубке установки на разных режимах работы вентилятора. Характер изменения полного давления показывает, что в выходном патрубке циклона образуется разрежение. Это объясняется тем, что исследуемые центробежные аппараты работают не на нагнетание, а на вытяжку. При этом давление распределяется по периферии вихря. Полученные результаты свидетельствуют о лучших аэродинамических характеристиках циклона с обратным конусом и, возможно, более высокой эффективности до 95% пылеулавливания за счет увеличенной степени турбулизации потоков.

В целом анализ отечественных и зарубежных источников последних десятилетий показал отсутствие конструкций, которые обеспечивали бы высокую (более 98%) степень очистки взвеси класса $PM_{2,5}$ без резкого увеличения энергозатрат на обработку выбросов. На основе изучения существующего опыта создания лабораторных и экспериментальных стендов, а также с учетом результатов проведенных теоретических расчётов, была построена экспериментальная установка – циклонный фильтрующий аппарат.

4.2.Построение модели для проведения лабораторных испытаний на усовершенствованном циклон-фильтре

Изначально была собрана и испытана по схеме лабораторная установка - циклонный фильтрующий аппарат, представляющий уменьшенную модель циклона ЦН-15 диаметром 100 мм (рисунок 4.7). Циклон-фильтр содержит штуцер для ввода запыленного газового потока 1, установленный тангенциально на цилиндрическом корпусе 2, имеющем коническое днище 3, расположенную соосно с цилиндрическим корпусом выхлопную трубу 4, по диаметру которой внутри корпуса циклона установлен фильтровальный материал 5, (например, лавсан),

зафиксированный в металлическом каркасе 6, который закреплен к торцу 10. Имеются детали крепежа 8 цилиндрического корпуса для разъемной части, в случае замены каркаса с фильтром. На выхлопной трубе установлен патрон с металлической сеткой 9 и фильтр Петрянова 7. Фильтровальную ткань 5 подвергают регенерации путем снятия через разъём в корпусе циклона. Для замены фильтровального материала освобождали крепежные элементы разъема 8, разъёмную часть корпуса 12 снимали каркас с фильтром, удаляли отработанные и устанавливали чистые фильтровальные материалы 5.

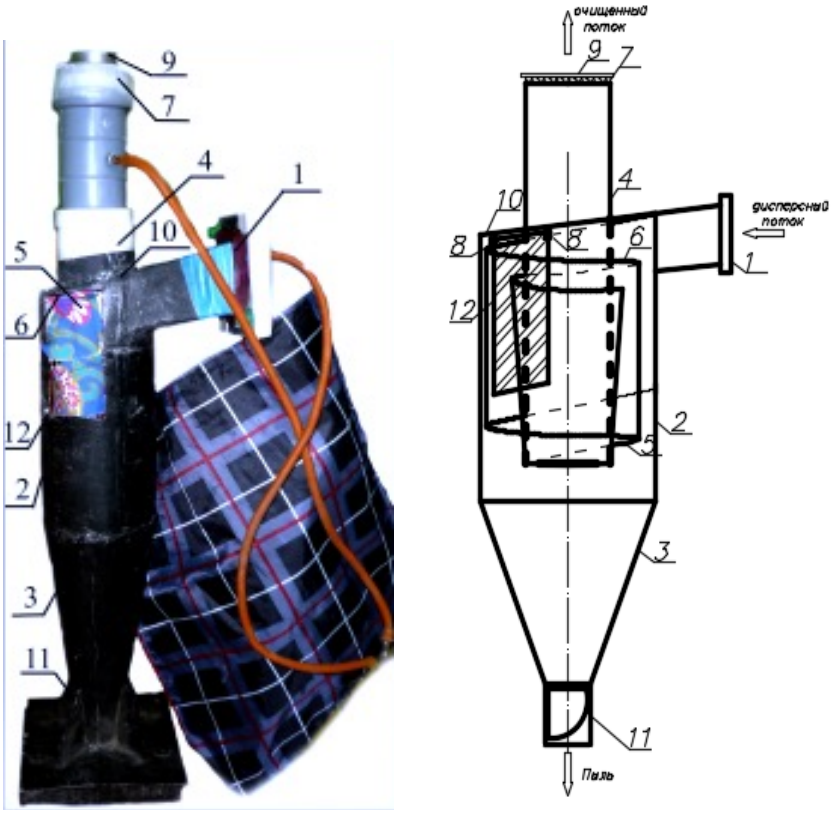


Рисунок 4.7. Циклонный фильтрующий аппарат: 1 –- входной патрубок; 2 – цилиндрический корпус; 3 – коническое днище; 4 – выхлопная труба; 5 – фильтровальный материал; 6 – металлический каркас; 7 – фильтр Петрянова; 8 – детали крепежа, 9 – патрон с металлической сеткой; 10 – торец циклона; 11 – заслонка; 12 – разъём для снятия фильтра

4.3.Описание методики выполнения лабораторных испытаний

В ходе лабораторных испытаний необходимо выявить зависимость изменения давления, скорости движения воздуха и его расхода при различной задаваемой производительности вытяжного вентилятора. Экспериментальная установка (рисунок 4.8) сконструирована в лаборатории и состоит из циклона, двух *U*-образных манометров, микроманометра ММН-240, нагнетателя и контейнера из пыли.

Характеристики пыли были определены посредством седиментации в дистиллированной воде. Использовался весовой метод седиментационного анализа дисперсного состава

измельченных материалов, который определяет скорость оседания частиц из суспензии по скорости накопления массы осадка в чашечке весов. Для нахождения сопротивления циклона замерялся перепад давления с помощью двух *U*-образных манометров на входе и на выходе из циклона. Масса контейнера с пылью определялась на аналитических весах в начале и конце серий экспериментов с одинаковым расходом. С помощью данных микроманометра вычисляли скорость потока в циклоне.

Рисунок 4.8. Составные части экспериментальной установки: 1 – циклон, 2 – штуцер тангенциального ввода, 3 – выходной патрубок циклона, 4 – фильтровальная вставка, 5 – нагнетатель, 6 – контейнер с пылью

Измерения проводились в четыре этапа: с минимальной массой пыли при минимальной скорости; с максимальной массой пыли при минимальной скорости; с минимальной массой пыли при максимальной скорости; с максимальной массой пыли при максимальной скорости. Скорость регулировалась с помощью изменения режима работы нагнетателя.

После проведения каждого этапа эксперимента с начала, середины и конца фильтровальной ткани, установленной в кольцевой части циклонного элемента, вырезались образцы для сравнительного определения эффективности осаждения, которая устанавливалась в результате изучения образцов под микроскопом. Замеры привеса массы производились на аналитических весах.

4.4. Проведение испытаний усовершенствованного циклона-фильтра для очистки газового топлива

В опыте нагнетателем воздух подаётся в контейнер с пылью (тальк с медианным диаметром частиц 10 мкм и дисперсией 3,5). Масса контейнера с пылью определяется на аналитических весах ВЛА-200г-М, с точностью ± 0,1 ÷ 0,2 мг в начале и конце серий экспериментов с одинаковым расходом. Для удобства ведения отсчета весы снабжены вейтографом — оптическим приспособлением со световым экраном, на котором видно увеличенное изображение микрошкалы, укрепленной на стрелке. Экран освещается посредством осветителя, помещенного в задней стенке ящика весов. Лампочка осветителя включается в сеть через трансформатор автоматически - при повороте дисковой рукоятки арретира.

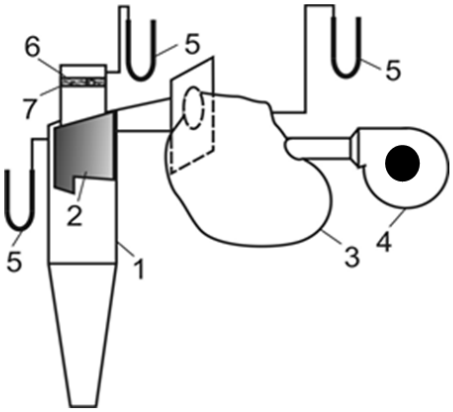


Рисунок 4.9. Схема лабораторной установки для испытания циклонного фильтрующего сепаратора: 1 - циклон; 2 - тканевый фильтр; 3 – контейнер с пылью; 4 - нагнетатель; 5- U-образные манометры; 6 –патрон с сеткой; 7- ткань Петрянова

Стенд для испытания фильтрующего циклонного сепаратора представлен на рисунке 4.9. Дисперсный поток попадает в штуцер тангенциального ввода (рисунок 4.10 а) потока 1 со скоростью, значительно превышающей оптимальную для обычного циклона такого же типа и соответствующей инерционному осаждению более чем на 50% частиц размером 1 мкм и выше, и направляется в циклон, где происходит первая ступень очистки от крупных и средних фракций пыли. Затем поток проходит вдоль фильтра (рисунок 4.10 б), установленного на каркасе в кольцевой части через разъёмный элемент в корпусе циклонного элемента, где происходит касательное и инерционное осаждение пыли среднего и мелкого размера. Частицы же размером крупнее 20-30 мкм оседают на стенке корпуса, как в обычных циклонах. Затем поток направляется в выходную трубу циклона (рисунок 4.10 в), фильтродержатель с установленным фильтром типа АФА (аналитические фильтры аэрозольные Петрянова) из волокон диаметром 1,5 мкм. Эти фильтры имеют малую собственную массу, негигроскопичны.

Главное достоинство этих материалов – требуемая эффективность улавливания частиц всех размеров.

а) б) в)

Рисунок 4.10. Составные части циклонного-фильтра: а) штуцер тангенциального ввода, б) фильтровальная вставка, в) выходной патрубок циклона

На выходе из циклона устанавливался лабораторный фильтродержатель (рисунок 4.11) с установленным фильтром типа АФА (аналитические фильтры аэрозольные Петрянова) из волокон диаметром 1,5 мкм. Эти фильтры имеют малую собственную массу, негигроскопичны. Главное достоинство этих материалов – требуемая эффективность улавливания частиц всех размеров при очень низком сопротивлении.

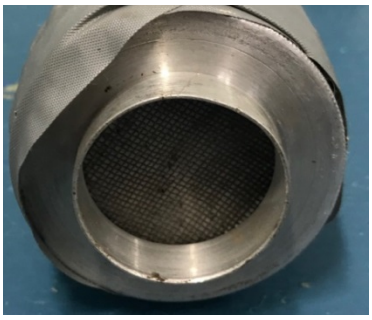


Рисунок 4.11. Патрон с тканью Петрянова и металлической сеткой

4.5. Обработка результатов исследований

Получена расходная характеристика циклонно-фильтровальной установки, т.е. зависимость расхода от ее сопротивления. При выполнении тарировки на установке (таблица 4.1) нагнетателя расход изменялся от минимального значения $1{,}11 \cdot 10^{-3}$ м^3/с до максимального $11 \cdot 10^{-3}$ м^3/с:

$$Q_{\min} = S \cdot V = \frac{\pi d^2}{4} \cdot V \qquad (4.3)$$

где S – входное сечение сопла; d – диаметр сопла; V – скорость потока.

$$Q_{\min} = \frac{3{,}14 \cdot (25 \cdot 10^{-3})^2}{4} \cdot 2{,}27 = 1{,}11 \cdot 10^{-3}, \text{ м}^3/\text{с}$$

$$Q_{max} = \frac{3{,}14 \cdot (25 \cdot 10^{-3})^2}{4} \cdot 22{,}46 = 11 \cdot 10^{-3}, \text{ м}^3/\text{с}$$

Скорость потока V, м/с определялась следующим образом:

$$V = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \tag{4.4}$$

где ΔP – измеряемое давление, Па (при определении по микроманометру $\Delta P = P \cdot k \cdot g$, Па; по U-образному манометру – $\Delta P = P \cdot g$, Па); ρ – плотность воздуха при температуре $t = 24°\text{C}$; $\rho_0 = 1{,}293$ кг/м^3 - плотность воздуха при температуре $t = 0°\text{C}$.

Таблица 4.1.

Тарировочный график установки

№ опыта	Показания микроманометра (К=0,3), Па	Скорость воздуха, м/с	Показания U-образного манометра, Па	Расход подаваемых выбросов, м^3/с
1	0	0	294,00	0,0000
2	0	0	491,00	0,0000
3	0	0	716,00	0,0000
4	2,94	2,27	981,00	0,0011
5	8,82	3,93	1128,00	0,0019
6	16,17	5,33	1373,00	0,0026
7	25,87	6,74	1717,00	0,0033
8	33,81	7,71	1913,00	0,0038
9	42,63	8,66	2060,00	0,0042
10	57,33	10,00	2266,00	0,0049
11	72,00	11,25	2550,00	0,0055
12	80,82	11,92	2795,85	0,0058
13	92,61	12,76	2992,00	0,0063
14	104,37	13,55	3188,25	0,0066
15	116,13	14,29	3286,35	0,0070
16	130,83	15,17	3580,65	0,0074
17	145,53	16,00	3776,85	0,0078
18	157,29	16,63	4169,25	0,0081
19	169,00	17,24	4463,55	0,0084
20	186,69	18,12	4708,00	0,0089
21	204,33	18,96	4806,00	0,0093
22	233,73	20,28	4954,00	0,0099
23	260,19	21,39	5150,25	0,0105
24	286,65	22,46	5297,40	0,0110

$$\rho = \rho_0 \frac{273}{(273+t)}, \text{кг/м}^3$$
$$\rho = 1,293 \frac{273}{(273+24)} = 1,188 \text{ кг/м}^3 \quad (4.5)$$

На рисунке 4.12 представлен график зависимости расхода подаваемых выбросов от сопротивления циклонно-фильтрующей установки.

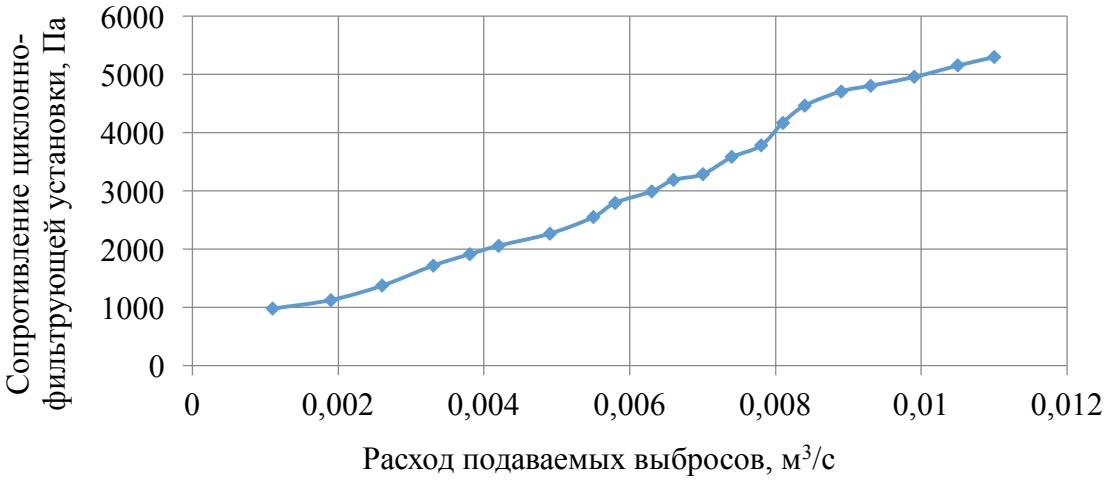


Рисунок 4.12. Зависимость сопротивления циклонно-фильтрующей установки от расхода пыли

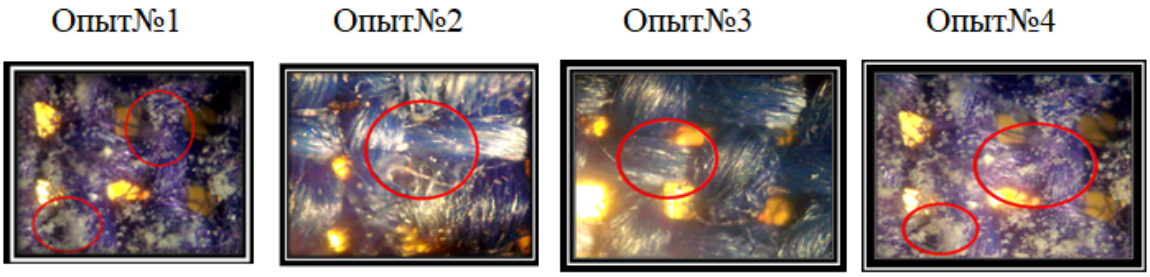


Рисунок 4.13. Образец фильтровальной ткани в процессе испытаний в 4 этапа

В результате изучения образцов под микроскопом с 400-кратным увеличением, были получены предварительные результаты по структуре и дисперсному составу осаждающейся на ткани пыли (рисунок 4.13). При этом было замечено, что запыление оставляет на поверхности выходного фильтра спиральный след. Это показывает, что фильтрующая вставка не мешает нормальной работе циклона, так как сохраняется даже прецессия потока, выходящего из выхлопной трубы, имеющая место при работе обычных циклонов без фильтрующих вставок.

В таблице 4.2 представлены результаты наиболее продолжительного из проведенных экспериментов (30мин) [124, 125].

Таблица 4.2

Результаты проведения опыта

	Масса пустого контейнера, m_0, 10^{-3}	Масса контейнера с пылью до опыта, $m_{нач}$, 10^{-3}	Масса контейнера с пылью после опыта, $m_{кон}$, 10^{-3}	Расход воздуха, $Q_{возд.}$, $м^3/с$	Расход пыли, $Q_{возд.}$, 10^{-6}кг/с	Концентрация пыли, C, 10^{-3}, $кг/м^3$
$m_{пыли} = 1,492 \cdot 10^{-3}\,кг;\ \ \tau = 30 мин,\ \ d = 0,1 м,\ \ V = 2,27 м/с$ соответственно масса используемой в опыте пыли, продолжительность опыта, диаметр циклона, скорость потока.						
Контейнер с пылью	26,42	27,911	27,602	0,02	0,128	0,115
Фильтр тканевый		2,998	3,208	0,02	0,087	0,078
Ткань Петрянова		0,607	0,649	0,02	0,017	0,015
Фильтр тканевый = 67,96%; ткань Петрянова = 13,59%; стенки = 18,45%						

Учитывая, что в ходе эксперимента расход пыли составил:

$\Delta m_к = 27,911 - 27,602 = 0,309$, а на фильтровальной вставке уловлено:

$\Delta m_ф = 3,208 - 2,998 = 0,210$, т.е. это говорит о том, что:

$\begin{matrix} 0,309 - 100\% \\ 0,21 - x \end{matrix} \rightarrow x = 67,96\%$ - процент улавливания фильтровальной вставкой.

В результате лабораторных испытаний установлено, что на фильтровальной ткани улавливается 68% пыли, 14% задерживается выходным фильтром из ткани Петрянова, и остальное (18%) оседает на стенках циклона.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4

1. Проведение лабораторных испытаний выявило, что на фильтровальной ткани улавливается 68% пыли, 14% задерживается выходным фильтром из ткани Петрянова, и остальное (18%) оседает на стенках циклона.

2. Проведенные лабораторные исследования показали целесообразность конструктивного дополнения циклонов, используемых для очистки газа в городских газотранспортных системах, фильтрующими вставками, обеспечивающими эффективное улавливание пыли при приемлемых давлениях (до 5000 Па).

Глава 5 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЦИКЛОННОЙ ФИЛЬТРАЦИИ С ЦЕЛЬЮ СЕПАРАЦИИ ДИСПЕРСНЫХ ПРИМЕСЕЙ ГАЗОВОГО ТОПЛИВА ГОРОДСКИХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

5.1. Описание экспериментальной установки

Усовершенствованный циклонно-фильтрующий аппарат предназначен для очистки газового топлива от твёрдых частиц. Стендовые испытания проводились на воздухе. Конструкция циклона-фильтра для стендовых испытаний была разработана на базе серийного циклона ЦН-11 диаметром 200 мм [126, 127].

Рисунок 5.1.Экспериментальная установка на базе серийного циклона ЦН-11: 1 – коллектор, 2 – воздуховод, 3, 5, 6 – микроманометр, 4 – бункер, 7 – циклон, 8 – входной патрубок, 9, 11, 12 – порты доступа, 10 – выходной патрубок, 13 – ротаметр

Рисунок 5.2. Общий вид стендового циклона-фильтра

Схема экспериментального стенда для испытания циклона-фильтра приведена на рисунках 5.1-5.3. Установка (рисунок 5.3) состоит из коллектора, через который высоконапорным вентилятором (с диаметром лопастей 0,19 м и входным диаметром 0,135 м) засасывается воздух на трёх разных режимах. Режимы подачи воздуха регулировались изменением положения заслонки, расположенной на входном тракте вентилятора (рисунок 5.4). Давление потока измерялось прибором 3, расположенным за коллектором. Газодинамическое сопротивление определялось по данным измерения давления в точках 5 и 10. В порт доступа воздуховода (рисунок 5.3 поз.12) установлен импактор, служащий для определения дисперсного состава твёрдых частиц.

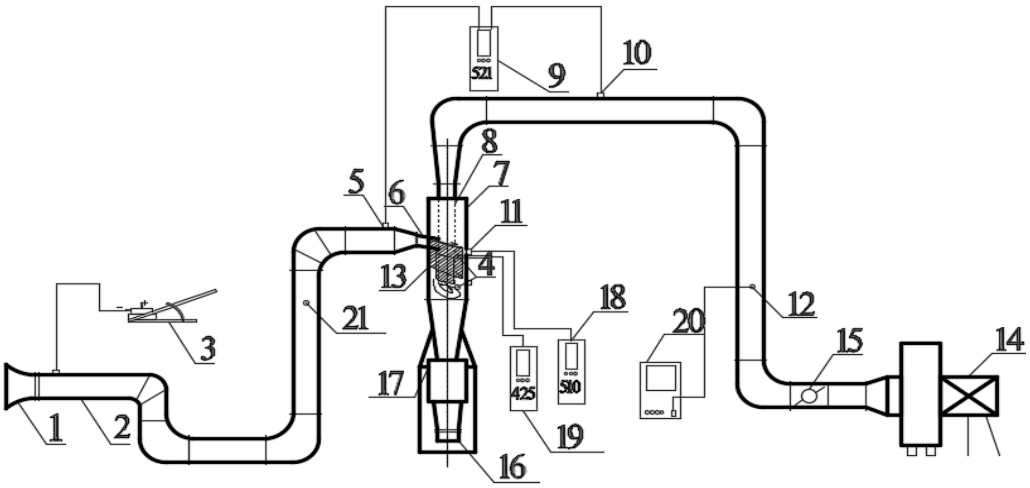


Рисунок 5.3. Экспериментальный стенд для испытания циклона-фильтра на базе серийного циклона ЦН-11: 1 – коллектор, 2 – воздуховод, 3 – микроманометр, 4,5,10,11,12,21 – порты доступа, 6 – входной патрубок, 7 – циклон, 8 – выхлопная труба, 9, 18 – дифференциальный манометр, 13 – тканевый фильтр, 14 – вентилятор, 15 – дроссель-клапан, 16 – герметичный затвор, 17 – бункер, 19 – термоанемометр, 20 – ротаметр

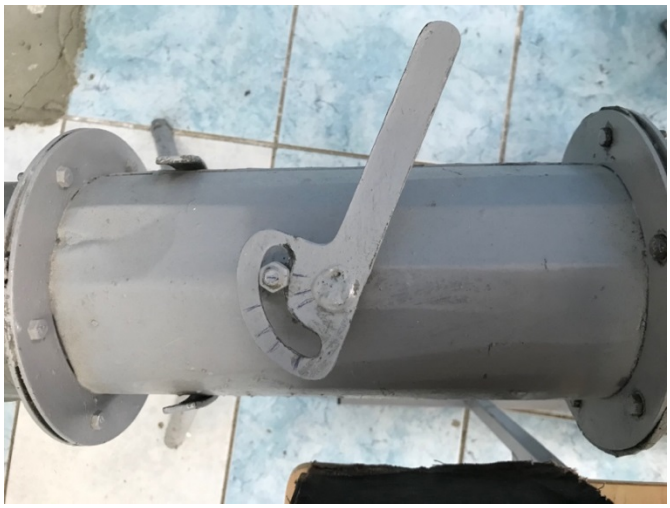


Рисунок 5.4. Установка положений дроссель-клапана

5.2. Методика измерений

5.2.1. Приготовление эталонной пробы пыли для проведения экспериментов

Для проведения стендовых испытаний циклона-фильтра был приготовлен специально сформированный дисперсный материал – шамотная пыль с размером частиц до 63 мкм [125]. Пробу материала для испытаний отбирали в соответствии с надлежащей лабораторной практикой по ГОСТ 33044-2014. Проба получена посредством следующих стандартных операций, производимых ручным способом: тонкого дробления предварительно измельченного шамотного материала, просеивания частиц через сито с размером ячеек 0,063 мм, истирания частиц размером 0,063 мм и менее, сокращения (квартования) полученной пыли. Отобранная проба, принятая за эталонную, подвергалась седиментационному анализу дисперсного состава в дистиллированной воде для определения медианного диаметра и дисперсии частиц пыли. Изменение массы оседающего в дисперсионной жидкости измельченного материала регистрировалось на торсионных весах ВТ-500 (рисунок 5.5).

Рисунок 5.5. Торсионные весы ВТ-500

Плотность дисперсионной жидкости и пикнометрическая плотность порошка определялись следующим образом. Масса m_1 чистого высушенного пикнометра вместимостью V=25 мл ($25 \cdot 10^{-6}$ м^3) составила 63,5 г. Затем пикнометр наполнялся на одну треть порошком и вновь взвешивался. При этом его масса m_2 составила 84,9 г. Далее в пикнометр постепенно приливалась дисперсионная жидкость, которую интенсивно перемешивали и встряхивали образующуюся суспензию. Затем жидкость доливалась до метки на пикнометре и взвешивалась. Масса пикнометра с суспензией m_3 составила 96,2 г. Масса суспензии (m_3-m_1)=32,7 г состоит из массы порошка $(m_2–m_1)=21,4$ г и массы добавленной жидкости. Для

определения плотности дисперсионной жидкости пикнометр опорожнялся и наполнялся до метки дисперсионной жидкостью. Затем определялась масса пикнометра с жидкостью (m_4=83,7 г). Взвешивания проводили с точностью 0,1 мг.

По результатам взвешиваний определяют плотность дисперсионной жидкости ρ_L, кг/м^3, и пикнометрическую плотность частиц ρ_{pp}, кг/м^3 (5.1, 5.2):

$$\rho_L = (m_4 - m_1)/V \tag{5.1}$$

$$\rho_L = \frac{(0,0837 - 0,0635)}{25 \cdot 10^{-6}} = 997 \text{ кг/м}^3$$

$$\rho_{pp} = \frac{(m_2 - m_1)\rho_L}{m_2 - m_1 - m_3 + m_4} \tag{5.2}$$

$$\rho_{pp} = \frac{(0,0849 - 0,0635) \cdot 997}{0,0849 - 0,0635 - 0,0962 + 0,0837} = 1990 \text{ кг/м}^3$$

По результатам взвешивания построили кривую оседания, т.е. график зависимости массы осадка m от времени оседания τ. Для монодисперсной системы эта зависимость выражается прямой OA (рисунок 5.6). При заданной концентрации пылевых частиц в жидкости и величине h угол наклона линии ОА зависит только от размера частиц. Радиус частиц определяется по формуле (5.4), где за параметры H и τ принимаются высота и время осаждения частиц с поверхности жидкости на чашку весов. Оседание более крупных частиц с радиусом r_1 описывается прямой OA_1, более мелких с радиусом r_2 - прямой OB_1. Ломаная OA_1B_1, полученная суммированием ординат графиков OA и OB, характеризует процесс суммарного осаждения частиц разных фракций.

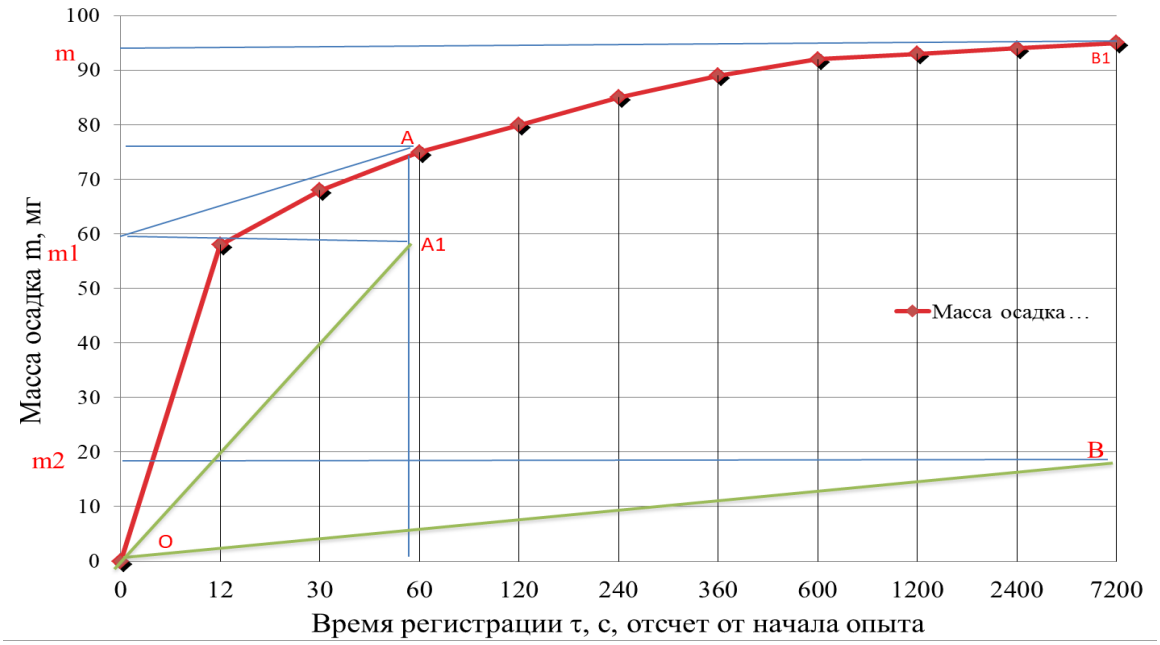


Рисунок 5.6. Оседание монодисперсных материалов OA, OB и их смеси OA_1B_1

В момент времени τ_1=12 сек. в точке A_1 появляется излом, соответствующий полному осаждению крупной фракции. Точка B_1 отвечает полному осаждению более мелкой фракции. Ордината точки A соответствует массе осевшей пыли крупной фракции m_1, ордината точки B_1 - массе всей осевшей пыли m, а разность ординат точек B_1 и A -массе осадка с радиусом частиц r_2, т.е. $m_2 = m - m_1$.

График оседания (рисунок 5.7) выражается плавной кривой, близкой к параболе - пределу ломаной линии с бесконечно малыми прямыми участками. На седиментационном графике в местах наибольшего изменения кривизны линии выбирают ряд точек, проводят касательные к кривым в этих точках и опускают из них перпендикуляры на ось абсцисс.

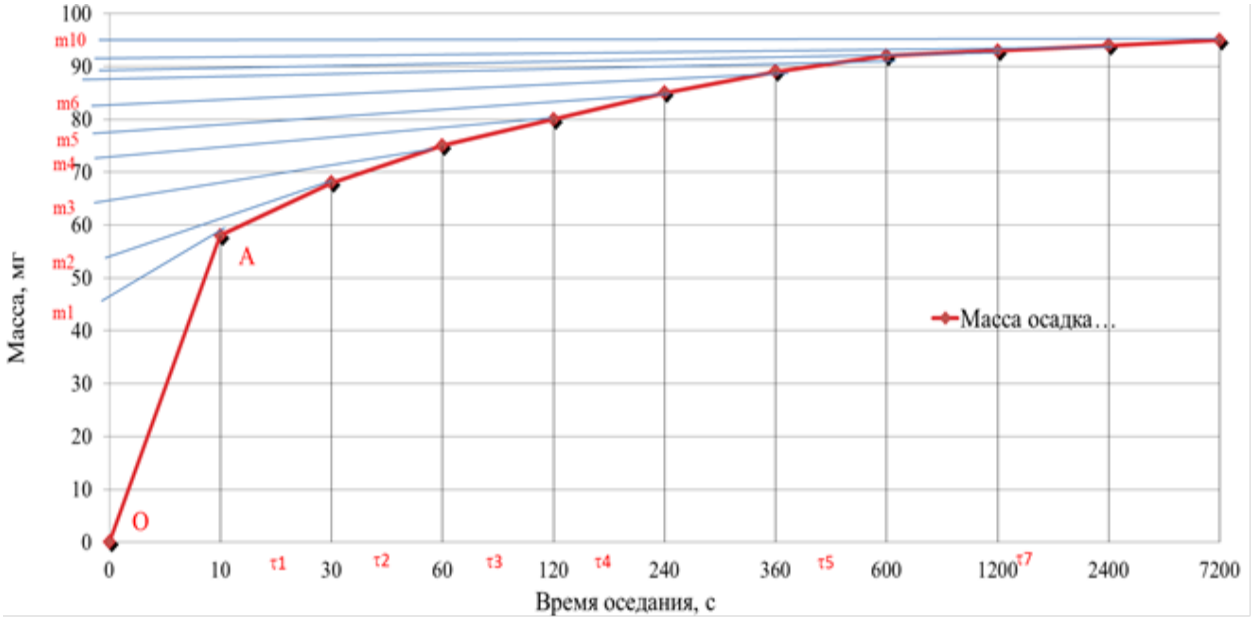


Рисунок 5.7.Оседание полидисперсной системы частиц

Участок OA соответствует осаждению самых крупных частиц общей массой m_1 за время τ_1. Следующая, более мелкая, фракция с массой $m_2 - m_1$, осаждается за время τ_2. Ордината m_{10} отвечает полному оседанию всей фазы, и ей соответствует время τ_{10}. Длина отрезка на оси ординат является мерой доли фракции порошка. Приняв ее за 100%, выражают содержание p_1 отдельных фракций дисперсной системы в процентах от общей массы вещества в интегральном или дифференциальном (5.3) представлении:

$$p_i = 100\frac{m_i}{m_{10}}, \qquad p_i = 100\frac{(m_i - m_{i-1})}{m_{10}} \tag{5.3}$$

Значения τ_1, τ_2, τ_n откладывают по оси абсцисс. Из этих точек восстанавливают перпендикуляры к оси абсцисс до пересечения с седиментационной кривой. В точках пересечения проводят касательные к седиментационной кривой до пересечения с осью ординат.

Если начальный участок кривой прямолинейный, то его продлевают, и из точки отрыва касательной от кривой опускают перпендикуляр на ось абсцисс. Отрезок ординаты от 0 до пересечения с первой касательной соответствует массе наиболее крупной фракции m_1=46 мг, а последний отрезок (на рис. 5.2 это отрезок m_9-m_{10}=2 мг) даст массу частиц самой мелкой фракции.

Для седиментационного анализа брали из просеянной пробы количество материала, достаточное для приготовления суспензии с объемной долей взвеси до 0,5... 1 %. В дальнейшем по результатам опытных замеров на основании закона Стокса получили размеры частиц (5.4):

$$r = \sqrt{\frac{9\eta H}{2(\rho_p - \rho_G)g\tau}}, \qquad (5.4)$$

где H – высота оседания частиц, м; τ – время оседания, с; $V=H/\tau$ – скорость оседания, м/с; r– радиус частиц, м; ρ_p– плотность частиц, кг/м^3; ρ_G – плотность газовой среды, кг/м^3; η – динамический коэффициент вязкости, Па·с.

Радиусы частиц r, полученные по результатам седиментационного анализа, находятся в пределах от 0,55 мкм до 30,47 мкм (таблица 5.1). Медианный диаметр частиц D_{50} =12,4мкм, дисперсия σ_p=2,1. По седиментации найдено процентное содержание отдельных фракций в пыли (таблица 5.2). Как видим, наибольший диаметр частиц пыли по результатам седиментационного анализа получился равным 60,94 мкм, процентное содержание таких частиц согласно таблицы 5.2. составляет 31,95% с концентрацией 470,37 мг/м^3.

Таблица 5.1.

Результаты седиментационного анализа

№ фракции	Время осаждения, с		Радиус фракции, мкм		Δr, мкм	P_i, %	ΔP, %
	τ_{min}	τ_{max}	r_{max}	r_{min}			
1	12	30	30,47	19,27	11,20	4,24	4,24
2	30	60	19,27	13,63	5,64	7,10	11,34
3	60	120	13,63	9,64	3,99	8,50	19,84
4	120	240	9,64	6,81	2,82	11,65	31,49
5	240	360	6,81	5,56	1,25	14,60	46,09
6	360	600	5,56	4,31	1,25	19,38	65,47
7	600	1200	4,31	3,05	1,26	9,20	74,67
8	1200	2400	3,05	2,15	0,89	7,34	82,01
9	2400	4800	2,15	1,52	0,63	6,93	88,94
10	4800	7200	1,52	1,24	0,28	5,99	94,93
11	7200	9000	1,24	0,55	0,13	5,07	100,00

Таблица 5.2.

Масса пыли определенной фракции по седиментации, мг

Масса пыли на входе, мг	Размер фракции, мкм	Содержание отдельных фракций, %	Масса пыли определенной фракции, г	Концентрация фракций, мг/м^3
140,9	60,94	4,24	61,82	470,37
140,9	38,54	7,10	17,25	131,27
140,9	27,25	8,50	14,38	109,39
140,9	19,27	11,65	10,06	76,57
140,9	13,63	14,60	8,63	65,63
140,9	11,13	19,38	8,63	65,63
140,9	8,62	9,20	7,19	54,69
140,9	6,09	7,34	4,31	32,82
140,9	4,31	6,93	2,88	21,88
140,9	3,05	5,99	2,88	21,88
140,9	1,1	5,07	1,44	10,94
ИТОГО			**140,9**	**1072**

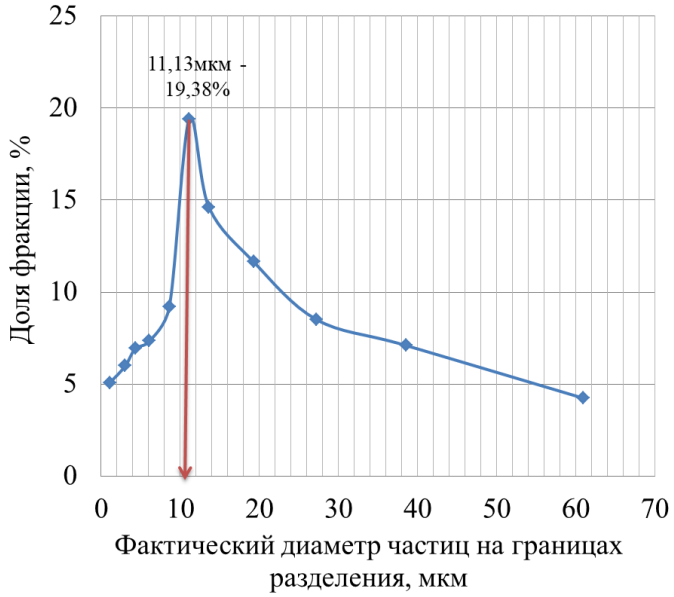


Рисунок 5.8. Дифференциальный график дисперсного состава пыли по результатам седиментационного анализа

Согласно таблицы 5.2 построен дифференциальный график дисперсного состава пыли определённый методом седиментации, по которому максимальная доля фракций 19,38 % соответствует частицам размером 11,13 мкм.

5.2.2. Определение дисперсного состава пыли после прохождения циклона-фильтра

Дисперсный состав пыли после прохождения циклона-фильтра определялся следующим образом. В порт доступа 12 устанавливался импактор 20, который обеспечивал определение дисперсного состава пыли после циклона-фильтра. Принцип действия каскадного импактора основан на избирательном осаждении частиц с различными аэродинамическими параметрами. В корпусе импактора устанавливаются попарно направляющие сопла и экраны - ступени импактора. В импакторе шесть ступеней импакции, которые состоят из пяти пар дисков и фильтра. Номер каждой ступени импакции условно соответствует осадительной подложке диска с тем же номером. Запыленный поток, поступая в центральное сопло первого диска, приобретает определенную скорость и после выхода из сопла изменяет свое направление на 90°, чтобы попасть в периферийные сопла второго диска. При этом наиболее крупные частички пыли под действием инерционных сил попадают на поверхность смазки в выемке второго диска и оседают на ней. Более мелкие и соответственно менее инерционные частицы уносятся с потоком газов и проходят через сопла второго диска. Суммарное сечение этих сопл равно сечению сопла первого диска. Поэтому скорость газового потока на выходе из сопл второго диска будет такой же, и в выемке третьего диска осядут частицы пыли того же размера, которые не осели на смазке в выемке второго диска. Следующее сопло, через которое проходит газовый поток, имеет меньший диаметр, т.е. скорость истечения будет несколько больше, и на подложке в соответствующей выемке осядут частицы меньшего размера, чем на предшествующих двух дисках.

Таким образом, на каждой паре последовательно установленных дисков будет осаждаться определенная фракция пыли. Собранный импактор соединён резиновым шлангом с аспиратором. Предварительно убедились в герметичности сборки при рабочем расходе, временно заглушив заборный наконечник входной трубки. Перед началом отбора наконечник с входной трубкой установили навстречу потоку отбираемого газа, затем выходную трубку импактора закрепили в требуемом положении.

5.2.3. Регистрация числа частиц, осажденных на поверхности фильтра

Для определения счётной концентрации пыли, уловленной в циклоне-фильтре, пробы фильтрующего материала отбирались следующим образом. Для проведения стендовых испытаний выбрали фильтрующий материал – лавсан, эффективная поверхность фильтрации 0,2 м^2, габаритные размеры фильтра (ширина/высота): 0,6х0,4м (рисунок 5.9), размер ячейки фильтра - от 28 мкм, диаметр нити от 15 до 40 мкм, поверхностная плотность 114 г/м^2.

Рисунок 5.9. Фильтровальный материал до проведения стендовых испытаний

После проведения каждой серии стендовых испытаний при трёх разных режимах вентилятора с начала, с середины и с конца фильтровального материала вырезались образцы размером 0,05х0,05 м (рисунок 5.10). Все процедуры выполнялись с максимальной осторожностью, во избежание рассыпки и встряхиваний пыли, осажденной на фильтре. Перенос фильтра к месту исследований под микроскопом осуществлялся в контейнере.

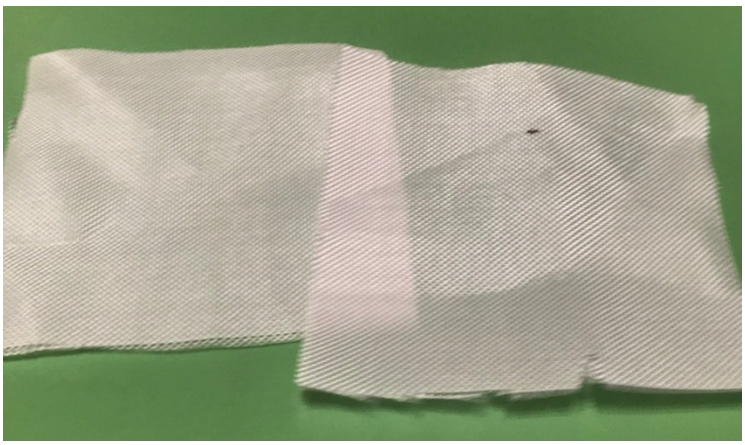


Рисунок 5.10. Образцы фильтровального материала

Для исследований фильтровального материала был использован микроскоп МИН-8 совместно с дополнительным освещением (рисунок 5.11) для изучения непрозрачных объектов в отраженном свете. На наклонную насадку микроскопа устанавливалась цифровая камера фотоаппарата (разрешение камеры 12 мегапикселей; объектив с диафрагмой F/1,8 поглощает на 50 % больше света для увеличения контрастности и улучшения качества снимков в условиях плохой освещенности), после чего добивались фокусировки микроскопом. Для создания четкого изображения запыленной поверхности фильтра была организована дополнительная подсветка к обычному освещению предметного столика (лампой накаливания справа и сверху), а также к общему освещению комнаты люминесцентными лампами и солнечным светом из окна.

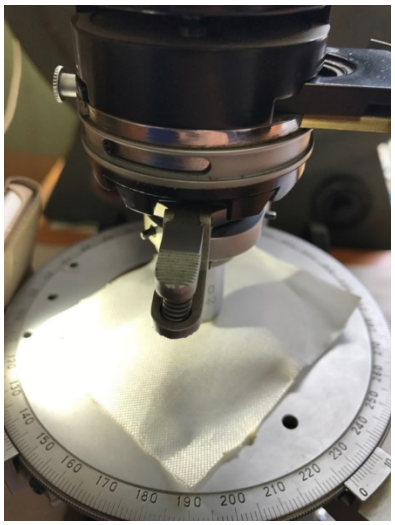


Рисунок 5.11. Изучение фильтра с помощью оптического микроскопа

При микроскопии осажденных на поверхности фильтра частиц шамота, отличающихся от окружающей среды только по показателю преломления, изменения интенсивности света (амплитуды) не происходит, а изменяется только фаза световых волн, и наблюдаемые объекты выглядят малоконтрастными, что и позволило в дальнейшем провести определение счетного количества осажденных частиц шамота на поверхности фильтра.

5.2.4. Измерения давления, массы и скорости

В ходе проведения стендовых испытаний расход воздуха на входе в циклон замерялся при помощи коллектора с внутренним диаметром 140 мм и микроманометра ММН-240 (рисунок 5.12), а для определения сопротивления циклона измеряется значения давлений в точках 5 и 10 дифференциальным манометром *Testo* 521 (рисунок 5.13, а) (копии паспорта и свидетельства о поверке прилагаются в приложении Ж).

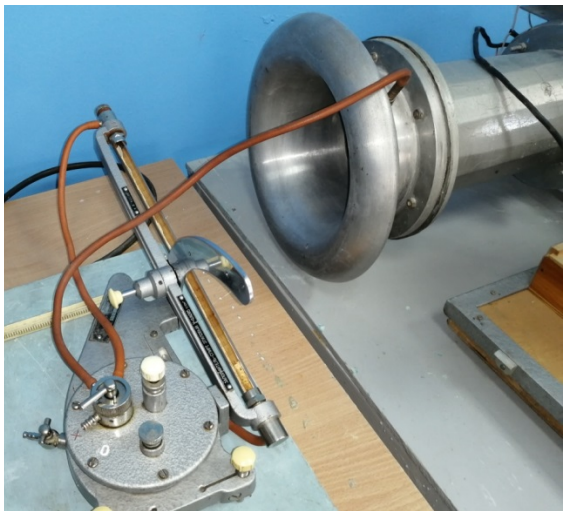


Рисунок 5.12. Схема измерения расхода воздуха на входе в циклон

Для повторных измерений разрежения в циклоне в верхней и нижних точках *A* и *B* (порты 4, рисунок 5.3) использовали электронный дифференциальный манометр модель *Testo* 510 (рисунок 5.13, б).

а) б)

Рисунок 5.13. Манометр: а) модель *Testo* 521, б) модель *Testo* 510

Входная скорость в циклон-фильтр определена с помощью термоанемометра *Testo* 425, помещенного в порт 21 (рисунок 5.3). Точный расчет обеспечивается благодаря тому, что зонд легко помещается в воздуховод.

Рисунок 5.14. Измерения тангенциальных и осевых скоростей потока в кольцевом пространстве циклона при помощи термоанемометра *Testo* 425

Распределения тангенциальных и осевых скоростей потока в кольцевом пространстве циклона получены при помощи данного термоанемометра *Testo* 425 через отверстия в циклоне в верхней точке *B* и нижней точке *A* (порты 4, рисунок 5.3) со стационарно подсоединенным зондом скорости воздуха и телескопической рукояткой. Функция усреднения по времени и количеству замеров, позволяет получить усредненные значения скорости потока. Функция Hold позволяет зафиксировать текущие значения измерений на дисплее (рисунок 5.14).

Изменения массы фильтра после испытаний проводили на аналитических весах ВЛА-200г-М. После каждой серии опытов проводили измерение фильтра, осторожно сняв его из циклона, для определения изменения массы.

5.3. Проведение стендовых испытаний

После проведения всех подготовительных работ включается высоконапорный вентилятор 14. На шкалах микроманометров и ротаметра регистрируются показания. Входная скорость в циклон замеряется до запыления термоанемометром 19 (модель *Testo* 425), установленным в круглый порт доступа 21. Далее запыленный воздух протягивается через циклон 7 высоконапорным вентилятором 14. Шамотная пыль в порошкообразном состоянии через измерительный коллектор 1 подается из пылепитателя в воздуховод 2 диаметром 140 мм. Скорость запыленного потока на входе в систему определяется при помощи входного коллектора и микроманометра 3. Запыленный поток проходит по воздуховоду во входной патрубок циклона 7 и попадает в кольцевое пространство, образованное корпусом, тканевым фильтром 13 и выхлопной трубой 8. Крупные частицы вследствие инерционности отделяются от криволинейного потока и соударяются со стенкой циклона 7, далее под действием гравитационных сил падают в бункер 17 с герметичным затвором 16. Фракции пыли среднего и мелкого размера задерживаются тканевым фильтром 13. Воздушный поток совершает движение вниз по винтовой траектории, разворачивается перед бункером вверх и выходит по восходящей винтовой траектории через выхлопную трубу 8. Сопротивление циклона определяется по данным дифференциального манометра 9 (модель *Testo* 521), установленного в порт доступа 5 и 10. Перед высоконапорным вентилятором в воздуховод в порт доступа 12 установлен импактор с входным соплом, диаметр которого подбирался с соблюдением условия изокинетичности (рисунок 5.15). По показанию ротаметра устанавливается требуемое значение расхода воздуха, которое соответствует заданному объемному расходу пробоотбора (рисунок 5.16). По ходу отбора регистрировались скорость и давление запылённого газа в воздуховодах на входе и выходе из циклона, также фиксировались атмосферное давление и температура наружного воздуха.

Рисунок 5.15. Расположение импактора и ротаметра: 1,2,4,6-порт доступа, 3-циклон, 5-воздуховод, 7,9-микроманометр, 8-трубка импактора, 10-ротаметр, 11-высоконапорный вентилятор

Рисунок 5.16. Ротаметр

Конструктивная схема циклона-фильтра на базе возвратно-поточного циклона ЦН-11-200 с указанием точек замеров представлена на рисунке 5.17. По диаметру выхлопной трубы внутри корпуса циклона установлена фильтровальная вставка 5 из лавсана, зафиксированная в металлическом каркасе 6. Снаружи цилиндрического корпуса 2, установлены продувочные штуцера 7, необходимые для регенерации фильтра, также имеются детали крепежа 10 цилиндрического корпуса к коническому днищу, необходимые для замены каркаса с фильтром. Ниже входного патрубка между основной фильтровальной вставкой и выхлопной трубой установлен поперечный фильтр 11. По диаметру от выхлопной трубы в нижней его части до фильтровальной вставки 5 установлен горизонтальный фильтр, одна часть которой из ткани 12, а другая металлическая 13. Данная вставка закреплена с одной стороны на пластине с пружиной 14, с другой стороны на кольцах к стержню 15. Металлическая часть горизонтального фильтра закреплена на складывающемся фильтре 16.

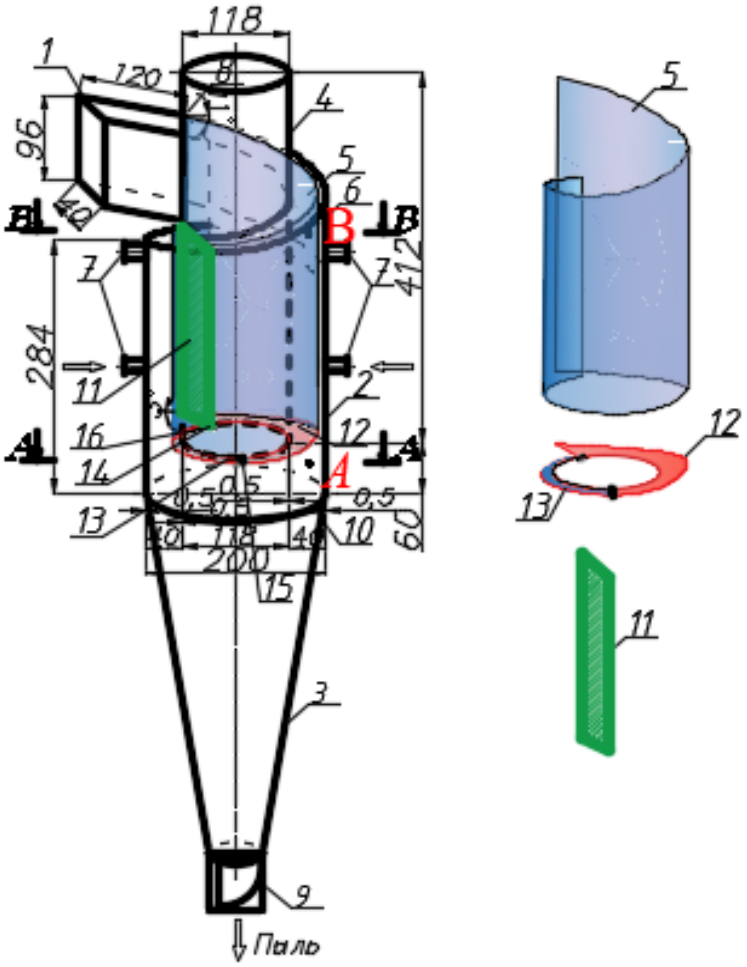


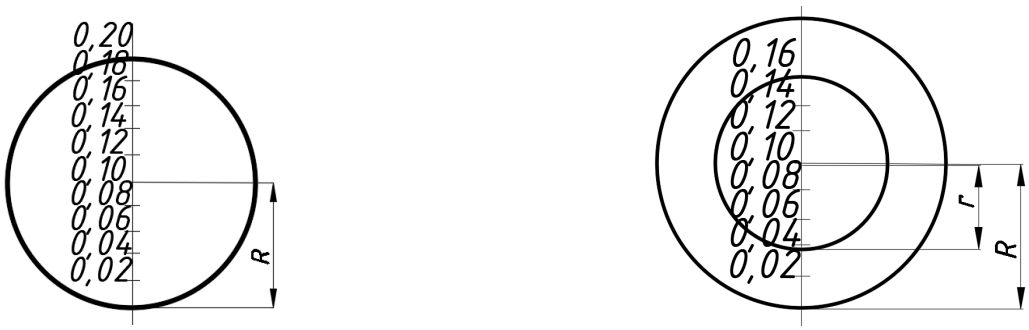
Рисунок 5.17.Схема конструкции циклона-фильтра:1 - входной патрубок; 2 - цилиндрический корпус; 3 - коническое днище; 4 - выхлопная труба; 5 - фильтровальный материал; 6 - металлический каркас; 7 - продувочные штуцера; 8 - торец циклона; 9 - заслонка; 10 - детали крепежа; 11 - поперечный фильтр; 12 - горизонтальный фильтр, тканая часть; 13 - горизонтальный фильтр, металлическая часть; 14 - пластина с пружиной; 15 - стержень с кольцами; 16 – складывающийся фильтр

На рисунке 5.18. представлена фотография сборки фильтра с установкой фильтровального материала на проволочном каркасе в цилиндрическую часть корпуса циклона. Можно видеть, что материал по спирали вплотную подходит к нижней части выхлопной трубы. После его закрепления устанавливаются поперечная и горизонтальная части фильтра.

В приложении А представлена конструкция разработанного циклона-фильтра, а инструкция по его эксплуатации в приложении Б.

Рисунок 5.18. Оснащение цилиндрического корпуса циклона фильтровальным материалом

Схема расположения точек измерения давлений и скоростей в корпусе циклона приведена на рисунке 5.19. Измерения проводились в разных точках на расстоянии *x/r,* где *x* – расстояние от стенки до точки измерений, *r* – радиус циклона $0 \leq x \leq 0{,}2$.



а) б)

Рисунок 5.19. Схема расположения точек измерения давлений и скоростей в корпусе циклона: а) в сечении *A-A*; б) в сечении *B-B,* где *R*-радиус циклона, *r*-радиус выхлопной трубы

На корпусе экспериментальной установки были проделаны отверстия $D_{отв}$=9мм. Измерения осевой, тангенциальной скорости и разрежения в циклоне проводились на трёх режимах работы вентилятора в поперечном сечении *A-A* в девяти точках и в сечении *B-B* в семи точках замера.

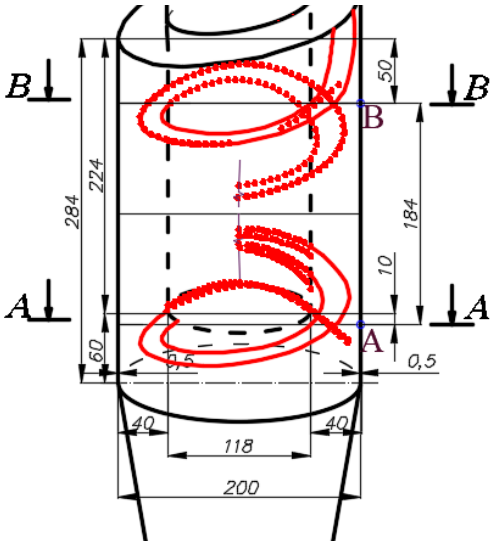


Рисунок 5.20. Цилиндрическая часть циклона-фильтра с указанием расстояний до точек *A* и *B*

В циклоне в сечении *A-A* (рисунок 5.20) найдены тангенциальные и осевые скорости потока с помощью термоанемометра модель *Testo* 425 по 30 измерений в каждой точке. Усредненные значения результатов измерений приведены на рисунках 5.21-5.24.

Распределение тангенциальных и осевых скоростей потока в кольцевом пространстве циклона получены экспериментально, когда как замерить радиальную составляющую ввиду конструктивных особенностей циклона не представлялось возможным. Поэтому приведенные на рисунках 5.21-5.24 значения, радиальных составляющих скорости потока в циклоне были получены посредством численного эксперимента [125].

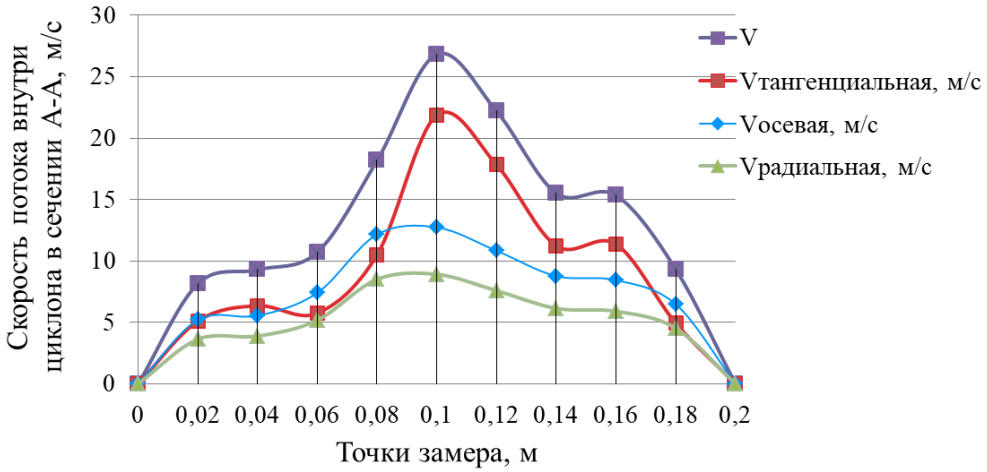


Рисунок 5.21. Зависимости составляющих компонентов скорости незапылённого воздушного потока в циклоне в сечении *A-A* от расстояния *x/r*, при среднем расходе *Q*=0,07 м^3/с

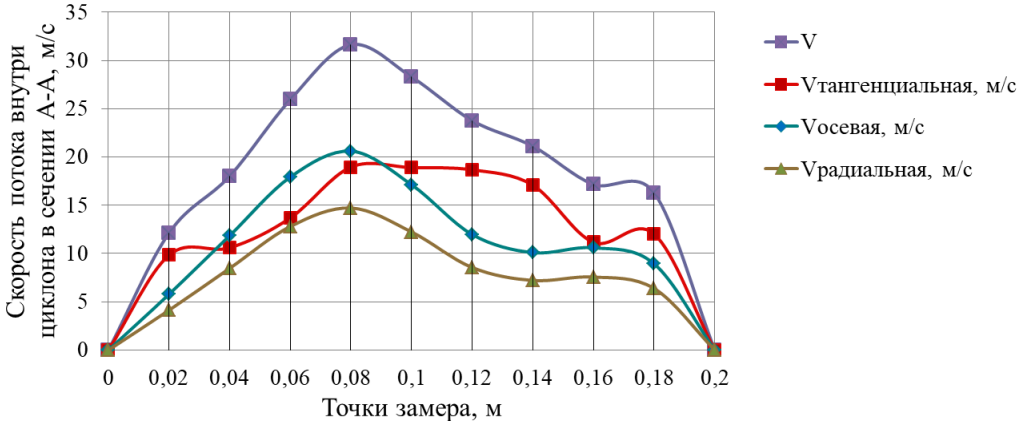


Рисунок 5.22. Зависимости составляющих компонентов скорости незапыленного воздушного потока в циклоне в сечении *А-А* от расстояния *x/r*, при среднем расходе *Q*=0,05 м^3/с

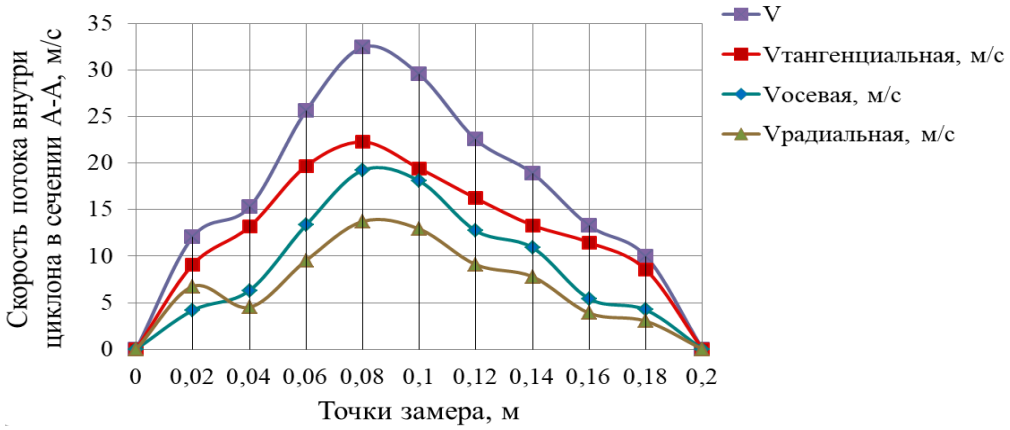


Рисунок 5.23. Зависимости составляющих компонентов скорости незапыленного воздушного потока в циклоне в сечении *А-А* от расстояния *x/r*, при среднем расходе *Q*=0,03 м^3/с

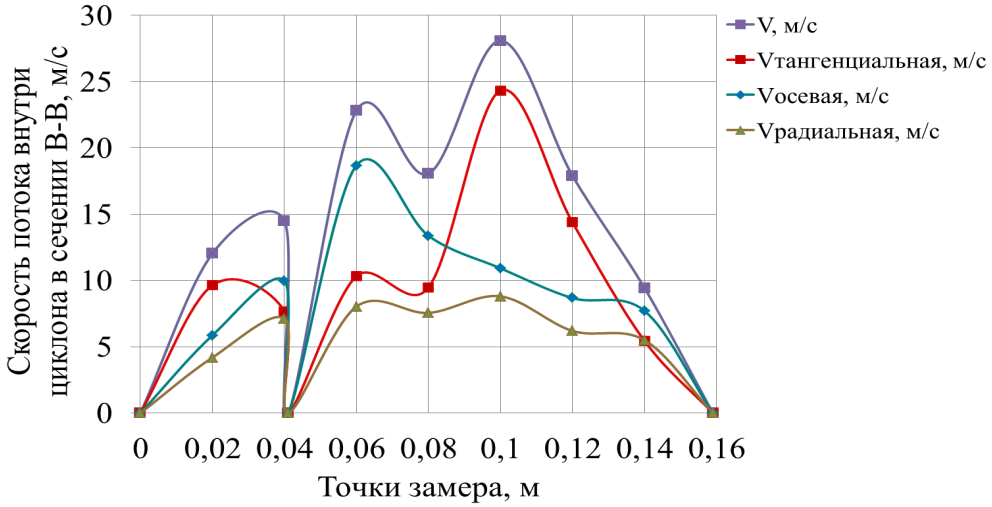


Рисунок 5.24. Зависимости составляющих компонентов скорости незапыленного воздушного потока в циклоне в сечении *В-В* от расстояния *x/r*, при среднем расходе *Q*=0,07 м^3/с

Тангенциальная скорость потока в циклоне варьируется в зависимости от точки замера в сечении *А-А* в пределах 4,94…21,87 м/с, а в сечении *В-В* 7,33…24,34 м/с. Осевая скорость

внутри циклона варьируется в зависимости от точки замера в сечении *А-А* в пределах 5,2…12,73 м/с, а в сечении *В-В* 5,87…18,68 м/с. Усреднённая скорость в циклоне-фильтре в сечении *А-А* при расходе Q=0,07 м^3/с равна 14,0 м/с, что в 4 раза больше, чем у стандартных циклонов ЦН-11.

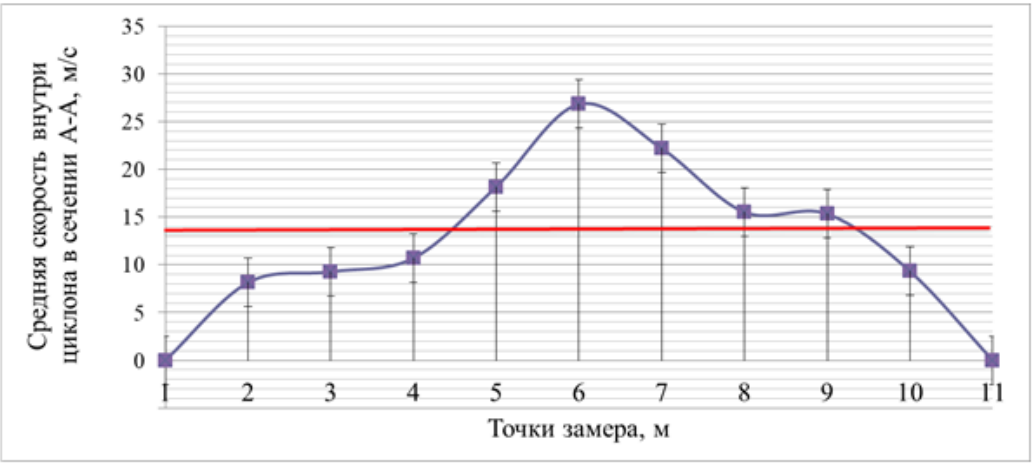


Рисунок 5.25. Зависимости составляющих компонентов скорости незапыленного воздушного потока в циклоне в сечении *А-А* от расстояния x/r, при среднем расходе Q=0,07 м^3/с

На рисунке 5.25 приведена схема расположения чувствительного элемента зонда термоанемометра. Чтобы измерить им радиальную скорость, нужно было бы проделать 9 отверстий в верхней части циклона (на рисунке 5.25 изображено пунктиром), что конструктивно невозможно.

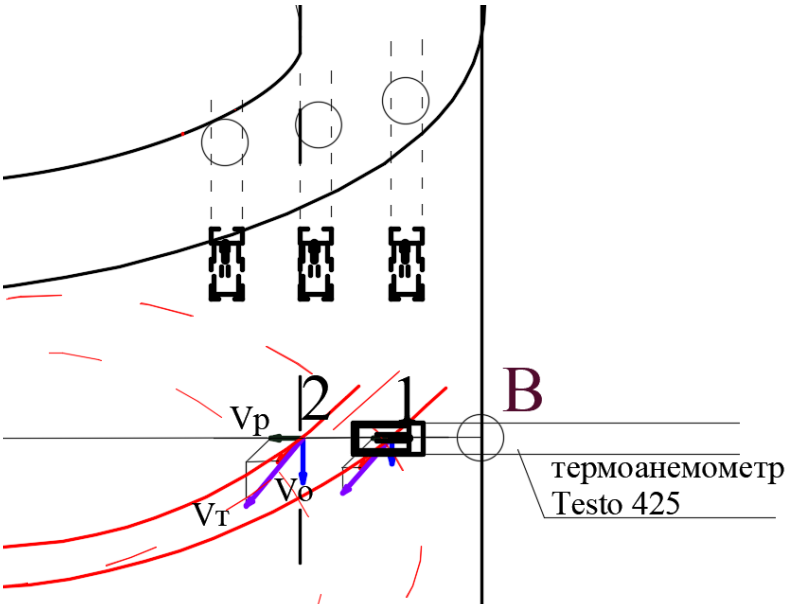


Рисунок 5.25. Схема расположения чувствительного элемента зонда в точке *В*

Значения радиальных составляющих скорости потока в циклоне, полученные посредством численного эксперимента, были сопряжены с тангенциальными и осевыми проекциями

скорости, полученными с помощью термоанемометра в циклоне в верхней точке *B* и в нижней точке *A*. Для этого значения указанных трех проекций были перенесены в трёхмерную систему *AutoCAD*. Из каждой точки замера по масштабу проведены вектора этих проекций и построен параллелепипед скоростей, диагональ которого определяет направление вектора скорости (рисунок 5.26).

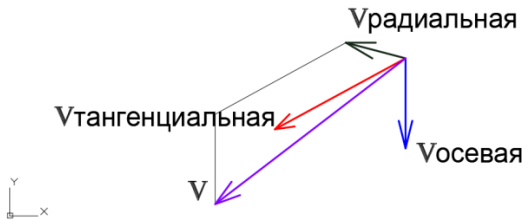


Рисунок 5.26. Векторы скоростей потока, построенные в точке замера

Для нахождения траектории движения частиц вычислили вектор скорости в сечении *B-B* и *A-A*. На рисунке 5.27 приведена схема движения потока в циклоне, где представлена траектория движения потока, тангенциальная и осевые скорости, найденные из опытных исследований, и радиальная скорость, полученная методом численного моделирования.

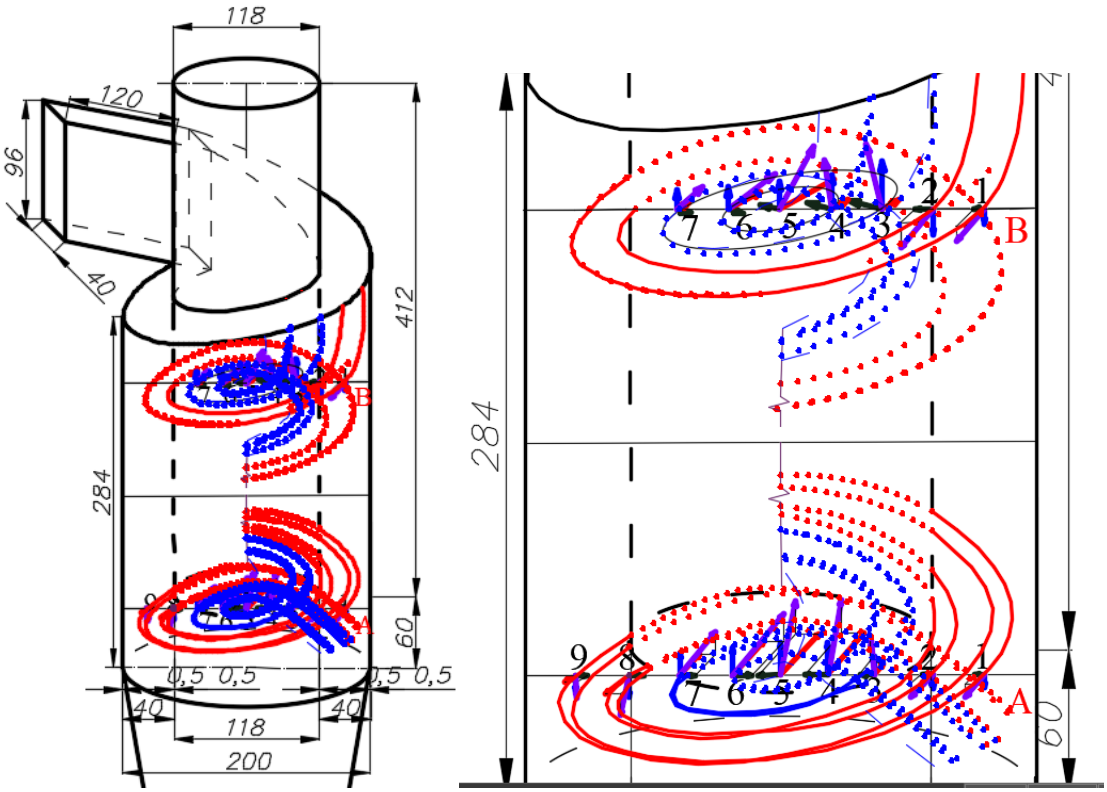


Рисунок 5.27. Схема движения потока в продольном сечении циклона:

→– тангенциальная скорость потока, →– осевая скорость потока; →– радиальная скорость

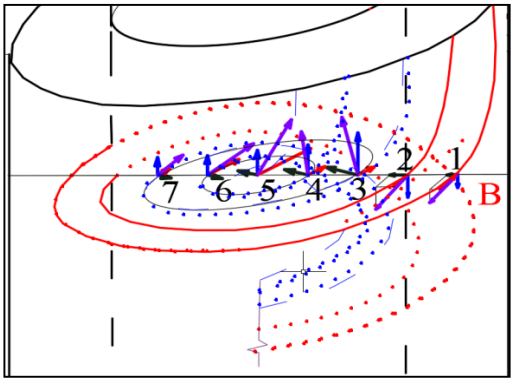


Рисунок 5.28. Траектория движения потока в циклоне в верхней точке *B*

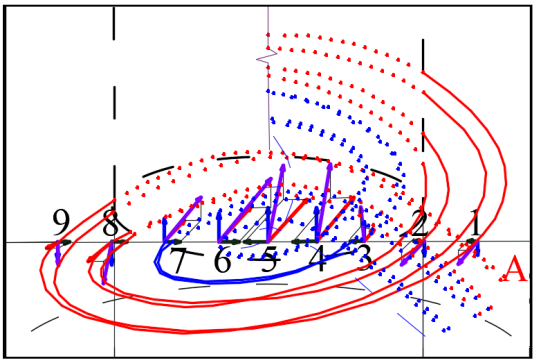


Рисунок 5.29. Траектория движения потока в циклоне в нижней точке *A*

На рисунках 5.28, 5.29 представлены траектории движения частиц в циклоне в сечении *B-B* и сечении *A-A* в точках замера.

Результаты измерения разрежения в циклоне, измеренного дифманометром модель *Testo* 510 в портах доступа 4 (рисунок 5.3), представлены на рисунках 5.30, 5.31, 5.32.

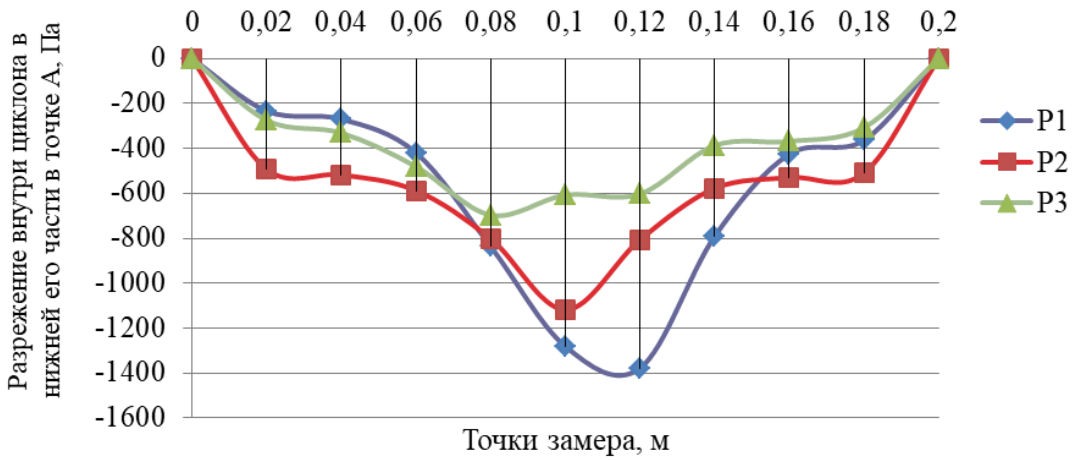


Рисунок 5.30. Зависимость давления в полости циклона без подачи пыли в сечении *A-A* от расстояния *x/r* при средних расходах: P_1 - при первом режиме дроссель-клапана (Q=0,07 м^3/с), P_2 - при втором режиме дроссель-клапана (Q=0,05 м^3/с), P_3 - при третьем режиме дроссель-клапана (Q=0,03 м^3/с)

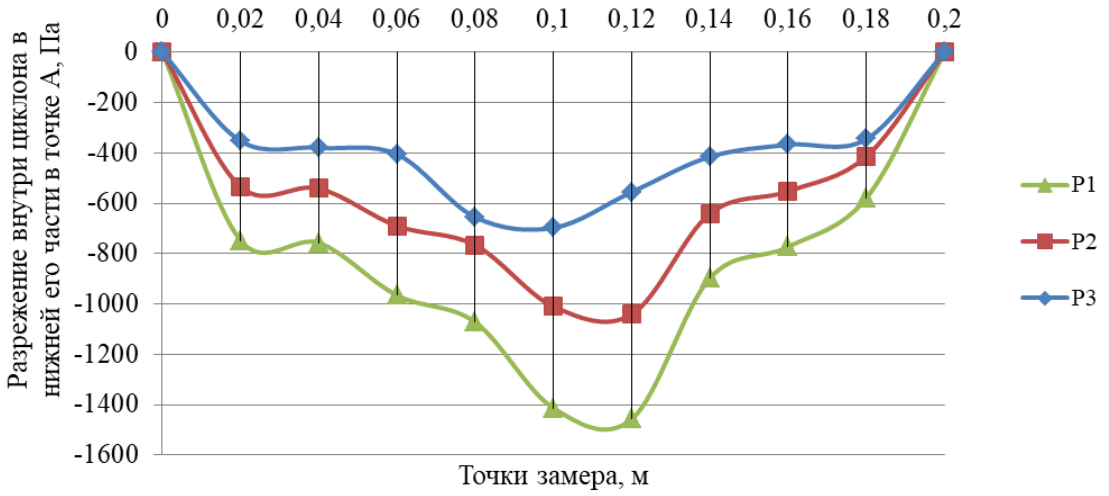


Рисунок 5.31. Зависимость давления в полости циклона с запылением в сечении *А-А* от расстояния *x/r* при средних расходах: P_1 - при первом режиме дроссель-клапана (Q=0,07 м^3/с), P_2 - при втором режиме дроссель-клапана (Q=0,05 м^3/с), P_3 - при третьем режиме дроссель-клапана (Q=0,03 м^3/с)

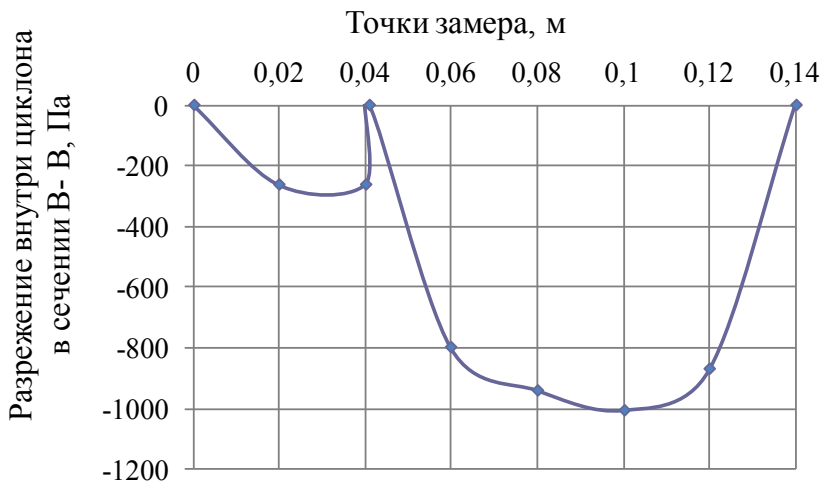


Рисунок 5.32. Зависимость давления в полости циклона без подачи пыли в сечении *В-В* от расстояния *x/r* при среднем расходе Q=0,07 м^3/с

Разрежение внутри циклона без подачи пыли в сечении *А-А* при первом положении дроссель-клапана составила 233,36…1378,00 Па, при третьем положении дроссель-клапана 274,55…696,45 Па, а с запылением 578,20…1456,84 Па и 344,33…696,83 Па при первом и третьем положении дроссель-клапана соответственно.

Результаты измерения сопротивления циклона и циклона-фильтра представлены на рисунках 5.33 и 5.34.

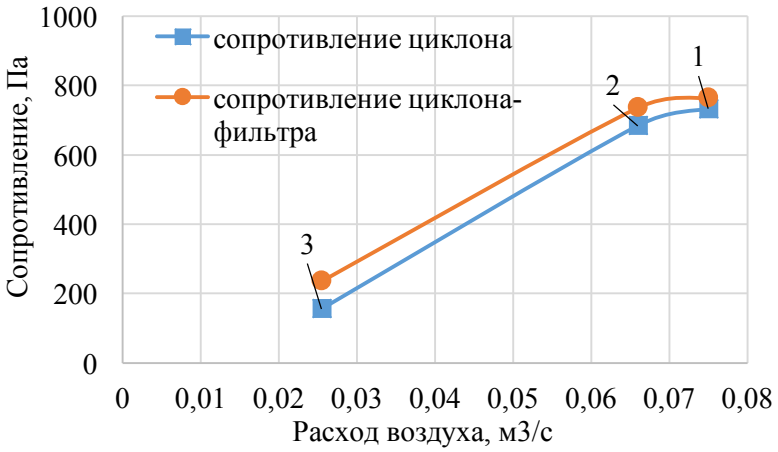


Рисунок 5.33. Зависимость сопротивления циклона (с фильтром и без) от расхода воздуха

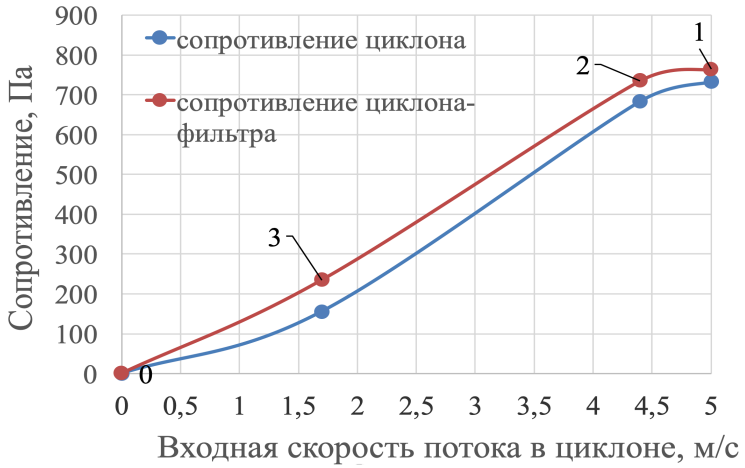


Рис.5.34. Зависимость сопротивления от входной скорости потока в циклон, при 1 - Q=0,07 м^3/с, 2 - Q=0,05 м^3/с, 3 - Q=0,03 м^3/с

В ходе экспериментов проведена проверка воспроизводимости результатов опытов и определены погрешности полученных соотношений. Воспроизводимость результатов исследований определялась по трём сериям параллельных опытов по критерию Кохрена. Замеры скоростей и давлений проводились в 9 точках сечения *А-А* и в 7 точках сечения *В-В*, по 30 замеров в каждой точке. Определение погрешностей результатов экспериментальных исследований, верификация и валидация результатов теоретических и численных расчётов по данным экспериментальных расчётов приведены в приложении Е. Воспроизводимость по трём сериям опытов по критерию Кохрена свидетельствует, что опыты воспроизводимы, а оценки дисперсий однородны. При этом ошибка эксперимента для степени доверительной вероятности 95%, по векторной скорости потока в пятой точке замера сечения *А-А* равна (27,93±2,52) м/с (точность измерений 9%), в сечении *В-В* (28,1±2,36) м/с (точность измерений 8,4%). Погрешность измерения разрежения потока в сечении *А-А* в пятой точке замера составила (699,0±26,0) Па, в сечении *В-В* - (1017,3±38,4) Па, (точность измерений 3,7%). Верификация экспериментальных данных и результатов численного исследования показала, что

относительная погрешность расчета по скорости в сечении *А-А* составила $\Delta\overline{V}_5$ =7,4%, в сечении *В-В* - $\Delta\overline{V}_5$ =12,2%. Погрешность измерений давления в сечении *А-А* составила ΔP_5=16,3%, в сечении *В-В* - ΔP_5= 4,4%.

Для определения степени осаждения эталонной пыли в циклоне-фильтре была проведена серия испытаний из 20 опытов (таблица 5.3).

Таблица 5.3.

Результаты испытания циклона-фильтра

№ п/п	Масса пыли для испытаний $m_{исх}$, 10^{-3} кг	Фильтровальная ткань			Масса пыли, осевшей на стенках циклона и в бункере, $m_{ст}$, 10^{-3} кг	Масса пыли, осевшей в воздуховоде до циклона, $m_в$, 10^{-3} кг	Масса пыли на ступенях импактора	Эффективность в %	Продолжительность опыта, с	Расход воздуха, $Q_{возд.}$, м^3/с	Сопротивление циклона, Па	Расход пыли, $Q_{пыли}$, 10^{-6} кг/с	Концентрация пыли, C, 10^{-3} кг/м^3
		Масса до опыта, $m_{нач}$, 10^{-3} кг	Масса после опыта, $m_{кон}$, 10^{-3} кг	Масса осевшей пыли, m, 10^{-3} кг									
1	138,0	26,2	101,0	74,8	39,0	23,0	0,026	98,96	1800	0,07	710	0,077	1,09
2	143,6	28,9	113,0	84,1	38,2	20,0	0,009	98,96	1250	0,07	714	0,115	0,96
3	161,4	30,4	125,0	94,6	38,2	27,3	0,011	99,03	1300	0,07	716	0,124	1,10
4	123,0	31,0	110,0	79,0	25,0	18,0	0,015	99,05	1250	0,07	720	0,098	1,12
5	127,4	31,5	118,0	86,5	19,0	20,6	0,019	98,80	1600	0,07	723	0,080	0,97
6	142,0	34,0	120,5	86,5	34,0	21,0	0,028	99,59	1500	0,07	725	0,095	0,99
7	129,3	37,0	126,4	89,4	19,4	20,0	0,019	99,54	1800	0,07	730	0,072	0,95
8	145,2	42,0	138,8	96,8	28,0	19,0	0,021	98,89	2000	0,07	733	0,073	0,89
9	143,0	43,0	140,1	97,1	25,1	20,0	0,032	99,35	2200	0,07	736	0,065	1,04
10	148,6	48,0	145,3	97,3	27,5	23,0	0,011	99,36	1800	0,07	737	0,083	0,95
11	136,0	49,0	143,6	94,6	26,0	15,0	0,021	99,67	1600	0,07	742	0,085	0,99
12	131,0	49,2	139,0	89,8	23,0	18,0	0,018	99,82	1400	0,07	746	0,094	1,05
13	117,0	51,0	125,0	74,0	19,0	23,0	0,022	98,94	2500	0,07	750	0,047	1,03
14	139,0	51,8	142,0	90,2	23,5	25,0	0,034	99,74	3200	0,07	753	0,043	1,10
15	128,8	52,3	138,8	86,5	21,0	20,0	0,025	98,80	1600	0,07	755	0,081	0,98
16	152,0	53,0	151,5	98,5	31,0	22,0	0,026	99,62	1200	0,07	761	0,127	0,96
17	147,0	54,4	147,9	93,5	22,0	31,0	0,033	99,57	1800	0,07	763	0,082	0,91
18	133,0	55,0	132,1	77,1	29,0	26,0	0,015	99,16	2000	0,07	768	0,067	1,09
19	134,3	57,0	129,0	72,0	33,0	29,0	0,017	99,72	2200	0,07	772	0,061	0,97
20	111,0	60,0	131,4	71,4	22,5	17,0	0,011	99,89	2400	0,07	775	0,046	1,13

Средняя по результатам 20 испытаний эффективность осаждения взвеси эталонного состава:

$$\eta_{1-20} = \frac{98,96+98,96+99,03+99,05+...+99,57+99,16+99,72+99,89}{20} = 99,32\%.$$

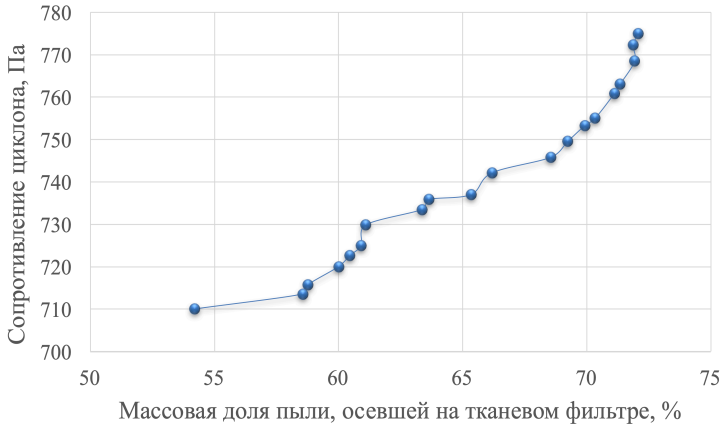


Рисунок 5.35. Зависимость увеличения сопротивления циклона по мере накопления пыли внутри фильтрующей перегородки

Рисунок 5.36. Зависимость изменения сопротивления от продолжительности опыта

По результатам проведённых исследований эффективность увеличивается (от 98,96% до 99,89%) по мере накопления пыли на фильтрующей вставке (массовая доля пыли, осевшей непосредственно на тканевом фильтре в ходе испытаний меняется в пределах от 54 до 72%). При этом сопротивление изменяется незначительно в пределах 710 - 775 Па (рис.5.35, 5.36).

На рисунке 5.37 представлено запыление поверхности фильтрующей вставки по результатам эксперимента при расходе Q=0,07 м^3/с.

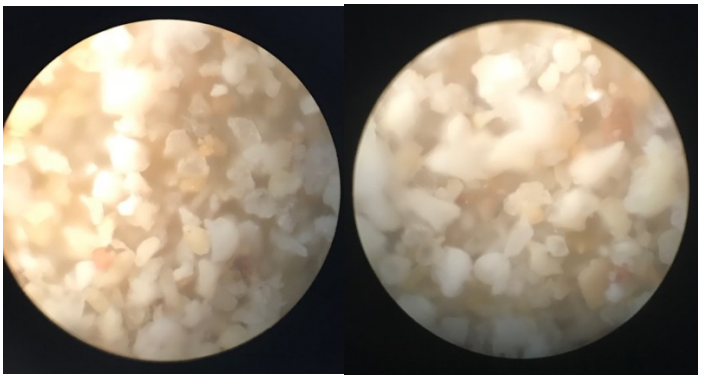


Рисунок 5.37. Образцы фильтрующей вставки по результатам эксперимента при расходе Q=0,07 м^3/с под микроскопом МИН-8 с 400-кратным увеличением

Образцы использованного фильтровального материала представлены на рисунке 5.38. На них отчетливо видны осевшие крупинки пыли размером до 1 мкм. Это позволило провести определение счетного количества частиц классов $PM_{2,5}$, PM_{10} (таблица 5.4).

Рисунок 5.38. Образцы фильтровального материала: а) под микроскопом в циклоне, который установлен по касательной потоку; б) на выходе из циклона

Таблица 5.4.

Определение счетного количества осажденных частиц шамота на поверхности фильтра

Размер частиц, мкм	Количество частиц, шт.		Эффективность, %	Погрешность, +/-
	до	после		
0,2	102	2	98,04	0,2
0,5	112	1	99,11	0,1
1	96	1	98,96	0,1
1,5	78	1	98,72	0,1
2	69	0	100	0
2,5	39	0	100	0
5	8	0	100	0
7,5	5	0	100	0
10	3	0	100	0
Всего	512	5	99,02	

По итогам определения счетной концентрации эффективность составляет 99,02%.

Дисперсный состав пыли после циклона-фильтра определялся при помощи каскадного импактора «Озон-1», который был установлен в порт доступа 12 (рисунок 5.13). После проведения каждой серии опытов разбирали импактор для определения размера фракций пыли, осаждающейся в каждой ступени, образуемой соответствующей парой дисков. Результаты анализа дисперсного состава потока приведены в таблице 5.5.

Для проведения первой серии опыта израсходована пыль массой 138,0 гр.

Расход составил:

$Q_{пыли}$= 0,077·10^{-6} кг/с;

$Q_{возд}$= 0,07 м^3 /с.

Расход газов через импактор:

$Q = 15,0$ л/мин $= 0,25 \cdot 10^{-3}$ м^3/с (при норм.усл.).

Вязкость:

$$\mu = 16,9 \cdot \frac{273+147}{273+20+147} \cdot \left(\frac{273+20}{273} \right)^{3/2} = 17,93 \cdot 10^{-6} \text{ кг/м} \cdot \text{с}$$

Фактический размер фракций: минимальный диаметр частиц пыли, осевших в каждой ступени импактора, рассчитывают по формуле (5.7):

$$D^i_{факт} = D^i_{тар} \cdot \sqrt{\frac{\eta_ф \cdot \rho_т \cdot Q_т \cdot (273+t_т)(P_{бар.ф} - P_{раз.ф})}{\eta_т \cdot \rho_ф \cdot Q_ф \cdot (273+t_ф)(P_{бар.т} - P_{раз.т})}}, \quad (5.7)$$

где $D^i_{факт}$ - минимальный диаметр частиц пыли, осевших на «*i*»-той ступени импактора, мкм; $D^i_{тар}$ - минимальный диаметр частиц, осевших на «*i*»-той ступени, при тарировке импактора; $\eta_т$, $\eta_ф$ - вязкость газов при температуре калибровки при t = 20°С и отбора t, °С, Па·с; $\rho_т$, $\rho_ф$ - плотность частиц пыли при калибровке и в пробе, кг/м^3; $Q_т$=0,167·10^{-3} м^3/с, $Q_ф$ – интенсивность отбора при калибровке и в опыте; $P_{бар.т}$=101325 Па, $P_{бар.ф}$ - барометрическое давление при калибровке и в опыте; $P_{раз.т}$=200 Па, $P_{раз.ф}$ – разрежение в канале при калибровке и в опыте.

$$D^l_{факт} = D_{тар} \cdot \sqrt{\frac{17,93 \cdot 10^{-6} \cdot 1900 \cdot 0,167 \cdot 10^{-3} \cdot (273+20)(101325-800)}{17,93 \cdot 10^{-6} \cdot 1950 \cdot 0,25 \cdot 10^{-3} \cdot (273+20)(101325-200)}} = D_{тар} \cdot 0,8$$

Таблица 5.5.

Результаты анализа дисперсного состава потока

Характеристики дисков				Характеристики ступеней				Фракционный состав, %	
номер	масса диска с контейнером, мг			номер	привес массы, мг	границы разделения, мкм		дифференциальный %	интегральный, %
	до отбора	после отбора	привес			$d_{тар}$	$d_{факт}$		
1.1	17110	17117	1	1	2	>3,0	2,85	11,11	100,00
1.2	11950	11951	1						
2.1	12070	12073	2	2	4	1,5…3,0	1,37	22,22	88,89
2.2	12870	12872	2						
3.1	13660	13665	4	3	4	0,6…1,5	0,67	22,22	66,67
3.2	12000	12000	0						
4.1	14650	14653	3	4	3	0,3…0,8	0,32	16,67	44,44
4.2	12620	12620	0						
5.1	14530	14533	3	5	3	0,15…0,3	0,15	16,67	27,78
5.2	12180	12182	2	6	2	<0,15	0,10	11,11	11,11
Ф	15310	15310	0						
			18		18			100	

Привес массы на ступенях импактора m_i=0,018 гр. Фракционный состав пыли приведен в таблицах 5.6. и 5.7.

Таблица 5.6.

Фракционный состав пыли

Размер фракции, мкм	0,15<	> 0,15	>0,3	>0,8	>1,5	>3,0
Массовая доля фракции, %	11,11	27,78	44,44	66,67	88,89	100,0

Таблица 5.7.

Масса пыли определенной фракции по импактору, мг

Размер фракции, мкм	Содержание отдельных фракций, %	Масса пыли определенной фракции, мг
>3,0	11,11	2
1,5…3,0	22,22	4
0,8…1,5	22,22	4
0,3…0,8	16,67	3
0,15…0,3	16,67	3
0,15<	11,11	2
	100,00	18,00

На рисунках 5.39 и 5.40 представлены дисперсный состав отобранной импактором пробы в дифференциальном и интегральном представлении.

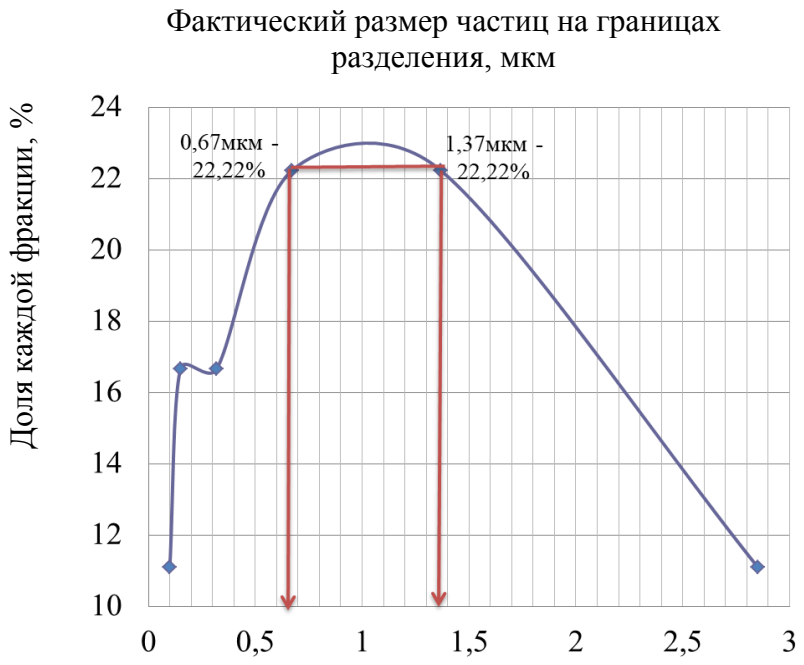


Рисунок 5.39. Дифференциальный график изменения состава отобранной импактором пробы

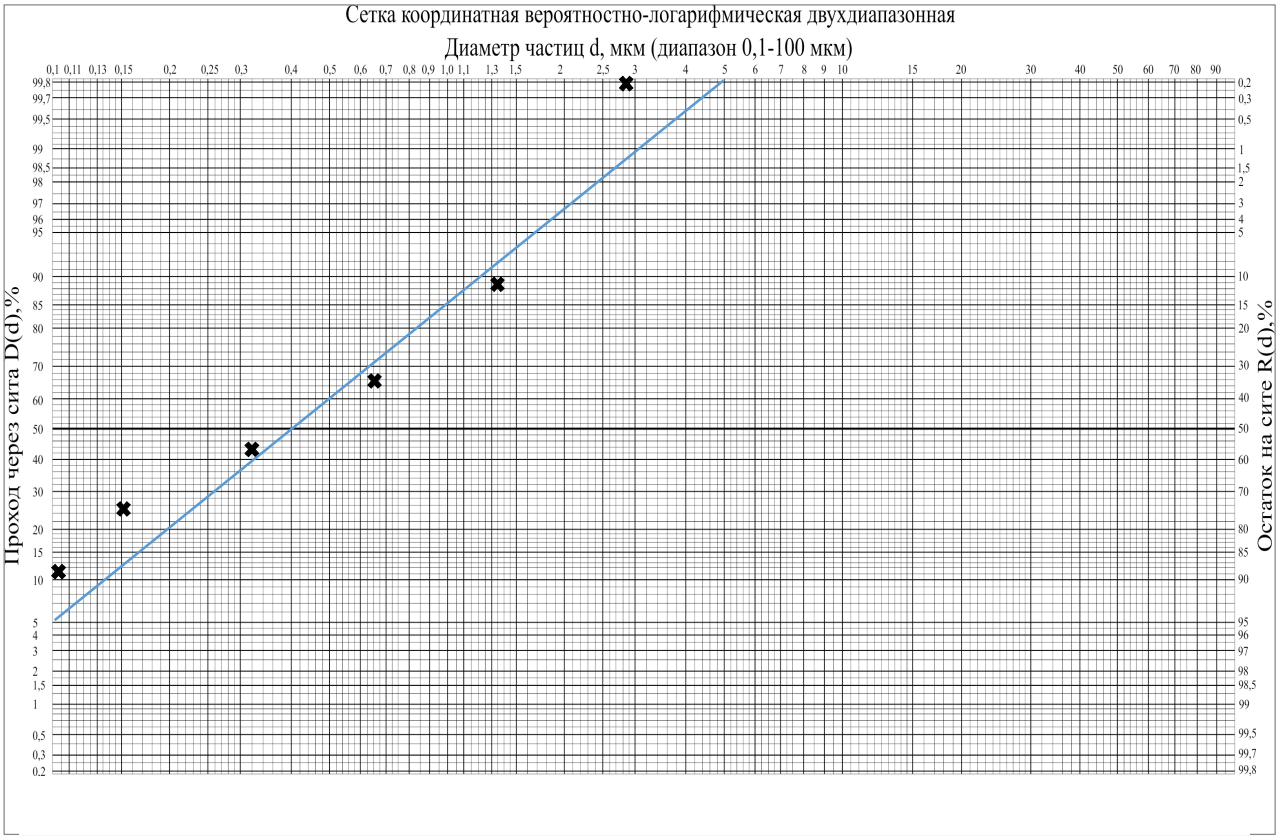


Рисунок 5.40. График изменения интегрального состава исследованной пробы

Проведённый анализ позволил установить медианный диаметр частиц (D_{50} =0,4 мкм) и дисперсию (σ_p=2,02) пыли, прошедшей через циклон-фильтр. Таким образом, усовершенствование циклона путем установки в него тканевого фильтра позволяет уменьшить диаметр отсекания (частиц, улавливаемых на 50%), со средних для стандартных циклонов значений 10 мкм до 0,4 мкм, т.е. обеспечивает улавливание мелкодисперсных частиц класса PM_{10}, $PM_{2,5}$. Средняя по результатам 20 испытаний эффективность осаждения взвеси эталонного состава получилась равной 99,32%. Следовательно, циклон-фильтр может быть использован в качестве второй (окончательной) ступени очистки.

По результатам эксперимента составлена программа расчета степени осаждения на циклофильтре при условии анализа импактором состава входящей пыли. Алгоритм расчета одиночных и групповых циклонов отечественных конструкций реализован в программе ЭВМ «Программа расчёта газоочистных устройств с циклонно-фильтрующими аппаратами». Алгоритм работы с программой представлен в приложении Д. Программа предназначена для проведения численных исследований при конструировании новых, в том числе – циклонно-фильтрующих вихревых аппаратов, а также нахождения типов и типоразмеров серийных одиночных и групповых циклонов, при проектировании систем газоочистки с целью обеспечения требуемой степени очистки с минимумом энергетических затрат при обработке

топливных газов в пунктах подготовки и атмосферных выбросов при угольной генерации на ТЭС и других крупных городских энергоисточниках. В качестве исходных данных служит информация по дисперсному составу и другим характеристикам загрязнителей, по расходу, составу и физико-химическим характеристикам топливных или дымовых газов. Расчеты могут проводиться для следующих конструкций одиночных и групповых циклонов: СК-ЦН-34М, СК-ЦН-34, Клайпеда, СИОТ, СДК-ЦН-33, ЦН-11, ЦН-15, ЦН-15У, ЦН-24, Ц, ВЦНИИОТ, циклоны-фильтры для очистки природного газа, циклоны-фильтры для очистки дымовых газов, а также для зарубежных аналогов. В результате расчетов определяются тип, размер и количество циклонов, обеспечивающих требуемую степень очистки, или показывается невозможность ее достижения на существующих аппаратах и необходимость перехода к конструкторской проработке задачи.

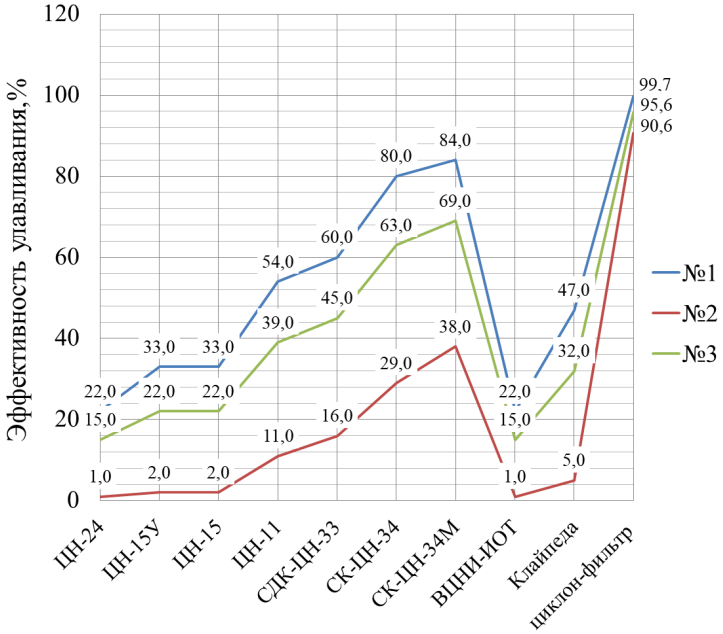


Рисунок 5.41. Эффективность улавливания разных моделей циклонных аппаратов, % для трёх видов пыли: 1 – известковая пыль, 2 – шамотная пыль, отобранная импактором, 3 – аэрозоль СРКА

По результатам решения программы при использовании одного и того же фракционного состава пыли в различных типах циклонов коэффициент очистки увеличивается при прохождении потока в циклоне – фильтре рисунке 5.41. Например, эффективность осаждения шамотной пыли после импактора (среднемедианный размер частиц D_{50}=0,6мкм) в циклоне ЦН-11 составляет 54%, а в усовершенствованном циклоне фильтре - 99,7%.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 5

1. Сопротивление циклона без фильтра при наибольшем расходе воздуха составляет 733,0 Па (Q=0,07 м^3/с) и 156,0 Па при минимальном расходе (Q=0,03 м^3/с). Сопротивление циклона с фильтром составило 770,0 Па при Q=0,07 м^3/с и 235,0 Па - при Q=0,03 м^3/с.

2. Усовершенствование циклона путем установки в него тканевого фильтра позволяет уменьшить диаметр отсекания (частиц, улавливаемых на 50%), со средних для стандартных циклонов значений 10 мкм до 0,4 мкм, т.е. обеспечивает улавливание мелкодисперсных частиц класса PM_{10}, $PM_{2,5}$.

3. Представленный в данной работе циклон-фильтр позволит увеличить пропускную способность очистных аппаратов в 4 раза за счёт увеличения входной скорости с 3,5 м/с до 14,0 м/с при одновременном повышении эффективности очистки до 99,32 %.

Глава 6 ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ГОРОДСКИХ ЭНЕРГОСИСТЕМ, ВСЛЕДСТВИЕ УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ПОДГОТОВКИ И ОЧИСТКИ ТОПЛИВА

Практическая значимость внедрения усовершенствованного циклона-фильтра для очистки топливных газов при производстве тепловой и электрической энергии в энергетических системах и комплексах состоит в обеспечении надежности применяемого оборудования и снижения техногенной нагрузки производства на окружающую среду при эксплуатации энергоисточников энергетической системы города. Вместе с тем имеется и определенный экономический эффект его внедрения в городские АГРС вследствие увеличения времени безаварийной работы оборудования, а также уменьшения негативного воздействия на окружающую среду при стравливании газа [128].

6.1. Расчет технико-экономического эффекта от внедрения усовершенствованного циклона-фильтра на базе ППГ ТЭЦ г.Казани

Казанская ТЭЦ-1 поставляет электрическую энергию и мощность на оптовый рынок электрической энергии и мощности, является источником тепловой энергии для системы централизованного теплоснабжения города, а также источником пара для близлежащих промышленных предприятий. Установленная электрическая мощность - 385 МВт, тепловая - 542 Гкал/ч (1102 Гкал/ч вместе с котельными «Азино» и «Горки-2»). Парогазовая установка мощностью 230 МВт состоит из двух блоков. В состав каждого блока входит газотурбинная установка 6FA единичной мощностью 77 МВт производства *General Electric*, паровая турбина Кт-46-8,8 производства «Уральский турбинный завод», котел-утилизатор производства ОАО «ЭМАльянс» (Таганрог) и силовые трансформаторы производства ОАО «Тольяттинский трансформатор». Основным видом топлива для ТЭЦ-1 является природный газ, резервное топливо - мазут. Потребителями газа являются две газотурбинные установки PG 6111(FA) и дожигающие устройства котлов-утилизаторов. Газоснабжение энергоблоков выполняется от газопровода высокого давления $D_у$-700, $P_г \leq$ 0,6МПа, проложенного к существующему ГРП Казанской ТЭЦ-1. Дожимные компрессорные установки (ДКУ) интегрированы в ППГ в соответствии с «Правилами технической эксплуатации газового хозяйства газотурбинных и парогазовых установок тепловых электростанций РД 153-34.1-30.106-00», которые предусматривают следующее:

- система газоснабжения ГТУ и ПГУ в общем случае должна включать основные узлы или объекты ППГ, включая блоки редуцирования или сжатия газа (в т.ч. ГРП, УСД, ДКС, ГТРС), очистки, осушки, подогрева, измерения расхода;

- пункт подготовки газа должен обеспечивать очистку газа от жидких и твердых частиц, редуцирование и (или) сжатие газа, его подогрев, осушку и измерение расхода. Технические средства для этих целей следует использовать в виде блоков комплектной заводской поставки.

Снабжение топливом энергоблоков Казанской ТЭЦ-1 обеспечивает система газоподготовки, которая включает многоблочный пункт подготовки газа, газодожимную компрессорную станцию из четырех установок и модуль управления. Пункт подготовки газа (ППГ) - это технологическая установка, состоящая из нескольких блоков с оборудованием различного назначения, которые при монтаже состыкованы в единое здание с общей кровлей. Исключение составляют входной блок фильтрации и узел дренажа конденсата, которые имеют внешнее исполнение на открытой раме.

После предварительной фильтрации топливного газа в ГРП, он поступает в пункт подготовки газа. Трехлинейная система очистки в ППГ состоит из фильтра-сепаратора Pietro Fiorentini (Италия), коалесцирующих фильтров-сепараторов Beck Gmbh (Германия) и коалесцирующих фильтров-сепараторов тонкой очистки Petrogas (Голландия), которые осуществляют дополнительное удаление твердых частиц и отделение капельной влаги.

Фильтр Pietro Fiorentini, модель HFA6 (рисунок 6.1) предназначен для эксплуатации в стационарном режиме и не предназначена для работы в условиях циклических нагрузок, превышающих 1000 циклов нагружения за весь период эксплуатации фильтра. Степень фильтрации: 98% для частиц 5 мкм.

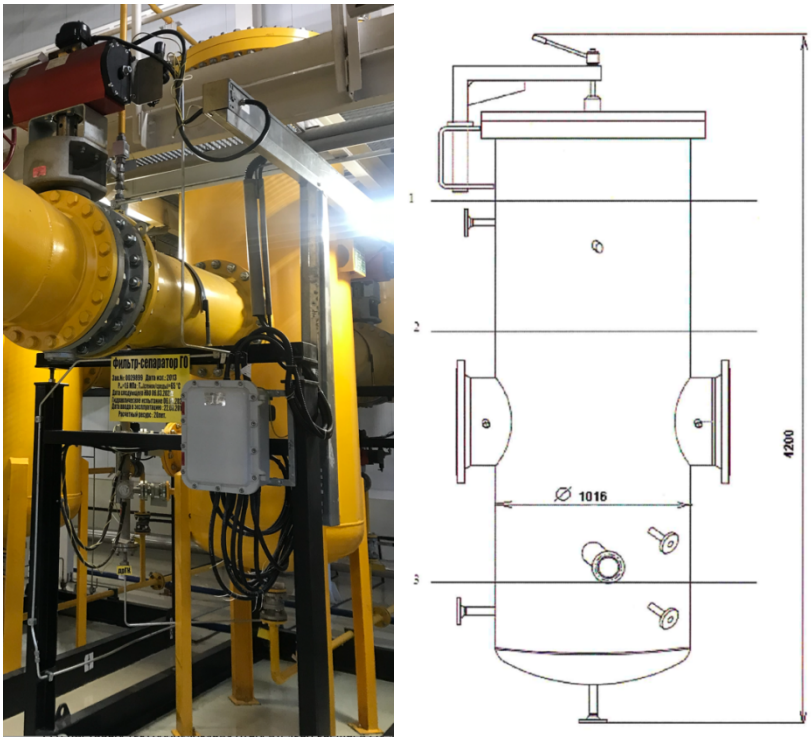


Рисунок 6.1. Фильтр-сепаратор Pietro Fiorentini (Италия)

На второй ступени установлены высокоэффективные коалесцентные сепараторы Beck Gmbh (рисунок 6.2) с внутренним гидравлическим обводом (байпас), которые оснащены высокоточной системой регулировки потока, постоянно контролирующей их поступление в устройство. Эта система обеспечивает оптимальную работу коалесцентного элемента (максимальную эффективность очистки).

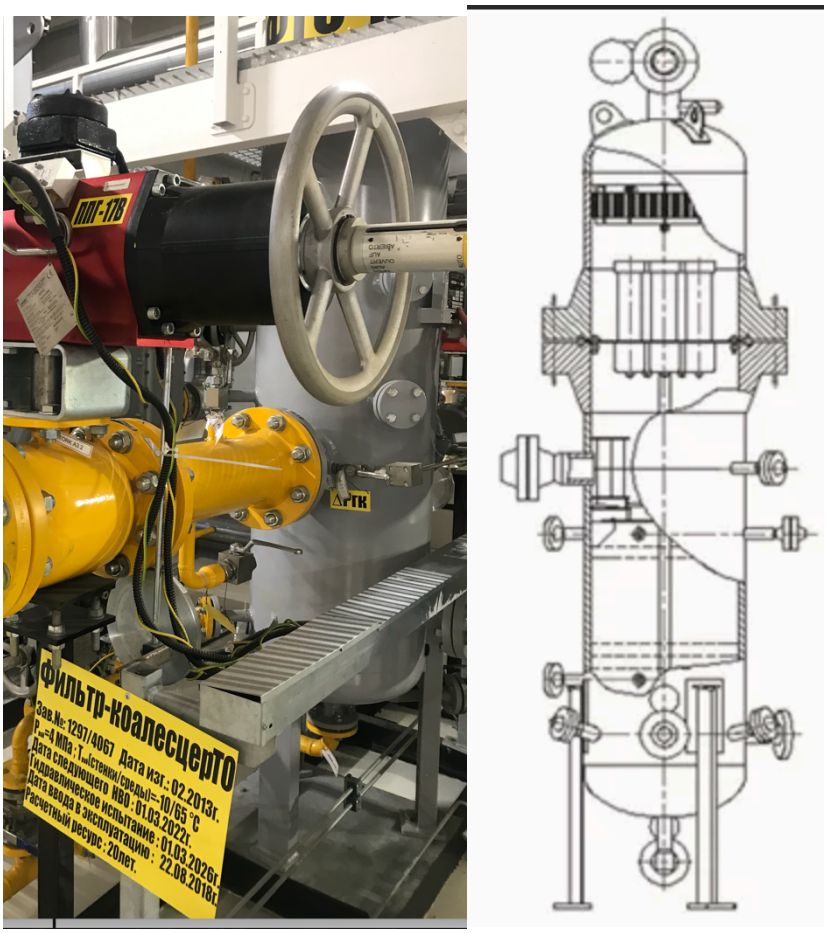


Рисунок 6.2. Коалесцирующий [1]фильтр-сепаратор Beck Gmbh (Германия)

Неочищенный газ поступает внутрь фильтра через входной патрубок и поднимается к системе коалесцирующих элементов для сепарации, основанном на эффекте коалесценции - слиянии мельчайших капель влаги на поверхности специального материала фильтрующего элемента.

На этапе сепарации поток газа проходит сквозь несколько слоев фильтрующего материала, поры которого последовательно увеличиваются. Механические примеси задерживаются, а капли жидкости, стремясь пройти в открытые поры, вынуждены сливаться между собой в крупные фракции. Для оптимальных условий слипания капель и эффективного

[1] Коалесценция (от лат. coalesco — срастаюсь, соединяюсь) — слияние частиц (например, капель или пузырей) внутри подвижной среды (жидкости, газа) или на поверхности тела

отделения жидкости от газа диаметр мелкодисперсных капель должен составлять не менее 0,3 мкм.

Наиболее часто слои фильтрующих картриджей изготавливаются из композиционных материалов на основе полимеров или из различных комбинаций стекловолокна с термопластичными полимерами, синтетическим волокном на основе полиэфира или целлюлозой.

Для повышения общей прочности и стойкости к повышенному давлению коалесцирующие модули могут быть дополнительно укреплены металлической сеткой.

После очищения газ выводится через верхний отсек к выходному патрубку, а осадок примесей постепенно накапливается в нижнем отсеке аппарата. Уровень заполнения отсека контролируется датчиками, что позволяет и своевременно осуществлять сброс осадка через штуцер слива. Эффективность очистки газа от твердых примесей составляет 99% для частиц размером 1,4 мкм.

На третьей ступени тонкой очистки установлен фильтр-сепаратор Petrogas, модель PG-BC-6-300-450 (рисунок 6.3) состоит из двух секций, в которых капли воды и/или частицы пыли будут отделены от газа.

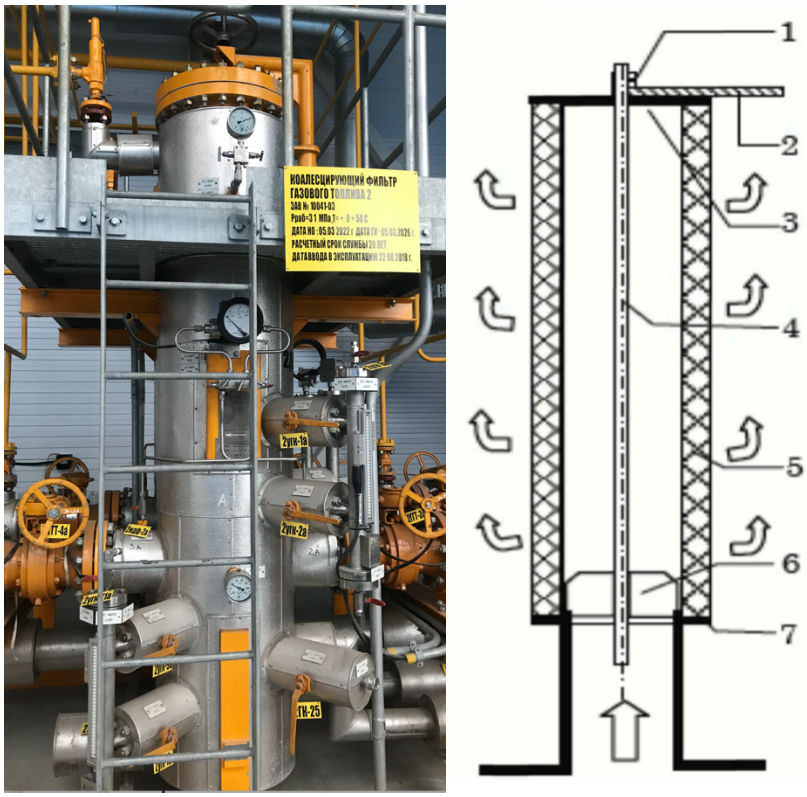


Рисунок 6.3. Фильтр-сепаратор тонкой очистки Petrogas (Голландия)

Газ подается в фильтр-сепаратор через входное отверстие и течет против отклоняющей пластины, которая направляет газ вниз. Жидкость и частицы пыли не могут следовать за

потоком газа, отделяются от него и падают на дно фильтр- сепаратора. После отклоняющей пластины газ проходит в секцию с коалесцирующими фильтрующими элементами. Газ течет через эти фильтрующие элементы по направлению изнутри кнаружи, очищаясь от оставшихся капель воды и частиц пыли. Далее очищенный газ течет по выходному каналу и достигает выходного отверстия. Фильтр-сепаратор оборудован тремя коалесцирующими фильтрующими элементами типа DUOTOV-RT-HT 90/1104. Данные фильтрующие элементы подлежат замене, когда дифференциальное давление превысит уровень 0,08 МПа. Это можно увидеть на датчике дифференциального давления, установленного на фильтре-сепараторе.

Пункт подготовки газа оснащен узлом контроля качества, основу которого составляет потоковый газовый хроматограф непрерывного действия (калориметр) с устройством отбора проб. Функционал этого оборудования: определение компонентного состава газа, измерение теплоты сгорания, вычисление плотности и относительной плотности, вычисление числа Воббе. После фильтрации и учета газ попадает в трехлинейный узел подогрева на базе кожухотрубных теплообменников с коаксиальными трубками. Номинальный расход газа через один подогреватель - 53 000 м^3/ч. Давление газа на входе в ППГ – 1,2 МПа. Его понижение до рабочих параметров подачи в турбины обеспечивает система редуцирования. В ней предусмотрены три нитки редуцирования – две рабочие по 50% потока и одна резервная. В конечном итоге, пункт подготовки газа подаёт топливный газ к блокам отключающей арматуры ГТУ с максимальной производительностью 100 000 нм^3/ч.

Наличие механических примесей в газе приводит к преждевременному износу оборудования, запорной арматуры, нагнетателей и, как следствие, снижению показателей надежности и экономичности работы ГТУ и ПГУ. Аварии обычно происходят в результате низкого качества очистки, неправильной эксплуатации оборудования установки, нарушения правил технической эксплуатации и правил безопасности.

Исходные данные для расчета технико-экономического эффекта от внедрения усовершенствованного циклона-фильтра на базе ППГ ТЭЦ-1 г.Казани: режим работы оборудования – непрерывный; остановка на текущий или капитальный ремонт – три раза в год; расход очищаемого газа 1600 нм^3 /час; действующая система очистки газов – трёхлинейная, в составе которого фильтр-сепаратор Pietro Fiorentini HFA6, коалесцирующий фильтр-сепаратор Beck Gmbh и фильтр-сепаратор тонкой очистки Petrogas PG-BC-6-300-450; требования к системе газоочистки - не менее 100 % для частиц размером 30 мкм и более; температура газа на входе в систему газоочистки 180-200°С; характеристика улавливаемой пыли: фракционный состав менее 35 мкм – 40% более 35 мкм – 60%; плотность частиц материала -2,65 г/см^3.

Ремонт узлов установок ГТУ и ПГУ, конкретно ППГ в среднем составляет фильтра-сепаратора Pietro Fiorentini HFA6≈24700,0 руб., коалесцирующего фильтра-сепаратора Beck

Gmbh ≈ 38500,0 руб., фильтра-сепаратора тонкой очистки Petrogas PG-BC-6-300-450≈50100,0 руб., согласно СТО часть 18 «Газовое хозяйство: прием, подготовка и подача газа на ТЭС». Таким образом, стоимость ремонта одного блока очистки составляет:

$$S \approx 24700{,}0+38500{,}0+50100{,}0=113300{,}0 \text{ руб.}$$

а таких блоков три, следовательно, для капремонта блока очистки ППГ Казанской ТЭЦ-1 два раза в год необходимо:

$$\sum S''=113300{,}0 \cdot 3 \cdot 2=679800{,}0 \text{ руб.}$$

При проведении стендовых испытаний циклона-фильтра также проводилось наблюдение за общим состоянием фильтровального материала. За время выполнения экспериментов в течение двух месяцев износа материала обнаружено не было: материал не претерпел изменений, также не было разрывов или каких-либо других повреждений. В то же время шамотная пыль, использованная для эксперимента, обладает повышенной абразивностью. Поэтому можно считать, что внедрение предложенной установки, согласно разрабатываемой нами инструкции по эксплуатации (приложение Б), повышает надёжность работы оборудования, и будет достаточно производить замену фильтра один раз в год во время проведения общего капитального ремонта. Следовательно, на одноразовый капремонт блока очистки потребуется $\sum S'$=339900 руб. и экономический эффект для одной станции г.Казани составит Э≈339900 руб. С учётом того, что в г. Казани таких станций 3, системный эффект составит Э≈339900·3=1019700 руб.

При условии внедрения циклона-фильтра на восемь ТЭЦ республики Татарстан совокупный системный эффект составит 2719200 руб.

Предлагаемый к внедрению усовершенствованный циклон-фильтр позволит существенно снизить затраты на обслуживание и ремонт оборудования ППГ за счёт остановки на капремонт с двух до одного раза в год. К тому же, совмещение первой и второй ступеней очистки в конструкции усовершенствованного циклона-фильтра существенно упрощает его эксплуатацию за счёт сокращения числа очистных устройств и элементов их обвязки, включая запорные устройства, КИП и автоматику.

6.2. Расчет технико-экономического эффекта внедрения усовершенствованного циклона-фильтра на базе ГРС г.Арск

Для определения совокупного экономического эффекта от внедрения усовершенствованного циклона-фильтра в ГРС г.Арск выполнен расчёт по определению снижения вредного воздействия на окружающую среду при опорожнении технологического оборудования. Акт внедрения предложений по повышению эффективности очистки газов на ГРС от мелкодисперсных частиц классов PM_{10}, $PM_{2,5}$ представлен в приложении В. В ГРС

установлен кассетный фильтр-газовый сварной Ду 300мм (рисунок 6.4) с пропускной способностью 100000м^3/ч, где газ проходит первую ступень очистки от крупных механических примесей. Рабочее давление 1,2 МПа.

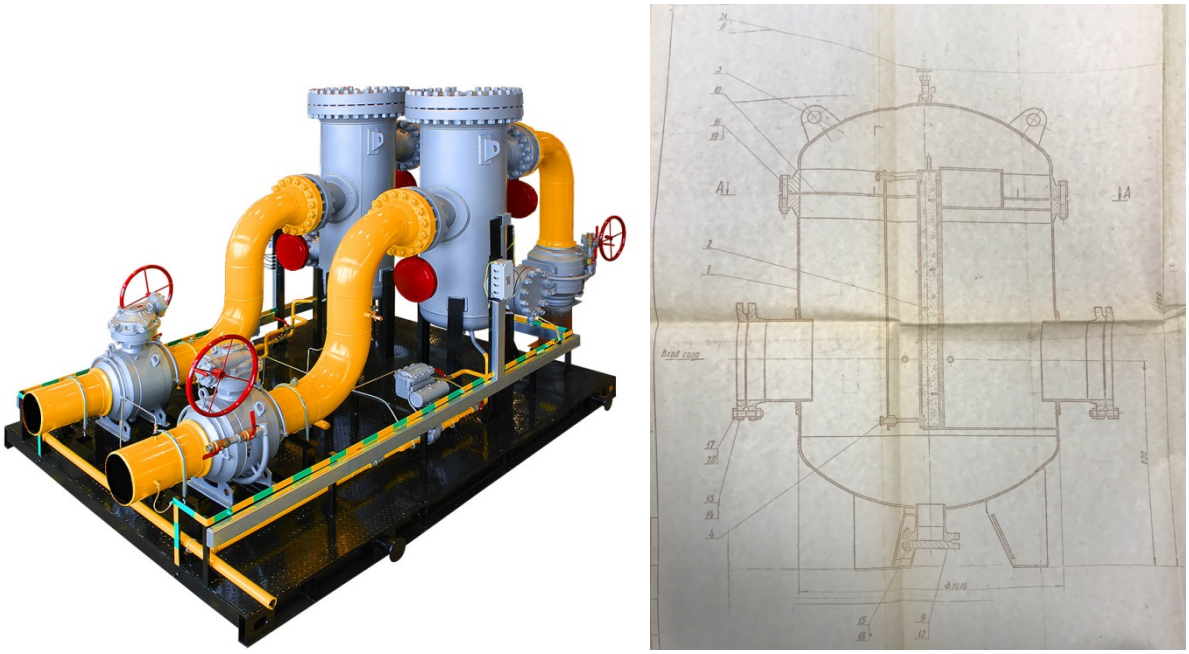


Рисунок 6.4. Блок очистки ГРС, состоящий из двух кассетных газовых фильтров

Расчет выбросов ЗВ в атмосферу при опорожнении (стравливании) 1 ед. технологического оборудования, согласно Приказу Минприроды России (Министерство природных ресурсов и экологии РФ) от 06 июня 2017 г. №273 "Об утверждении методов расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе". Объем газа, выделяющегося в атмосферу при опорожнении технологического оборудования ГРС, согласно данным экологического отчёта составляет:

$$V_{ГРС} = 9,24 \cdot d^2 \cdot t \cdot \frac{P_{атм} + P_Г}{T_Г} \cdot \sqrt{\frac{P_Г}{\rho_ф}}\ , \qquad (6.1)$$

где $\rho_ф$ - фактическая плотность газа, кг/м^3, которую находим по формуле:

$$\rho_ф = \rho \cdot \frac{T_В \cdot P_а}{T_Г \cdot P_{атм} \cdot Z} = 0,6881 \cdot \frac{293 \cdot (0,3 + 0,101)}{283 \cdot 0,101 \cdot 0,9842} = 2,89, \qquad (6.2)$$

где p - абсолютная плотность газа, кг/м^3; $P_{атм}$ - давление приведения, МПа; $T_в$ - температура воздуха, К; $P_а$ - абсолютное давление газа, МПа; T - температура газа, К; Z - коэффициент сжимаемости газа.

Объём выброса:

$$V_{ГРС} = 9,24 \cdot 0,02^2 \cdot 1/3 \cdot \frac{101325 + 300000}{283} \cdot \sqrt{\frac{300000}{2,89}} = 570\ м^3.$$

При эксплуатации ГРС выбросы природного газа, согласно СТО Газпром 2-1.19-058-2006 допускаются:

- при продувке пылеуловителей в конденсатосборник - 1 раз в неделю;
- при периодических отключениях пылеуловителей или фильтров для внутреннего осмотра или ремонта, очистки или замены сменных элементов -2 раза в год.

Итого объем газа, выделяющегося в атмосферу при опорожнении технологического оборудования ГРС четыре раза в месяц, в среднем будет равняться:

V_I=570,0·4=2280,0 м^3, 96% из которых относится к IV и V классам опасности для населения и окружающей среды.

В год объем газа составит: V_I=2280,0·12=27360,0 м^3

Плата за негативное воздействие на окружающую среду при стравливании, согласно СТО Газпром 2-1.19-058-2006 «Инструкция по расчету и нормированию выбросов ГРС, ГРП» осуществлялась в пределах установленных нормативов и составила:

$C=K_{атм}\cdot V_I$=120,0·27360,0=3283200 руб.·м^3.

где: $K_{атм}$ =120,0 - компенсационные выплаты за ущерб, связанный с загрязнением атмосферного воздуха, руб.

Согласно опытным данным при внедрении усовершенствованного циклона-фильтра в блок очистки ГРС число продувок сократится на 25%, т.е. продувка пылеуловителей будет производится 3 раза в месяц и экономический системный эффект за год для одной станции составит:

Э ≈ 3283200·0,25= 820800 руб.·м^3

На сегодняшний день ООО «Газпром трансгаз Казань» эксплуатирует 197 газораспределительных станций. Тогда совокупный системный эффект по республике Татарстан составит:

Э≈820800·197=161697600 руб.·м^3.

В итоге совокупный экономический системный эффект за год при внедрении в ППГ ТЭЦ и в блок очистки ГРС по Татарстану составит:

∑Э≈2719200+161697600=164416800 руб.

Модернизация процессов очистки угольной пыли при эксплуатации энергоисточников энергетической системы города Омск показал целесообразность применения усовершенствованной установки. Омская ТЭЦ-5 является самой крупной отопительной электростанцией в Омской энергетической системе и одной из крупнейших в Сибири и вырабатывает 735,0 МВт электрической и 1763,0 Гкал/час тепловой мощности. Основное топливо: Экибастузский каменный уголь. «ТГК-11» реализует на территории Омской области инвестиционную программу, направленную, в первую очередь, на повышение надёжности

энергоснабжения потребителей. При этом большое внимание уделяется сокращению негативного влияния на окружающую среду, что достигается в основном за счёт новых технологических решений. Суммарная масса твёрдых частиц, выделяемая при разгрузке угля на ТЭЦ-5 составляет 518027,9 т/год. В топливно-транспортном цехе на топливоподаче действует 25 аспирационных установок (АУ), предназначенных для улавливания угольной пыли при разгрузке угля на складе, на участке дробления и на узлах пересыпки. Плата за выбросы загрязняющих веществ в пределах установленных лимитов составляет 93208 тыс.руб., а при эксплуатации 25 АУ – 2330200 тыс.руб.

По данным технического отчета КПД составляет 96,76%, а КПД усовершенствованного циклонно-фильтрующего устройства согласно расчётам составляет 99,65%, значит КПД возрастёт на 2,89%, тогда ожидаемый экономический эффект от внедрения усовершенствованного циклонно-фильтрующего устройства для улавливания угольной пыли при разгрузке угля, на участке его дробления и на узлах пересыпки в Омскую ТЭЦ-5 составит: Э≈2330200·0,0289=67340 руб. в год. Таких станций в Омской области три, следовательно совокупный экономический эффект составит: Э≈202020 руб.

Комплексная работа по обеспечению снижения капитальных затрат на обслуживание и ремонт оборудования и уменьшения техногенного воздействия на окружающую среду будет продолжена.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 6

1. Вследствие совмещения первой и второй ступеней очистки в конструкции усовершенствованного циклона-фильтра существенно упрощается эксплуатация блоков очистки ГРС и ППГ ТЭЦ, так как сокращается число единиц очистного оборудования и элементов обвязки, включая запорные устройства, КИП и автоматику.

2. Использование усовершенствованного циклона-фильтра позволит также снизить затраты на обслуживание и ремонт оборудования пунктов подготовки газа на ТЭЦ вследствие уменьшения числа остановок на капремонт с двух до одного раза в год. За счёт этого применительно к ППГ ТЭЦ №1 г. Казани экономия составит Э≈339900 руб., а при условии внедрения циклона-фильтра на все 8 ТЭЦ республики Татарстан - 2719200 руб.

3. Кроме того, применение усовершенствованного циклона-фильтра в блоках очистки ГРС городских газотранспортных систем позволит снизить число продувок с четырёх до трёх раз в месяц, т.е. на 25%. Это обеспечивает экономию средств за счёт уменьшения платы за выбросы, которая на блоке очистки ГРС «Арск» составит 3283200 руб. Следовательно, использование усовершенствованного циклона-фильтра в блоке очистки ГРС «Арск» позволит

сэкономить 820800 руб., а распространение опыта его эксплуатации на все 197 ГРС республики Татарстан даст экономию в 161697600 руб.

4. Использование циклона-фильтра в топливно-транспортном цехе в ТЭЦ с угольной генерацией по Омской области позволит снизить затраты на 202020 руб., за счёт уменьшения выбросов загрязняющих веществ в системе пылеприготовления при разгрузке угля, на участке его дробления и на узлах пересыпки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Достигнута поставленная цель работы, основной результат которой заключается в улучшении показателей экологической и энергетической эффективности крупных городских энергетических систем и комплексов за счёт использования усовершенствованной циклонной фильтрации при подготовке топлива. В работе решены следующие задачи.

1. Выполнен критический анализ способов сепарации газового топлива и запылённых выбросов, позволивший выделить в качестве наиболее перспективного объекта для дальнейших научных исследований циклоны-фильтры.

2. Проведены теоретические расчёты, результаты которых позволили определить наиболее целесообразное расположение фильтра в циклоне диаметром 100 мм – на расстоянии R=0,0325 м от его оси, при котором для частиц класса PM_{10} достигается степень осаждения 99%.

3. Исследованы поля скоростей и давлений на численной 3d-модели, построенной на базе серийного циклона ЦН-11 диаметром 200 мм, позволившие установить распределение радиальной, тангенциальной и осевой составляющих вектора скорости потока в кольцевом канале; найденное при этом сопротивление циклона составляет 710 Па, что приемлемо при его использовании в городских газотранспортных системах.

4. В результате лабораторных исследований циклона диаметром 100 мм получены предварительные данные по структуре и дисперсному составу осаждающейся на ткани пыли; также определено, что фильтрующая вставка не нарушает структуры потока в кольцевом сечении циклона, что показало целесообразность конструктивного дополнения циклонов, используемых для очистки газа в городских газотранспортных системах, фильтрующими вставками, обеспечивающими эффективное улавливание пыли при приемлемых давлениях (до 5000 Па).

5. Усовершенствование циклона путем установки в него тканевого фильтра позволяет уменьшить диаметр отсекания (частиц, улавливаемых на 50%), со средних для стандартных циклонов значений 10 мкм до 0,4 мкм, т.е. обеспечивает улавливание мелкодисперсных частиц класса PM_{10}, $PM_{2,5}$, при одновременном повышении эффективности очистки до 99,32%.

6. Разработана и зарегистрирована программа для ЭВМ «Программа расчёта газоочистных устройств с циклонно-фильтрующими аппаратами» по оптимизации конструктивных и газодинамических параметров циклонно-фильтрующих элементов городских газотранспортных систем.

7. Совокупный технико-экономический эффект при использовании циклона-фильтра в системах топливоподготовки при газовой и углегенерации, а также в городских газотранспортных системах, составит по республике Татарстан и Омской области 164618820 руб.

Рекомендации и перспективы по дальнейшему усовершенствованию разработки

Как было отмечено выше, полезные величины энергетических затрат должны быть непосредственно связаны с улавливанием взвешенных частиц. В данной конструкции это процессы осаждения на поверхностях фильтровальной вставки и внутренней стенки циклона. Потери энергии на сопротивления, возникающие при тангенциальном входе в циклон запыленного потока и при его движении в соединительных фасонных деталях до циклона, таковыми не являются, но они неизбежны в процессе эксплуатации аппарата.

Для дальнейшего совершенствования в этом отношении циклона-фильтра могут использоваться рекомендации по снижению сопротивления в канале с боковым отверстием, полученные на основе компьютерного моделирования течений методами вычислительной гидродинамики.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Октябрьский, М.Л. Оборудование для очистки воздушной среды рабочей зоны / М.Л. Октябрьский // Изд-во СибГТУ. – 2016. – №16. – 4 с.

2. Распоряжение от 20 мая 2010 г. №75-р «Об утверждении методических рекомендаций по представлению данных мониторинга мелкодисперсных взвешенных веществ ($PM_{2,5}$ и PM_{10}) в атмосферном воздухе Санкт-Петербурга».

3. Международная академия наук экологии, безопасности человека и природы Украинское отделение. Научно-технический бюллетень. Одесса, 2014. – Вып.№2. – 30 с.

4. ГН 2.1.6.1338-03 Предельно допустимые концентрации загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест (с изм. От 3 ноября 2005 г., 4 февраля 2008г., 27 января 2009г.) Минздрав России. – М., 2003.

5. Трескова, Ю. В. Оценка степени опасности мелкодисперсных частиц в атмосферном воздухе и целесообразность их нормирования / Ю. В. Трескова // Молодой ученый. – 2016. – №7. – С. 291-294.

6. РД 52.04.830-2015 Массовая концентрация взвешенных частиц PM_{10} и $PM_{2.5}$ в атмосферном воздухе. Методика измерений гравиметрическим методом. – М.: Федеральное государственное бюджетное учреждение «Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова» (ФГБУ «ГГО»). – 2016. – 41 с.

7. A European aerosol phenomenology – 3: Physical and chemical characteristics of particulate matter from 60 rural, urban, and kerbside sites across Europe / J.-P. Putaud [et al.] // Atmospheric Environment. – 2010. – Vol. 44. – № 10. – P. 1308-1320.

8. Шубин, М. А. Экологическая экспертиза: учеб.пособие / М. А. Шубин, П. В. Швагерус. – Волгоград: Изд-во ВолгГАСУ. – 2011. – 85 с.

9. Beelen R et al. Long-term effects of traffic-related air pollution on mortality in a Dutch cohort (NLCS-AIR Study). Environmental Health Perspectives. – 2008. – №116(2). – S.196–202.

10. Производственная пыль и её влияние на организм человека: [Электронный ресурс] // Охрана труда и БЖД. URL: http://ohrana-bgd.narod.ru/bgdps11.html/. (Дата обращения: 05.10.2013).

11. Р 2.1.10.1920-04. Руководство по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду. – М.: Федеральный центр Госсанэпиднадзора Минздрава России, 2004. – 143 с.

12. Приказ от 30 июня 2015 года №300 «Об утверждении методических указаний и руководства по количественному определению объема выбросов парниковых газов организациями, осуществляющими хозяйственную и иную деятельность в Российской Федерации».

13. Парниковые газы: новые стимулы развития или ограничение экономического роста? Уникальная прогноз-сессия в рамках выставки-форума «экотех`2016» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://green-city.su/parnikovye-gazy-novye-stimuly-razvitiya-ili-ogranichenie-ekonomicheskogo-rosta-unikalnaya-prognoz-sessiya-v-ramkax-vystavki-foruma-ekotex2016/

14. Зиганшин, М. Г. Теоретические основы пылегазоочистки / М. Г. Зиганшин. – Казань: Изд. КГАСУ, 2005. – 262 с.

15. Коузов, П. А. Сравнительная оценка циклонов различных типов / П. А. Коузов // Обеспыливание в металлургии: сборник под ред. Я. А. Штромберга. – М., 1971. – С. 185–196.

16. Ватин, Н. И. Очистка воздуха при помощи аппаратов типа циклон / Н. И. Ватин, К. И. Стрелец. – СПб.: Химия, 2003. – 65 с.

17. Шваб, В. А. К вопросу обобщения полей скорости турбулентного потока в циклонной камере // Инж.- физич. Журн. – 1963. – Т. 6. – № 2. – С. 102-108.

18. Василевский, М. В. Расчёт турбулентного течения аэрозоля в прямоточном циклоне. Методы гидро-аэромеханики в приложении к некоторым технологическим процессам / М. В. Василевский, М. И. Шиляев. – Томск, Изд-во Томск.ун-та, 1977. – С. 84 -95.

19. Циклоны НИИОГАЗ Руководящие указания по проектированию, изготовлению, монтажу и эксплуатации. – Ярославль. – 1970. – 95с.

20. Зиганшин, М. Г. Проектирование аппаратов пылегазоочистки: учебное пособие 2 изд./ М. Г. Зиганшин, А. А. Колесник, А. М. Зиганшин – Спб.: Лань, 2014. – 544 с.

21. Замураев, А. Е. Расчет пылеуловителей: в 3 ч. – Ч. 1: Расчет циклонов и рукавных фильтров / А. Е. Замураев, В. Б. Пономарев. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ–УПИ, 2006. – 50 с.

22. Идельчик, И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям; под ред. М. О. Штейнберга. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1992. – 672 с.

23. Методические указания. Теплоснабжение и вентиляция. Курсовое и дипломное проектирование. /Под ред. Проф. Б. М. Хрусталева – М.: Изд-во АСВ, 2005. – 786с.

24. Пономарев, В.Б. Аспирация и очистка промышленных выбросов и сбросов: методические указания по курсу «Машины и агрегаты предприятий строительных материалов» / В.Б. Пономарев, А.Е. Замураев. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ–УПИ. – 2007. – 44 с.

25. Лазарев, В. А. Циклоны и вихревые пылеуловители: справ. / В.А.Лазарев. – 2-е изд., перераб. И доп. – Н. Новгород: ОЗОН-НН. – 2006. – 320 с.

26. Хамидуллин, Р.Н. Технология очистки газовых выбросов от пыли производства силикатного кирпича. – автореф. дис. на соискание ученой степени кандидата тех. наук 03.00.16 / Хамидуллин Рафик Наилович. – Казань, 2005. – 24 с.

27. Kittler R.Neuent Zyklon Bauformen Energieeinsparung bei Staubzentrifugen. –Verfahrenstechnik. – 1981. – Bd. 15. – № 5. – S. 370-372.

28. Schiele O., Möglichkeit zur Wiedergewinnung der Drallenergie von Zyklonabscheidern“ in: VDI Tagungsheft 54 Nr.3, Probleme des Zykonabscheiders“. – S. 20 – 22.

29. Brunnmair E. Entwicklung und Modellierung eines neuen Hochleistungszyklons zur Trennung von Feststoff / Gas-Gemischen: Dissertation zur Erlangung des akademischen Gradeseines Doktors der montanistischen Wissenschaften, Montanuniversität Leoben. – Leoben. –2015. – p. 168.

30. Bielefeldt E. A., Wirbelkammern neurer Technologie: BE-Bericht 1/86; Neue Patentanmeldung Wirbeltrennverfahren. – 2013. – p. 286.

31. Muschelknautz E. Theorie der Fliehkraftabscheider mit besonderer Berücksichtigung hoher Temperaturen und Drücke: VDI-Bericht Nr. 363. – 1980. – P. 49-60.

32. Staudinger G., Zyklone mit Zentralkörpern: Veröffentlichung in Chem.Ing.-Tech. 64. – 1992. – S. 769 – 888.

33. Рукавные фильтры, циклоны, приточно-вытяжные камеры и пылевые выбросы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://ciklony.ru/rukavnye-filtry-ciklony-pritochno-vytyazhnye-kamery-i-pylevye-vybrosy/

34. Луговской, С. И. Совершенствование систем промышленной вентиляции / С. И. Луговской, Г. К. Дымчук. – М.: Стройиздат, 1991. – 133 с.

35. Белоусов, В. Н., Энергосбережение и выбросы парниковых газов (CO_2): учебное пособие/ В. Н. Белоусов, С. Н. Смородин, В. Ю. Лакомкин – СПб.: СПбГТУРП, 2014. – 52 с.

36. Кузьмин, В. В. Энергоэффективность применения ротора в циклонном пылеуловителе / В. В. Кузьмин // Энергетика. (Изв.высш. учеб. Заведений и энерг. Объединений СНГ), 2004. – № 5. – С. 79-82.

37. Зиганшин, М. Г. Расчетные параметры осаждения взвеси в аппаратах с вращательным движением мультифазных потоков. Часть 2. Критерии эффективности циклонной сепарации / М. Г. Зиганшин, А. М. Зиганшин, Р. М.Гильфанов – Известия КазГАСУ, 2010. – № 2 (14). – С. 161-167.

38. Мисюля, Д. И. Применение лопастного раскручивателя в циклонных пылеуловителях / Д. И. Мисюля, В. В. Кузьмин, В. А. Марков // Труды БГТУ, 2011. – № 3. – С. 162–169.

39. Мисюля, Д. И. Новая конструкция лопастного раскручивателя циклонного аппарата / Д. И. Мисюля, В. В. Кузьмин, В. А. Марков // Энергетика – Изв. Высш. Учеб.заведений и энерг. Объединений СНГ. – 2010. – № 5. – С. 57–60.

40. Мисюля, Д. И. Устройство для снижения энергопотребления циклонов / Д. И. Мисюля, В. В. Кузьмин, В. А. Марков // Экология и промышленность России. – 2010. – № 9. – С. 20–22.

41. Мисюля, Д. И. Влияние раскручивающего устройства на эффективность очистки в циклонах / Д. И. Мисюля, В. В. Кузьмин, В. А. Марков // Промышленная энергетика. – 2011. – № 4. – С. 37–39.

42. Хазбулатов, А.И. Исследование и выбор оптимальных параметров работы прямоточно-центробежного сепаратора для очистки воздуха от пыли на входе в газоперекачивающий агрегат: Отчет о НИР/ ОАО Казанское моторостроительное производственное объединение (КМПО); Руководитель: В.К. Малков. – Казань. – 2005. – 55 с.

43. Темникова, Е. Ю. Исследование характеристик циклона с внутренними элементами / Е.Ю. Темникова, А.Р. Богомолов, П.Т. Петрик // Вести Кузбасского гос. Тех. Унив. – 2009. – № 2. – С. 140-144.

44. Справочник по пыле- и золоулавливанию / под общ.ред. А. А. Русанова. М. : Энергоатомиздат. – 1983. – 312 с.

45. Тканевые фильтры [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://xn----otbgekbe4dg2c.xn--p1ai/fabric-filters.html

46. Алиев, Г.М. Техника пылеулавливания и очистки промышленных газов: Справ, изд. М.: Металлургия. – 1986. – 544 с.

47. Никулин, Ф.Е. Утилизация и очистка промышленных отходов, С-Пб.: Судостроение. – 2006. – 68 с.

48. Бернадинер, М.Н., Шурыгин, А.П. Огневая переработка и обезвреживание промышленных отходов.- М.: Химия, 1990. – 238 с.

49. Марченко, Н. В. Металлургия тяжелых цветных металлов : учебное пособие / Н. В. Марченко, Е. П. Вершинина, Э. М. Гильдебрандт. – Красноярск: ИПК СФУ, 2009. – 394с.

50. Полезная информация о фильтрах [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://filters.analitpribor.com/index.php?option=com_k2&view=itemlist&task=category&Itemid=112&id=148

51. Зиганшин, М. Г., Зиганшин, А. М. Полуэмпирическая модель образования автослоя на тканых фильтрационных материалах: Часть 1. Исследование взаимодействия взвешенных частиц и препятствия в потоке // Известия КазГАСУ. – 2009. – № 1 (11). – С. 181-185.

52. Пат. 2306984 Российская Федерация МПК B04C 9/00. Устройства с использованием вихревых потоков, комбинированные с другими устройствами, например с вентиляторами / Кочетов О. С., Кочетова М. О., Львов Г. В.; патентообладатель Кочетов Олег Савельевич (RU); подача заявки: 2006-01-20; публикация патента: 27.09.2007. – 5 с.: ил.

53. Пат. 2150988 Российская Федерация МПК7 B01D50/00, B04C9/00. Циклон-фильтр для очистки запыленных газов / Зотов А. П., Красовицкий Ю. В., Ряжских В. И., Шипилова Е. А.;

патентообладатель Воронежская государственная технологическая академия (RU); подача заявки: 1999-06-24; публикация патента: 20.06.2000. – 2 с.: ил.

54. Зиганшин, М. Г. Системы очистки выбросов ТЭС: ч. 1: Монография. – Казань: Изд. КГЭУ, 2013. – 252с.

55. Валиулин, С. С. Разработка комбинированного фильтра-сепаратора для судовой энергетической установки и основ его проектирования.- автореф. дис. на соискание ученой степени кандидата тех. наук (05.08.05) / Валиулин Сергей Сергеевич; Федеральное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Волжская государственная академия водного транспорта» (ВГАВТ). – Нижний Новгород. – 2012. – 25 с.

56. Пат. 2361678 Российская Федерация МПК B04C9/00, B01D50/00. Циклон-фильтр / Зиганшин М. Г.; патентообладатель Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Казанский государственный архитектурно-строительный университет ФГОУ ВПО КазГАСУ (RU); подача заявки: 2008-03-14; публикация патента: 20.07.2009. – 5 с.: ил.

57. Пат. 2060792 Российская Федерация МПК B01D46/02. Фильтр-циклон / Безручко В.М.; патентообладатель Безручко Василий Михайлович; подача заявки: 1994-02-08; публикация патента: 27.05.1996. – 3 с.: ил.

58. Пат. 2251445 Российская Федерация МПК B01D46/26, B04C9/00. Фильтр-циклон для очистки газов / Панов С. Ю., Энтин С. В., Анжеуров Н. М., Красовицкий Ю. В., Щеглова Л. И.; патентообладатель Государственное образовательное учреждение Воронежская государственная технологическая академия (RU); подача заявки: 2003-07-18; публикация патента: 10.05.2005. – 2 с.: ил.

59. Безносик, Ю. А. Очистка газов от пыли в циклофильтрах / Безносик Ю. А., Плашихин С. В., Серебрянский Д. А., Шкварун К. Б. // Промисловаекологія.- конференция 3, секция №6.- Киев. – 2012. – С. 568-570.

60. Плашихин, С. В. Разработка и моделирование циклофильтра для очистки газовых сред / С.В. Плашихин, Ю. А. Безносик, Д. А. Серебрянский // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2010. – № 4/8 (46). – С. 42-44.

61. Белоусов, В. В. Теоретические основы процессов газоочистки – М.: Металлургия. – 1988. – 228с.

62. Серебрянский, Д. А. Циклонные пылеуловители. Малозатратная модернизация / Д.А.Серебрянский, А.А.Захаров, С.В.Плашихин // ХІМІЧНА ПРОМИСЛОВІСТЬ УКРАЇНИ.- 2013. – № 3. – С. 70-74.

63. Левин, А. Ю., Кесель, Б. А. Принципы оптимизации конструкции прямоточного циклона с внутренней жалюзийной решеткой// Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева – №2 (70). Вып. 2 – 2013. – С. 45–51.

64. Кныш, Ю. А. Автоколебания в закрученных струях: монография / Ю.А. Кныш. // Самара: Изд-во Самарского научного центра РАН. – 2006. – 248 с.

65. Utikar, R. Hydrodynamic Simulation of Cyclone Separators / Utikar R., Darmawan N., Tade M., Li. Q. Evans, G. Glenny, M. and Pareek V. // World's largest Science, Technology & Medicine Open Access book publisher. – 2010. – 420 p.

66. Халатов, А. А., Авраменко, А. А., Шевчук, И. В. Теплообмен и гидродинамика около криволинейных поверхностей // К.: Наукова Думка. – 1992. – 135 р.

67. Janis Galins, Aigars Laizans. Increasing cyclone efficiency by using a separator plate / Rural and environmental engineering, landscape architecture. – 2018. – P. 207-210.

68. Balestrin, E., Analternative for the collection of small particles in cyclones: experimental analysis and CFD modeling / R. K. Decker, D. Noriler, J.C.S.C. Bastos, H. F. Meier // Separation and Purification Technology. – 2017. – №184. – P. 54-65.

69. Balestrin, E. Sensibility Study of the Reynolds Stress Model Parameters for Swirling Flows in Cyclones / R. D. Luciano, D. Noriler, R. K. Decker, H. F. Meier // Chemical Engineering Transactions. – 2015. – №43. – P. 111-115.

70. Brar, L. S. The effect of the cyclone length on the performance of Stairmand high-efficiency cyclone / R. P. Sharma, K. Elsayed // Powder Technology. – 2015. – №286 – P. 668-677.

71. Souza, F. J. Effects of the gas outlet duct length and shape on the performance of cyclone separators / R. V. Salvo, D. M. Martins // Separation and Purification Technology. – 2015. – №142. – P. 90-100.

72. Funk, P.A. Reducing cyclone pressure drop with evasés // Powder Technology. – 2015. – №272. – P. 276-281.

73. Chen, Q. Effects of flue gas recirculation on emissions from a small scale wood chip fired boiler // X. Zhang, J. Zhou, V. Sharifi, J. Swithenbank // Energy Procedia. – 2015. – №66. – P.65-68.

74. Junga, R. Uncertainty estimation of the efficiency of small-scale boilers / P. Chudy, J. Pospolita // Measurement. – 2017. – №97. – P.186-194.

75. Noble, A., Luttrell, G. H. A review of state-of-the-art processing operations in coal preparation // International Journal of Mining Science and Technology. – 2015. – № 25. – P.511-21.

76. Amini, S. H. Assessing the feasibility of silica-based media for coal preparation operations: A novel method of carbon feedstock production for the silicon market / R. Honaker, A. Noble // Powder Technology. – 2016. – №288. – P. 176-83.

77. Amini, S. H. Performance evaluation of a dense-medium cyclone using alternative silica-based media / R. Honaker, A. Noble // Powder Technology. – 2016. – №297. – P. 392-400.

78. Быстров, Ю.Л. Численное моделирование вихревой интенсификации теплообмена в пакетах труб / Ю. Л. Быстров, С. А. Исаев, Н. А. Кудрявцев, А. И. Леонтьев. // СПб.: Судостроение. – 2005. – 390 с.

79. Еремкин, А.И. Безразмерный параметр инерционного захвата частиц из потока при фильтрации / А.И. Еремкин, А.М. Зиганшин, М.Г. Зиганшин // Региональная архитектура и строительство. – 2009. – №2(7). – С. 79-83.

80. Замалиева, А.Т., Зиганшин,М.Г. Натуральные и численные исследования эффективности циклонного фильтра для очистки выбросов ТЭС // Международная научно-техническая конференция «Состояние и перспективы развития электротехнологии». – Иваново. – 2013. – С. 100-103.

81. Замалиева, А.Т., Зиганшин,М.Г. Изменение эффективности и аэродинамических свойств циклона посредством численных и натурных исследований // Сборник материалов докладов «Национальный конгресс по энергетике», Т. 3. – КГЭУ. – 2014. – С. 141-149.

82. Cardoso, M.F.; Optimization of Reactive Distillation Processes with Simulated Annealing / R.L.Salcedo, A.S.Feyo, D.Barbosa // Chem. Eng. Sci, 2000. – 55 (21) – С. 5059–5078.

83. Пейре, Р., Тейлор, Т. Д. Вычислительные методы в механике жидкости. – Л.: Гидрометеоиздат. – 1986. – 352 с.

84. Горин, А. В. Обзор моделей расчета течения несжимаемой жидкости в квадратной каверне / А.В. Горин // Градиентные и отрывные течения: сб. Научн. Тр. – Новосибирск: ИТ. – 1976. – С. 85-116.

85. Темникова, Е. Ю. Сравнение рабочих характеристик традиционного циклона и имеющего внутренние элементы с помощью программного комплекса Σflow / Е.Ю. Темникова, М. Ю. Чернецкий // Химия – XXI век: новые технологии, новые продукты: тр. XII международ. Науч.-практ. Конф., 21-24 апр. 2009 г. – Кемерово. – 2009. – С. 131-132.

86. Плашихин, С.В. Извлечение твердой фазы из газовой среды в циклоне с тангенциальным подводом / С. В. Плашихин, Ю. А. Безносик, Д. А. Серебрянский // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2010. - № 2/10(44). – С.43 – 45.

87. Алямовский, А. А. Компьютерное моделирование в современной практике / А. А. Алямовский, А. А. Собачкин, Е. В. Одинцов – СПб.: БХВ – Петербург. – 2005. – 800с.

88. Горбис, З. Р. Физическая модель и математическое описание процесса движения мелких частиц в турбулентном потоке газов / З. Р. Горбис, Ф. Е. Спокойный // Теплофизика высоких температур, т. 15. – 1977. – №2. – С.399 – 408.

89. Серебрянский, Д. А. Очистка газов от пыли в центробежных фильтрах / Серебрянский Д. А., Новаковский Е. В. / Нац. акад. Украины, ин-т техн. теплофизики. – Киев. – 2009. – т. 31, № 3. – С.55-61.

90. Алиев, Т. Т. Моделирование в среде ANSYS течения многокомпонентной газовой смеси через циклон ЦКБН пылеуловителя ГП-628 на участке очистки газа / Т. Т. Алиев, С. Н. Беляев, А. С. Галахарь – Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2014. – № 10. – С. 25-30.

91. Смирнов, Д. Е. Математическое моделирование процесса пылеулавливания в ИЦПК / Д.Е. Смирнов, А. В. Сугак, В. К. Леонтьев, Я. В. Чистяков, Н. И. Володин / Известия ТулГУ. Науки о Земле. – 2010. – Вып. 1. – С.123-128.

92. Пат. 81092 U1. Российская Федерация, МПК B01D45/04. Устройство для улавливания и классификации пыли по фракциям / Н.И. Володин [и др.]. – Опубл. 10.03.2009. Бюл. №7.

93. Чистяков, Я.В. Разработка и исследование опытной конструкции высокоэффективного пылеуловителя и основ математической модели газодинамического процесса сепарации мелкодисперсной пыли / ИзвестияТулГУ. Науки о земле. 2011. Вып. 1. – С.87-94.

94. Моделирование отрывных течений на ЭВМ / О.М.Белоцерковский [и др.]// М.: Научный совет по комплексной проблеме «Кибернетика» АН СССР. – 1984. – 122с.

95. Ватин, Н.И. Численное моделирование трехмерного поля скорости в циклоне / Н.И.Ватин, А.А.Гиргидов, К.И.Стрелец / Инженерно-строительный журнал №5. – 2011. – С.5-9.

96. Гиргидов, А. Д. Механика жидкости и газа (гидравлика). СПб.: Изд-во Политехн, ун-та. – 2007. – 545 с.

97. Стрелец, К. И. О характеристиках пыли, используемых при расчете эффективности пылеудаления в циклоне // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2010. – № 110. – С. 222-226.

98. Гиргидов, А.Д. Турбулентная диффузия с конечной скоростью. – СПб.: СПбГТУ. – 1996. – 260 с.

99. Скорер, Р. Аэрогидродинамика окружающей среды / пер. с англ. В. А. Хохрякова и Л. К. Эрдмана. М. : Мир, 1980.-549 с.

100. Титьенс, О. Гидро- и аэромеханика. В 2 т. / по лекциям профессора Прандтля, пер. Снем. ГА. Вольперта. М.: Государственное технико-теоретическое издательство. – 1932. – 222 с.

101. Thakur, S. C., Ooi, J. Y., Ahmadian, H. Scaling of discrete element model parameters for cohesionless and cohesive solid // Powder Technology. – 2016. – №293. – P.130-7.

102. Буров, А.С. Численное исследование двухфазного закрученного течения в прямоточном циклоне. – автореф. дис. на соискание ученой степени кандидата тех. наук (01.02.05) / Буров

Артем Сергеевич; Федеральное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования КНИТУ-КАИ – Казань. – 2016. – 19с.

103.Lu, L. Computer virtual experiment on fluidized beds using a coarse-grained discrete particle method-EMMS-DPM / J. Xu, W. Ge, G. Gao, Y. Jiang, M. Zhao, et al. // Chemical Engineering Science. – 2016. – №155. – P. 314-37.

104.Chu, K. W., Chen, J., Yu, A. B. Applicability of a coarse-grained CFD–DEM model on dense medium cyclone // Minerals Engineering. – 2016. – № 90. – P. 43-54.

105.Зиганшин, М.Г. Системы очистки выбросов ТЭС. Часть 2. Оценки эффективности, верификация критериев оценки: Монография.-Казань: КГЭУ. – 2013. – 212с.

106.Osama, Hamdy, Magdy, A. B., Hesham M. E. , Tarek, A. M. Numerical study of the effect of changing the cyclone cone length on the gas flow field: applied mathematical modelling. – 2017. – P. 81-97.

107.Wang, B., Chu, K. W., Yu, A. B., Vince A. Modeling the multiphase flow in a dense medium cyclone: Industrial & Engineering Chemistry Research, 48. – 2009. – P. 3628-3639.

108.Hilton, J. E., Cleary, P. W. Comparison of non-cohesive resolved and coarse grain DEM models for gas flow through particle beds // Applied Mathematical Modelling. – 2014. – №38. – P. 4197-214.

109.Mokhtar, M. A. Validation of the similar particle assembly (SPA) model for the fluidization of Geldart's group A and D particles/ K. Kuwagi, T. Takami, H. Hirano, M. Horio //AIChE Journal. - 2012. – № 58. – P.87-98.

110.Соломатин, Р.С., Семенов, И.В., Меньшов, И.С. К расчету турбулентных течений на основе модели Спаларта-Аллмараса с применением LU-SGS–GMRES алгоритма // ИПМ им. М.В.Келдыша. – 2018. – № 119. – 30 с.

111.Sgrott, O.L. Cyclone optimization by COMPLEX method and CFD simulation / D.Noriler, V.R. Wiggers, H.F. Meier // Powder Technology. – 2015. – №277. – P. 11-21.

112.Zhou, Z. Y., Kuang, S. B., Chu, K. W., Yu, A. B., Assessments of CFD-DEM models in particlefluid flow modeling: Journal of Fluid Mechanics, 661. – 2010. – P. 482-510.

113.Зиганшин, А. М., Гимадиева, Г. А., Батрова, К. Э. Численное исследование истечения из бокового последнего и среднего отверстий: сб. Статей I Всероссийской научно-технической конференции, посвящённой памяти д-ра техн. наук, профессора, А. А. Сандера / НГАСУ. Новосибирск. – 2017. – С. 103-111.

114.Зиганшин, А.М. Снижение энергозатрат при движении потоков путем профилирования фасонных частей в коммуникациях энергоустановок // Надежность и безопасность энергетики. – 2015. – №1(28). – С. 63-68.

115.Пат. 2604264 Российская Федерация: МПК F15D1/04. Соединительный фасонный элемент с профилирующими вставками / Зиганшин А.М., Алещенко И.С., Зиганшин М.Г. и др.; патентообладатель: КГАСУ; подача заявки: 17.09.14; публикация патента: 10.12.16.

116. Зиганшин, А. М. Потери давления и характеристики струи, выходящей через среднее боковое отверстие/ А. М. Зиганшин, Г. А. Гимадиева, К. Э. Батрова // Известия КазГАСУ. – 2017. – №4(42). – С. 257- 265.

117.Logachev, K. I., Ziganshin, A. M., Averkova, O. A., Logachev, A. K. A survey of separated airflow patterns at inlet of circular exhaust hoods, Energy & Buildings. – 2018. –№173. – P. 58-70.

118. Идельчик, И. Е. Гидравлическое сопротивление циклонов, его определение, величина и пути снижения. Механическая очистка промышленных газов. – М.: НИИОГАЗ. – 1974. – С. 135-159.

119. Нейков, О.Д. Аспирация и обеспыливание воздуха при производстве порошков / О.Д. Нейков, И.Н. Логачев. – М.: Металлургия. – 1981. – 192 с.

120.Разва, А.С. Оценки гидродинамических параметров циклонных потоков и разработка новых технических решений инерционных пылеуловителей. – автореф. дис. на соискание ученой степени кандидата тех. наук (05.17.08) / Разва Александр Сергеевич; Томский политехнический университет, Томск. – 2009. – 20 с.

121. Азимова, Н. Н. Сравнительный анализ аэродинамических характеристик центробежных пылеуловителей при проведении параллельных сравнительных испытаний / Н.Н. Азимова, Ю. И. Булыгин, И. С. Купцова. – Ростов-на-Дону // Вестник Донского государственного технического университета. – 2017. – №3(90). – С.156-165.

122.Трубки напорные модификации НИОГАЗ и ПИТО. Руководство по эксплуатации [Электронный ресурс] / ООО НПО «ЭКО-ИНТЕХ». – Режим доступа: http://www.eco-intech.com/img/Avimg/Brochure/instr%20trubki.pdf (дата обращения: 01.08.17).

123. Охрана природы. Атмосфера. Методы определения скорости и расхода газопылевых потоков, отходящих от стационарных источников загрязнения. ГОСТ 17.2.04.06-90 / Межгосударственный Совет по стандартизации, метрологии и сертификации. – М.: Издательство стандартов, 2003. – 11 с.

124.Замалиева, А. Т. Опытная установка для исследования энергоэффективности циклонного фильтра // Материалы X школы-семинара молодых ученых и специалистов академика РАН В. Е. Алемасова «Проблемы тепломассообмена и гидродинамики в энергомашиностроении». – КазНЦ РАН. – 2016. – С.322-325.

125.Замалиева, А. Т., Беляева, Г. И., Зиганшин, М. Г. Исследование изменений аэродинамических свойств и энергоэффективности в циклонных аппаратах для очистки газа // Территория Нефтегаз №2. – 2018. – С.258-264.

126. Zamalieva, A. T., Ziganshin, M. G. Improving Energy and Environmental Efficiency of Flue Gas Cleaning at Thermal Power Plants // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2019. – P. 288.

127. Zamalieva, A. T., Ziganshin, M. G. Numerical and experimental studies of gas cleaning in multi-cyclone elements with filter inserts // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – P. 481.

128.Замалиева, А.Т., Зиганшин, М.Г. Усовершенствованная установка фильтрации газа на ТЭЦ при подготовке топлива для городских энергетических систем // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – Т.21. №5. – 2019. – С.124-131.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А. Конструкция разработанного циклона-фильтра

Циклон-фильтр содержит штуцер для ввода запыленного газового потока 1, установленный тангенциально на цилиндрическом корпусе 2, имеющем коническое днище 3 с затвором 9, расположенную соосно с цилиндрическим корпусом выхлопную трубу 4, по диаметру которой внутри корпуса циклона установлена фильтровальная вставка 5, (например, материал лавсан), зафиксированный в металлическом каркасе 6, который закреплен к торцу 8 циклона. Снаружи, радиально цилиндрического корпуса 2, установлены продувочные штуцера 7, также имеются детали крепежа 10 цилиндрического корпуса к коническому днищу, необходимые в случае замены каркаса с фильтром. Ниже входного патрубка между основной фильтровальной вставкой и выхлопной трубой установлен поперечный фильтр 11. По диаметру от выхлопной трубы в нижней его части до фильтровальной вставки 5 установлен горизонтальный фильтр, одна часть которой из ткани 12, а другая металлическая 13. Данная вставка закреплена с одной стороны на пластине с пружиной 14, с другой стороны на кольцах к стержню 15. Металлическая часть горизонтального фильтра закреплена на складывающемся фильтре 16.

Циклон-фильтр работает следующим образом (рисунок А.1). Дисперсный поток попадает в штуцер тангенциального ввода потока 1 со скоростью, значительно превышающей оптимальную для обычного циклона такого же типа и соответствующей инерционному осаждению более чем на 50% частиц размером 1 мкм и выше, и направляется в циклон. Затем поток проходит вдоль фильтра 5, установленного на каркасе 6 в кольцевой части циклонного элемента, где происходит касательное и инерционное осаждение пыли. Для избежания проскока частиц ниже входного патрубка между основной фильтровальной вставкой и выхлопной трубой установлен поперечный фильтр 11. По диаметру от выхлопной трубы в нижней его части до фильтровальной вставки 5 установлен горизонтальный фильтр, одна часть которой из ткани 12, а другая металлическая 13, предназначенная для заключительного улавливания мелкодисперсных частиц. Данная вставка закреплена на пластине с пружиной 14. При регенерации масса скопившейся пыли на металлической части давит на пружину, пластина опускается и фильтр, закрепленный с другой стороны на кольцах к стержню 15, тоже опускается и накопленная пыль сбрасывается в бункер. Чтобы пыль не подсасывалась в выхлопную трубу при регенерации, её необходимо закрепить на складывающемся фильтре 16. А тканая часть – фиксированная. Пыль удаляется через коническое днище 3 и затвор 9. В ситуации, когда необходим ремонт внутренней части аппарата, освобождают крепежные элементы 10 (например, болты и гайки), отодвигают коническую часть циклона 3.

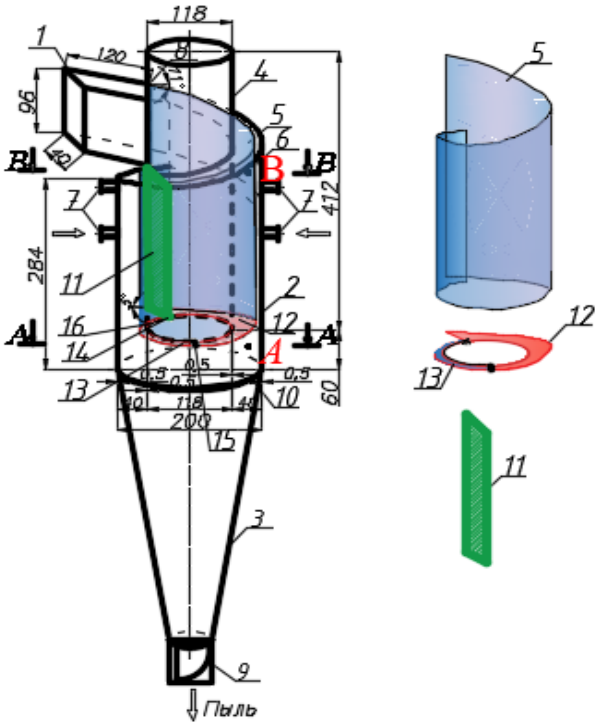


Рисунок А.1 Конструкция разработанного циклона-фильтра: 1 - входной патрубок; 2 - цилиндрический корпус; 3 - коническое днище; 4 - выхлопная труба; 5 (б) - фильтровальный материал; 6 - металлический каркас; 7 - продувочные штуцера; 8 - торец циклона; 9 - заслонка; 10 - детали крепежа; 11 (в) - поперечный фильтр; 12 (г) - горизонтальный фильтр, тканая часть; 13 - горизонтальный фильтр, металлическая часть; 14 - пластина с пружиной; 15 - стержень с кольцами; 16 – складывающийся фильтр

Приложение Б. Инструкция по эксплуатации циклона-фильтра

Настоящая инструкция разработана в соответствии с требованиями Постановлению Минтруда РФ от 17 декабря 2002 г. N 80 "Об утверждении Методических рекомендаций по разработке государственных нормативных требований охраны труда", СТО Газпром 2-2.3-684-2012 «Компрессорные станции. Технологические установки. Порядок проведения технического обслуживания и ремонта», СТО Газпром 2-2.3-1081-2016 «Газораспределительные станции. Общие технические требования», СТО Газпром 2-2.3-1122-2017 «Газораспределительные станции. Правила эксплуатации».

Требования к эксплуатации установки очистки газа

Техническое обслуживание циклона-фильтра проводится по утвержденному графику технического обслуживания. При этом не допускается проведение ремонта, находящихся под давлением. В целях обеспечения безопасности при техническом обслуживании и ремонте, связанными с производством работ внутри конструкции до начала этих работ циклон должен быть отключен заглушками.

Техническая характеристика фильтра:

Среда – природный газ;

Температура среды - ±40°С;

Рабочее давление - 55 кг/см²;

Пробное давление - 69 кг/см².

Перед запуском системы фильтрации обслуживающий персонал должен проверить, что фильтрующие элементы должны быть в комплекте и правильно установлены. Поток газа необходимо медленно увеличивать, проверяя падение давления, чтобы убедиться в правильности установки внутренних узлов. Перепад давления при чистом фильтре и номинальном расходе составляет 0,125 кгс/см^2.

Приказом (распоряжением) руководителя предприятия должно быть назначено лицо, ответственное за эксплуатацию и обслуживание установки очистки газа. Должностное лицо, ответственное за эксплуатацию и обслуживание установки очистки газа, обязано обеспечить:

- соблюдение "Правил эксплуатации установок очистки газа" и настоящей инструкции
- своевременное проведение технического обслуживания, текущих и капитальных ремонтов, а также реконструкции установки
- содержание в исправном состоянии пробоотборных устройств
- своевременное проведение контроля эффективности работы установки
- ведение учетно-отчетной документации по эксплуатации и обслуживанию установки.

Установка очистки газа должна работать надежно, бесперебойно и с показателями, соответствующими проектным, иметь вспомогательные устройства и инвентарь.

Запрещается:

- использовать технологическое оборудование при неисправной или отключенной установке очистки газа, в том числе с применением обводных газоходов, исключающих ее из процесса улавливания и (или) обезвреживания загрязняющих веществ
- увеличение производительности технологического оборудования, сопровождающееся изменением объема отходящих газов или концентрации в нем загрязняющих веществ, без одновременного наращивания мощности действующей установки очистки газа
- вносить изменения в конструкцию аппаратов очистки газа или параметры работы установки очистки газа без согласования с проектной организацией и заводом-изготовителем установки очистки газа.

Аппараты должны подвергаться техническому освидетельствованию (наружному, внутреннему осмотру и гидравлическим испытаниям) до пуска в работу, периодически в процессе эксплуатации и в необходимых случаях внеочередному освидетельствованию в соответствии с требованиями раздела VI «Правил промышленной безопасности опасных производственных объектов, на которых используется оборудование, работающее под избыточным давлением».

Ежесменно должно проводиться наблюдение и контроль за плотностью фланцевых соединений, арматуры, резьбовых соединений, КИП (не реже 1 раза в смену) на предмет утечек газа с записью в специальном журнале. Продувка фильтров производиться раз в сутки, при необходимости 2-3 раза в сутки.

Установка очистки газа должна подвергаться систематическим осмотрам комиссией, назначенной приказом руководителя предприятия, для оценки ее технического состояния, выявления дефектов, износа и повреждения элементов, металлоконструкций и разработки мер по устранению дефектов, восстановлению ее работоспособности и соответствия работы установки "Правилам эксплуатации установок очистки газа" и определению возможности ее дальнейшей эксплуатации:

- не реже одного раза в полугодие с оформлением акта проверки и оценки технического состояния
- перед включением установки в работу и в процессе работы оборудования установки визуальным осмотром и по показаниям контрольно-измерительных приборов
- при проведении технического обслуживания оборудования установки
- перед проведением инструментального контроля показателей работы оборудования установки
- перед проведением ремонтов оборудования установки с оформлением ведомости дефектов

- перед проведением работ по инвентаризации выбросов загрязняющих веществ в атмосферу

При обследовании необходимо обращать внимание на:

- исправность установки, коммуникаций, теплоизоляции, защитных и антикоррозийных покрытий
- исправное действие приборов, аппаратов и устройств, средств автоматизации и блокировки
- наличие отложений пыли во входном патрубке, на стенках корпуса, в конусной части и бункере
- соответствие фактических показателей работы установки показателям, указанным в паспорте установки
- соблюдение графиков ремонта и профилактических осмотров
- наличие на рабочем месте инструкции, а также знание обслуживающим персоналом "Правил эксплуатации установок очистки газа" и настоящей инструкции

По результатам осмотра составляется акт и при необходимости разрабатываются мероприятия по устранению обнаруженных недостатков, а также график проведения технического обслуживания и планово-предупредительного (текущего) ремонта установки очистки газов. Акт и график ППР прилагаются к паспорту установки.

Данные о дате осмотра и результатах работы комиссии вносятся в паспорт установки должностным лицом, ответственным за эксплуатацию и техническое обслуживание установки.

Каждый случай нарушения работы установки очистки газа, приводящий к снижению параметров ее работы, остановке или аварии, должен быть расследован комиссией.

Показатели работы установки очистки газа ежегодно должны подвергаться контролю инструментальными методами. Проверки эффективности работы установки очистки газа с использованием средств инструментального контроля должны проводиться аккредитованной экоаналитической лабораторией в соответствии с методиками выполнения измерений.

В случае, если в связи с демонтажем или приостановкой работы технологического оборудования, эксплуатация установки очистки газа приостанавливается и при этом она находится в исправном состоянии, проводятся работы по ее консервации, на корпус монтируется табличка "На консервации", комиссией составляется акт об остановке работы и консервации установки, в паспорт установки очистки газа вносится соответствующая запись.

Уловленные и (или) обезвреженные загрязняющие вещества, отдельные узлы установки очистки газа, пришедшие в негодность или образовавшиеся при ее ликвидации используются или передаются в специализированные организации в соответствии с требованиями законодательства об отходах.

Пуск установки очистки газа

Пуск установки очистки газа производится после тщательного осмотра, в процессе которого проверяется отсутствие посторонних предметов в подводящем коллекторе, бункере, чистота внутренних поверхностей, надежность работы пылевых затворов, герметичность люка. Перед пуском имеющаяся в бункере пыль должна быть удалена.

Перед пуском установки очистки газа в работу необходимо убедиться что:

- ремонтные работы закончены, установка очистки газа исправна и готова к эксплуатации (люки закрыты, леса демонтированы, посторонние предметы убраны, люди отсутствуют);
- при внешнем осмотре установки целостность тепловой изоляции антикоррозионных покрытий не нарушена;
- газопроводы, корпуса циклонов, бункеры, люки, фланцевые и сварные соединения герметичны;
- уровень пыли в накопительных бункерах находится в допустимых пределах - механизмы удаления пыли и средства транспортировки ее исправны и подготовлены к работе;
- приборы контроля и автоматики в наличии и исправны.

Все обнаруженные неисправности должны быть устранены до включения установки в работу. После осмотра и устранения обнаруженных неисправностей установка очистки газа может быть включена в работу по распоряжению начальника основного технологического оборудования.

Пуск установки очистки газа должен выполняться в следующей последовательности:

1. включаются механизмы транспортировки пыли;
2. включается пылевыгрузочное устройство;
3. открываются шибера для пуска газа в установку.

При аварийной остановке циклон должен быть немедленно остановлен в следующих случаях: при увеличении перепада давления выше допустимого; если давление поднялось выше разрешенного и не снижается, несмотря на меры, принятые персоналом; при обнаружении в циклоне и его элементах, работающих под давлением, неплотностей, выпучин, разрыва фильтра; при неисправности манометра и невозможности определить давление по другим приборам; при возникновении пожара.

При отключении аппарата для внутреннего осмотра: продуть дренажную систему и освободить через затвор от скопившихся механических примесей; перекрыть краны на входе и выходе нужной секции узла механической очистки; стравить полностью газ с аппарата, через линии стравливания газа; отсоединить элементы обвязки сосуда для создания видимого разрыва на входе выходе и дренаже циклона; открыть люк-лаз и визуальным осмотром определить

внутреннее состояние циклона и установленного фильтра для определения объёма работ внутри аппарата; при производстве всех видов работ внутри аппарата строго соблюдать требования типовой инструкции по организации безопасного ведения газоопасных работ; при замене фильтрующих вставок.

Если требуется проверить или заменить вставки, обслуживающий персонал проверяет и выполняет следующее:

- краны на входе в циклон-фильтр должны быть в закрытом положении;
- аппарат должен быть опорожнен в атмосферу через свечную линию;
- быстродействующий затвор должен быть открыт в том случае, если аппарат без давления. Если он все еще находится под давлением, предохранительное устройство не позволит открыть дверцу.

Признаком возникновения отказов циклон-фильтра является разрушение уплотнений, нарушение герметичности.

Перечень критических отказов циклон-фильтра:

- неспособность фильтра поддерживать давление и температуру в заданных пределах;
- неспособность (отказ) фильтра обеспечивать направленное движение входящего потока рабочей среды;
- деформация элементов фильтра, работающих под давлением.

Возможные ошибочные действия персонала, которые могут привести к инциденту или аварии.

Конструкция циклон-фильтра и его элементов спроектирована и изготовлена таким образом, что исключает аварийные ситуации, которые могли бы быть вызваны ошибочными действиями персонала.

На оборудовании предусмотрены предохранительные устройства, которые предотвращают возможное создание избыточного давления на входе самой установки и ее потребителей из-за неправильной эксплуатации, неисправного состояния фильтра или по внешним причинам.

- системой аварийного отключения;
- механическая безопасность:

- применением материалов основных деталей оборудования, работающих под давлением, выбранных с учетом параметров и условий эксплуатации, а также с учетом опасности, исходящей от рабочей среды;
- проведением расчетов на прочность с использованием верифицированных программ и обеспечением необходимых запасов прочности для основных элементов конструкции оборудования с учетом условий его эксплуатации (рабочих давлений, температуры рабочей

среды, климатических условий, возможного эрозионного и коррозионного воздействия рабочей среды, сейсмических и других внешних воздействий);

- применением узлов и деталей, апробированных и подтвержденных испытаниями конструктивных решений;
- герметичностью оборудования относительно внешней среды;

- термическая безопасность:
  - герметичностью относительно внешней среды;
  - проведением сборки/монтажа в соответствии с регламентируемыми процедурами.

Критериями предельного состояния циклона-фильтра являются:

- прекращение выполнения изделием заданных функций (отказ функционирования); снижение качества функционирования по одному или нескольким из выходных параметров (дефекты, вызванные коррозией металла; нарушение целостности конструкции и др.) за пределы допускаемого уровня;
- внешние проявления, связанные с наступлением или предпосылками наступления неработоспособного состояния (разрушение деталей конструкции и др.);
- отказ одной или нескольких составных частей, восстановление или замена которых на месте эксплуатации не предусмотрены эксплуатационной документацией (должны выполняться на предприятии-изготовителе или на специализированном ремонтном предприятии);
- механический износ ответственных деталей (узлов) или снижение физических свойств материалов до предельно допустимого уровня;
- снижение наработки на отказ (повышение интенсивности отказов) ниже (выше) допустимого уровня;
- повышение установленного уровня текущих (суммарных) затрат на техническое обслуживание и ремонт или другие признаки, определяющие экономическую нецелесообразность дальнейшей эксплуатации.

Приложение В. Акт внедрения циклона-фильтра на АГРС «Арск»

Утверждаю
Директор ООО «НПП «Авиагаз-Союз+»
_____ И.М. Хабибуллин
«____»_____25.01_____2019г.

АКТ

внедрения предложений по повышению эффективности очистки газов на ГРС от мелкодисперсных частиц классов PM_{10}, $PM_{2,5}$

В ООО «Газпром трансгаз Казань» принято к внедрению предложение по повышению эффективности очистки газов от мелкодисперсных частиц классов PM_{10}, $PM_{2,5}$ с минимальными энергетическими и материальными затратами в системе газоочистки ГРС.

Объектом исследования является система фильтрации газораспределительной станции АГРС «Арск».

Целью работы является повышение эффективности систем газоочистки, также повышение надежности работы оборудования вследствие снижения износа их рабочих поверхностей на газораспределительных станциях.

Основанием для внедрения служат:

1. Соответствие указанного предложения обязательствам эксплуатации узла очистки в соответствии с требованиями действующих нормативных документов (ОСТ 26-02645-72) ООО «Газпром трансгаз Казань» и его филиалов;
2. Соответствие требованиям СП 62.13330.2011, согласно которым концентрация примеси твёрдых частиц размером 10 мкм не должна превышать 0,3 мг/кг. Разработка позволяет достичь увеличения пропускной способности очистных аппаратов при повышении качества очистки газа, которое выражается в уменьшении размера частиц, улавливаемых на 50% (диаметра отсекания), со средних для циклонов значений 10 мкм до 1,6 мкм.

Техническим результатом является повышение эффективности очистки газов от мелкодисперсных частиц классов PM_{10}, $PM_{2,5}$ с минимальными энергетическими и материальными затратами путем установки дополнительных фильтрующих элементов в качестве второй степени очистки при условии уменьшения абразивного износа внутренних поверхностей аппарата. При этом использовались

наряду с традиционными методами исследований также и компьютерное моделирование конструкций и элементов сепарационного оборудования.

Таким образом, проведенные опытные исследования показали целесообразность конструктивного дополнения возвратно-поточных циклонов фильтрующей вставкой в кольцевой области циклона.

Начальник
конструкторского отдела А.М.Уханов

Приложение Г. Теоретические расчёты определения эффективности инерционного осаждения опытного циклона

Диаметр корпуса циклона 200мм. Расчетные параметры: $\rho_p = 1930 кг/м^3$; $\rho_g = 1,2 кг/м^3$; $\eta = 22,2 \cdot 10^{-6} Па \cdot с$. Результаты расчетов относительного числа Рейнольдса Re_r для размеров частиц D_p= (1…100)·10^{-6} м при скорости потока на входе в циклон V_0 =1,0…14,0 м/с представлены на рисунках Г.1., рис.Г.8.

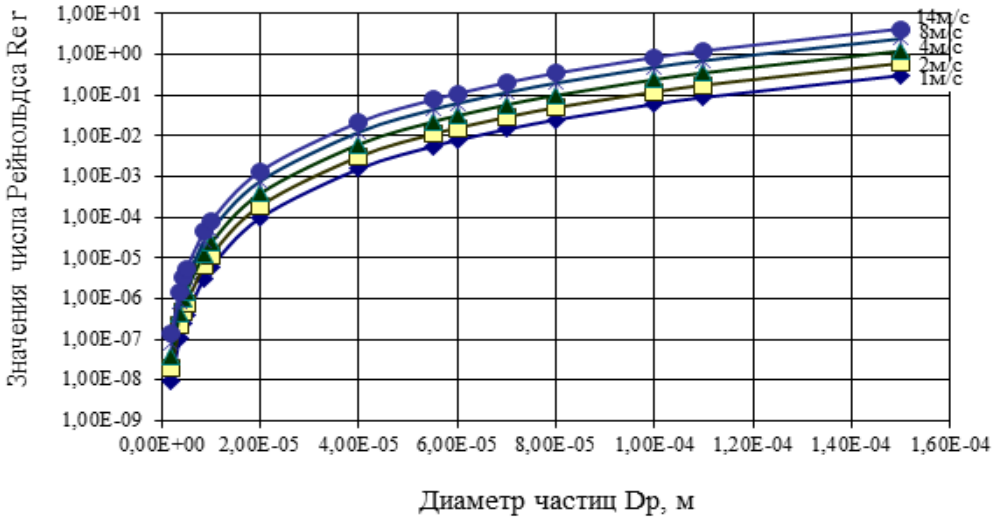


Рисунок Г.1. Зависимость относительного числа Рейнольдса Re_r для циклона от размера осаждаемых частиц D_p, м при установке фильтра на R=0,06м

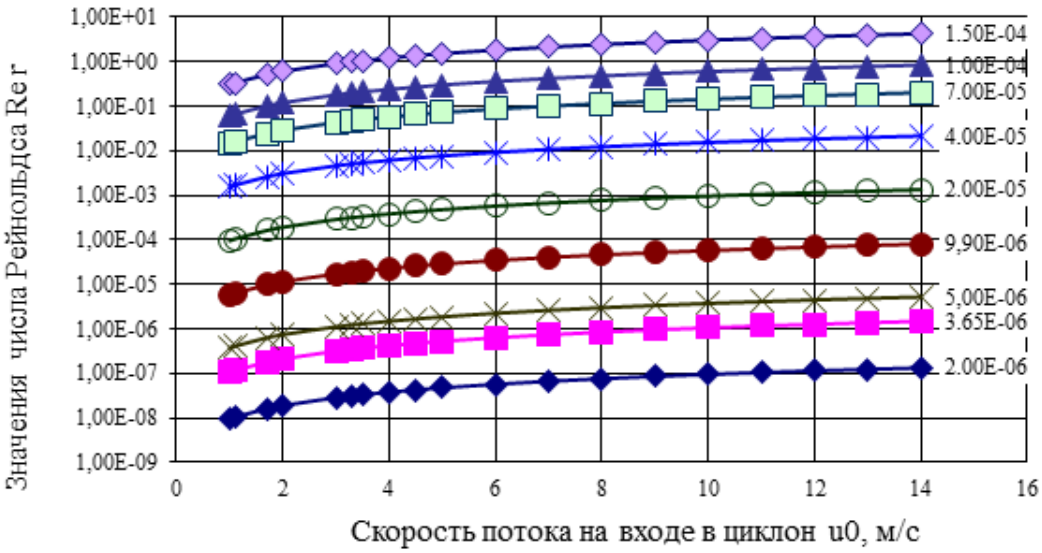


Рисунок Г.2. Зависимость относительного числа Рейнольдса Re_r для циклона от скорости потока на входе в циклон V_0, м/с при установке фильтра на R=0,065м

Результаты вычислений критических чисел Рейнольдса Re_r, соответствующих сепарации частиц из потока, вращающегося в кольцевом сечении модели циклона при установке фильтра на расстоянии R=0,065м при скорости потока на входе 3,5 м/с частицам диаметром D_p=50·10^{-6}м соответствуют числа Re_r =1,31·10^{-6}, при скорости 10 м/с Re_r =3,75·10^{-6}, при скорости 14 м/с Re_r

=5,26·10^{-6}, а для D_p=99·10^{-6}м соответствуют Re$_r$ =2,02·10^{-5}, при скорости 10 м/с Re$_r$ =5,77·10^{-5}, при скорости 14 м/с Re$_r$ =8,08·10^{-5}.

Для сравнения на рисунках Г.3, Г.4, Г.5 и Г.6 приведены результаты расчетов значений Рейнольдса Re$_r$ по частицам того же диапазона размеров и скорости при установке фильтра на разных расстояниях от оси R=0,08м, R=0,1м.

При установке фильтра на расстоянии от оси R=0,08м при скорости потока на входе 3,5 м/с частицам диаметром D_p=50·10^{-6}м соответствуют числа Re$_r$ =5,54·10^{-7}, при скорости 10 м/с Re$_r$ =1,58·10^{-6}, при скорости 14 м/с Re$_r$ =2,22·10^{-6}, а для D_p=99·10^{-6}м соответствуют Re$_r$ =8,52·10^{-6}, при скорости 10 м/с Re$_r$ =2,43·10^{-5}, при скорости 14 м/с Re$_r$ =3,41·10^{-5} (рисунки Г.3, Г.4).

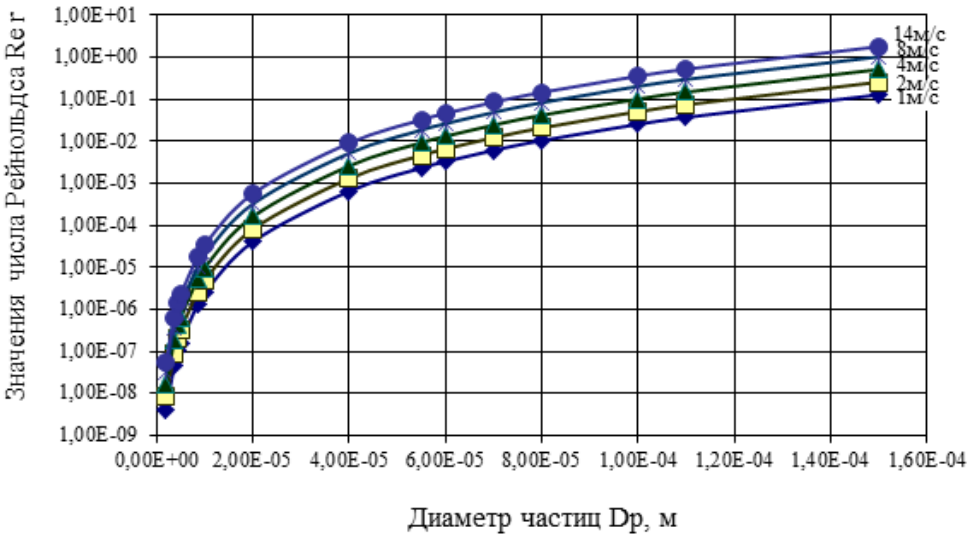


Рисунок Г.3. Зависимость относительного числа Рейнольдса Re$_r$ для циклона от размера осаждаемых частиц D_p, м при установке фильтра на R=0,08м

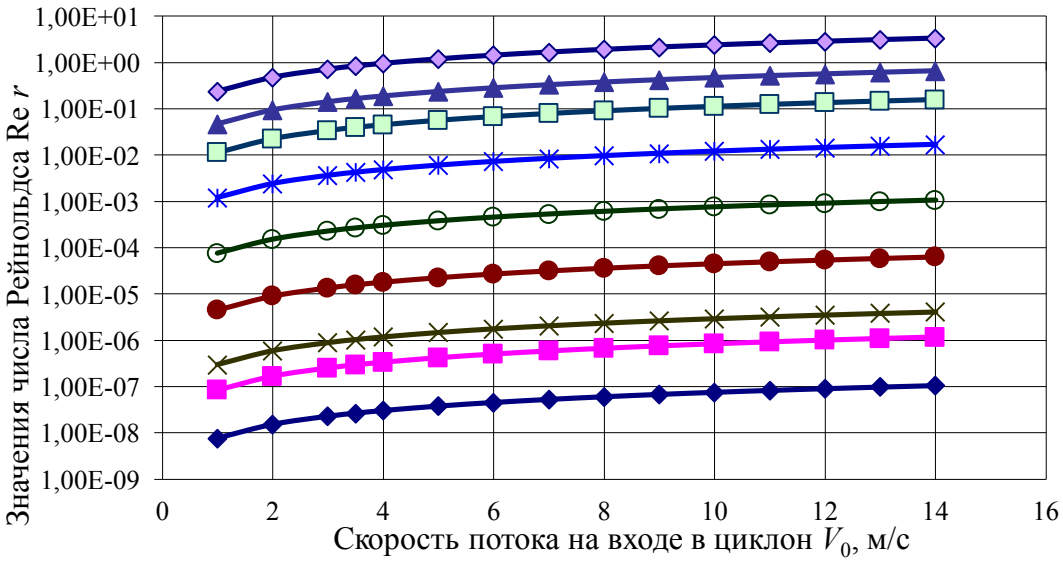


Рисунок Г.4. Зависимость относительного числа Рейнольдса Re$_r$ для циклона от скорости потока на входе в циклон V_0, м/с при установке фильтра на R=0,08м

При установке фильтра на расстоянии R=0,1м при скорости потока на входе 3,5 м/с частицам диаметром D_p=50·10^{-6}м соответствуют числа Re$_r$=2,84·10^{-7}, при скорости 10 м/с Re$_r$ =8,11·10^{-7}, при скорости 14 м/с Re$_r$ =1,14·10^{-6}, а для D_p=99·10^{-6}м соответствуют Re$_r$=4,36·10^{-6}, при скорости 10 м/с Re$_r$ =1,25·10^{-5}, при скорости 15 м/с Re$_r$ =1,75·10^{-5} (рисунки Г.5, Г.6).

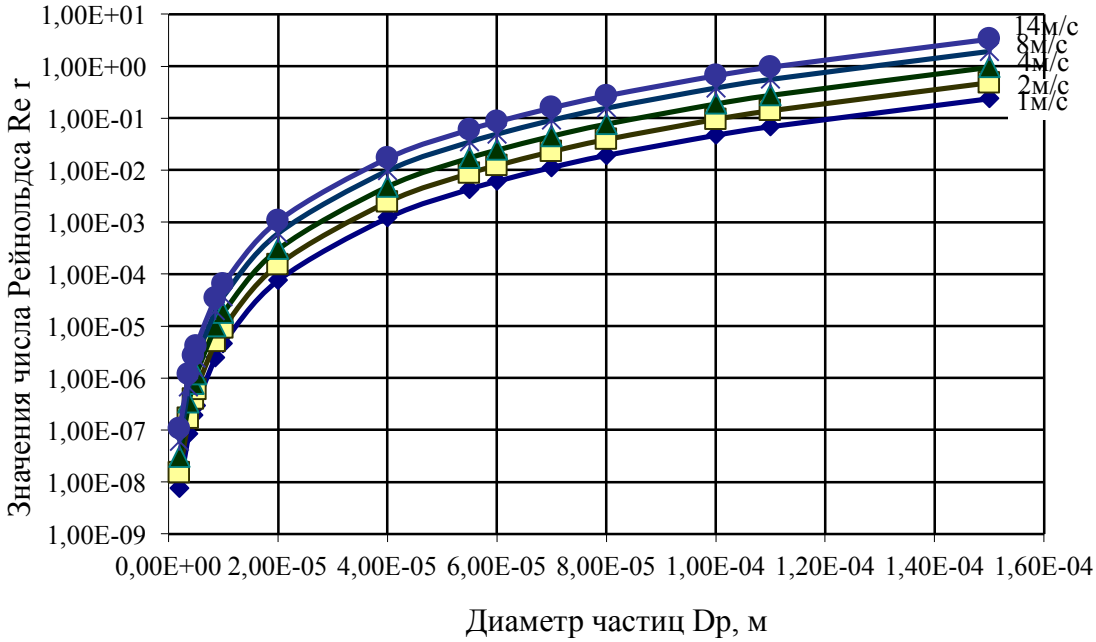


Рисунок Г.5. Зависимость относительного числа Рейнольдса Re$_r$ для циклона от размера осаждаемых частиц D_p, м при установке фильтра на R=0,1м

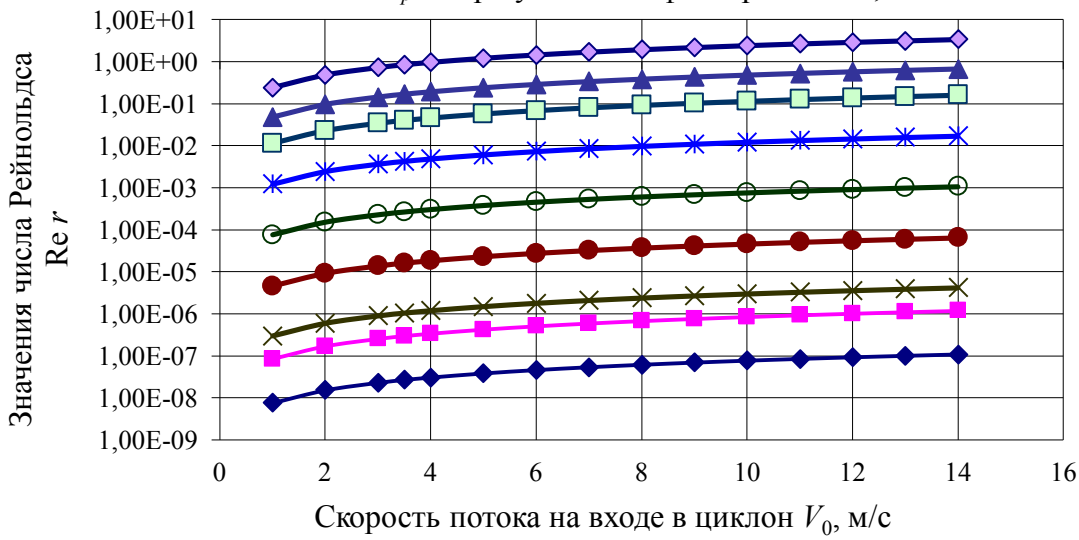


Рисунок Г.6. Зависимость относительного числа Рейнольдса Re$_r$ для циклона от скорости потока на входе в циклон V_0, м/с при установке фильтра на R=0,1м

Результаты опытных вычислений критических чисел Рейнольдса Re$_r$, соответствующих сепарации частиц из потока, вращающегося в кольцевом сечении модели опытного циклона, при скорости потока на входе u_0 = (1…7) м/с и радиусах кривизны $d_м$=0,065 м - диаметр горловины циклона, $d_б$=0,1 м - диаметр корпуса циклона, $d_{ср}$=0,0825 м - средний диаметр циклона приведены в таблице 2.3.

Таблица Г.1.

Эффективность осаждения пыли в зависимости от скоростей

V_0,м/с	1	2	3	3,5	4	5	6	7
d=0,13м								
Re_{50}, 10^{-6}	0,295	0,591	0,886	1,03	1,18	1,48	1,77	2,07
Re_{99}, 10^{-5}	0,454	0,908	1,36	1,59	1,82	2,27	2,72	3,18
d =0,16м								
Re_{50}, 10^{-7}	1,58	3,17	4,75	5,54	6,34	7,92	9,50	11,1
Re_{99}, 10^{-6}	2,43	4,87	7,30	8,52	9,74	12,2	14,6	17,0
d=0,2 м								
Re_{50}, 10^{-7}	0,811	1,62	2,43	2,84	3,24	4,06	4,87	5,68
Re_{99}, 10^{-6}	1,25	2,49	3,74	4,36	4,99	6,23	7,48	8,73

Результаты расчетов чисел Рейнольдса Re_r для размеров частиц, осаждающихся в циклоне на 50% и 99% ($D_{50}\cdot10^{-6}$м и $D_{99}\cdot10^{-6}$м), представлены на рисунках Г.7 и Г.8. Расчеты показали, что степеням осаждения частиц в циклоне соответствуют строго определенные значения чисел Re_r. Так, степени осаждения 99% при скорости 3,5 м/с при радиусе *R*=0,0325 м может быть сопоставлено число $Re_r=4{,}8\cdot10^{-6}$, а степени осаждения 50% $Re_r=4{,}0\cdot10^{-8}$. При скорости 7,0 м/с степени осаждения 50% $Re_r=4{,}72\cdot10^{-8}$, а 99% $Re_r=2{,}63\cdot10^{-6}$.

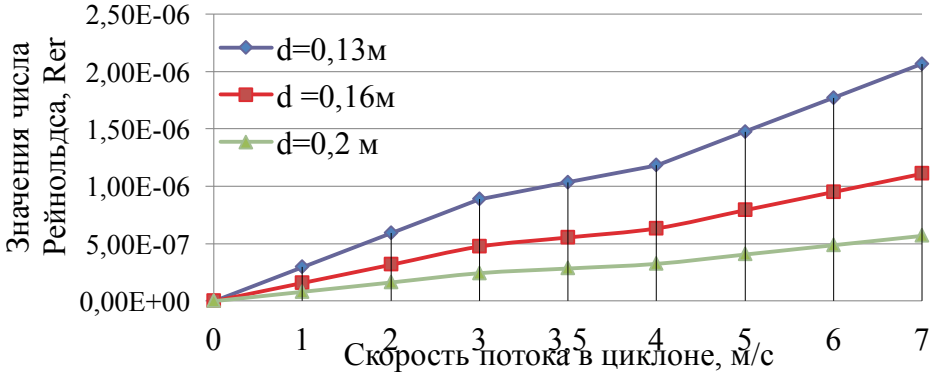


Рисунок Г.7. Значения числа Рейнольдса Re_r для частиц с размером, соответствующим 50%-ной (D_{50}, мкм) очистке в циклоне

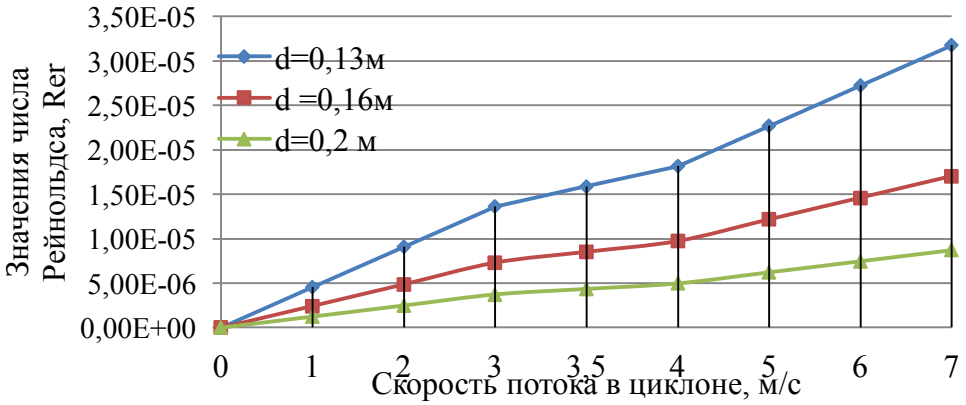


Рисунок Г.8. Значения числа Рейнольдса Re_r для частиц с размером, соответствующим 99%-ной (D_{99}, мкм) очистке в циклоне

Проведенные исследования показывают, что экспериментальная установка имеет возможность обеспечить обработку частиц класса $PM_{2,5}$ с эффективностью 99%, так как максимально достигаемое значение $Re_r= 10^{-8}$.

Приложение Д. Алгоритм расчета циклонов в программе ЭВМ

Работа с программой «Программа расчёта газоочистных устройств с циклон-фильтрующими аппаратами» ведется в следующем порядке:

1. В выпадающем списке главного окна необходимо выбрать марку циклона. При необходимости возможно расширение библиотеки очистного оборудования. Далее внести значение в поле «Число устанавливаемых циклонов» (по умолчанию - один); названия полей высвечиваются после наведения на них курсора.

После этого появляется значение оптимальной усредненной скорости потока в циклоне, а также расчетное значение его диаметра. Дополнительные элементы управления в нижней части окна, позволяющие составить групповую циклонную установку, появляются в случаях, когда расчетный диаметр одиночного циклона превысит 1200 мм.

В программе предусмотрена возможность внесения индивидуальны характеристик пыли.

Расчет будет производиться в следующей последовательности по типам циклонов соответственно: для циклона типа ЦН-11 и циклон-фильтра на базе ЦН-11.

Данные по пыли №1 (пыль после импактора): медианный диаметр пыли D_{50}=3,18, дисперсия σ=2,28. Тип циклона – ЦН-11; количество устанавливаемых циклонов - 2.

2. В выпадающем списке «Реальный диаметр циклона» нужно выбрать значение из предлагаемых типоразмеров выбранного циклона, при этом будет проведена автоматическая проверка на соответствие фактической скорости оптимальной (разница не должна быть больше 20%).

3. Определяют коэффициент гидравлического сопротивления циклона, при этом коэффициенты сопротивления зависят от типа циклонов, наличия дополнительных устройств на входе и выходе, характера их подключения (в сети или на выхлоп в атмосферу), что необходимо учитывать, принимая значения С,500.

4. В группе опций «Групповая установка» выбирается ее конфигурация (прямоугольная или круглая), а в выпадающем списке -количество циклонов. При этом будет автоматически пересчитан рекомендуемый диаметр, согласно которому далее нужно переподобрать реальный диаметр циклона из соответствующего выпадающего списка.

5. После нажатия кнопки «п. 3, 4» производятся расчеты принятой циклонной установки - ее очистные характеристики привязываются к рабочим условиям и определяется гидравлическое сопротивление.

6. Далее нужно нажать кнопку «п. 5», и будет произведен расчет степени очистки обрабатываемой пыли. В главном окне появится значение полного коэффициента очистки. В других окнах программы появятся линия очистных характеристик аппарата на диаграмме с ЛВШ и результаты расчета. Пример окна с результатами расчета парциальных коэффициентов

очистки для циклона-фильтра на базе ЦН-11. Программа обладает наглядностью выполнения построений на логарифмической сетке.

Циклон - фильтр на базе ЦН-11:

На рисунке Д.1 введены следующие данные шамотной пыли после импактора: медианный диаметр пыли D_{50}=0,6, дисперсия σ=2,02. Тип циклона – циклон – фильтр; количество устанавливаемых циклонов - 1.

	A	B	C	D	E	F	G
1	Пыль после импактора						
2	Dp, мкм	0,597	0,9955	2,0705	4,26	8,8385	
3	g	27,273	18,182	18,181	18,182	9,091	
4	etta, %	82,10265	94,079576	99,25153	100	100	
5	etta_tot,%=	99,7	для аппарат	Циклон циклон-фильтр на базе ЦН-11			

Рисунок Д.1. Результаты расчета парциальных коэффициентов очистки для циклона – фильтра (пыль №1)

На рисунке Д.2 введены следующие данные известковой пыли: медианный диаметр пыли D_{50}=4,16, дисперсия σ=1,85. Тип циклона – циклон – фильтр; количество устанавливаемых циклонов - 1.

	A	B	C	D	E	F
1	Известковая пыль					
2	Dp, мкм	0,597	0,9955	2,0705	4,26	8,8385
3	g	27,273	18,182	18,181	18,182	9,091
4	etta, %	97,9836	98,160851	100	100	100
5	etta_tot,%=	95,6	аппарат	Циклон-фильтр		

Рисунок Д.2. Результаты расчета парциальных коэффициентов очистки для циклона – фильтра (пыль №2)

На рисунке Д.3 введены следующие данные пыли аэрозоль СРКА: медианный диаметр пыли D_{50}=1,34, дисперсия σ=1,73. Тип циклона – циклон – фильтр; количество устанавливаемых циклонов - 1.

	A	B	C	D	E	F
1	Аэрозоль СРКА					
2	Dp, мкм	0,597	0,9955	2,0705	4,26	8,8385
3	g	27,273	18,182	18,181	18,182	9,091
4	etta, %	88,59396	95,521135	100	100	100
5	etta_tot,%=	90,6	для аппарат	Циклон-фильтр		

Рисунок Д.3. Результаты расчета парциальных коэффициентов очистки для циклона – фильтра (пыль №3)

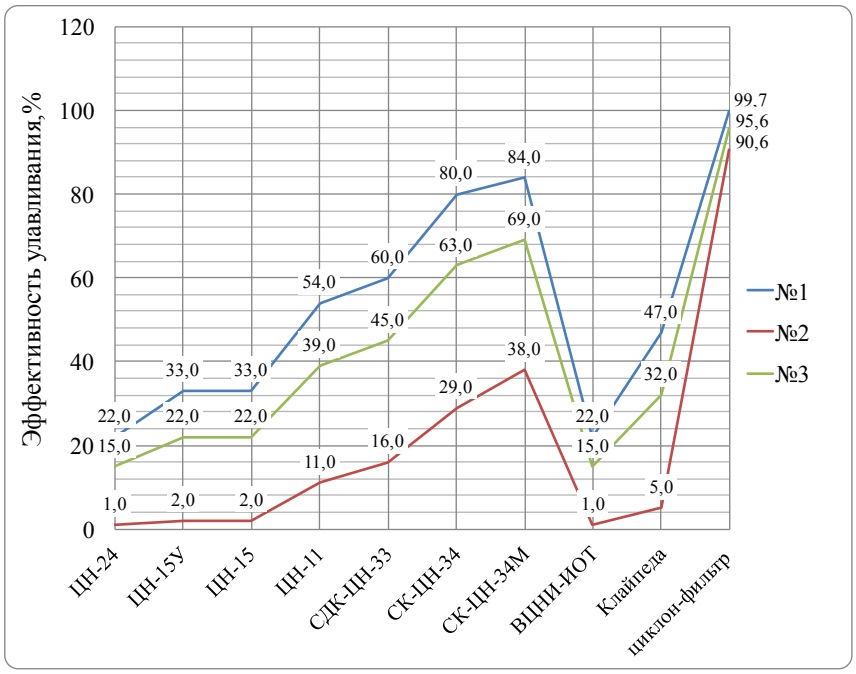


Рисунок Д.4. Эффективность улавливания для разных моделей циклонов

Выводы

При использовании одного и того же фракционного состава пыли в различных типах циклонов эффективность очистки увеличивается при прохождении потока в циклоне – фильтре до 99,7 % (рисунок Д.4).

Приложение Е. Обработка результатов экспериментальных исследований. Определение погрешностей расчёта

В ходе экспериментов проведена проверка воспроизводимости результатов опытов и определены погрешности полученных соотношений. Воспроизводимость результатов исследований определялась по трём сериям параллельных опытов. Замеры скоростей и давлений проводились в 9 точках сечения *А-А* и в 7 точках сечения *В-В*, по 30 замеров в каждой точке. В таблице Е.1 представлены усреднённые по 30 замерам векторные скорости в сечении *А-А* в 9 точках $\overline{V}_1 ... \overline{V}_{30}$:

$$\overline{V}_i = \frac{1}{30}\sum_{i=1}^{30} V_i \qquad (1)$$

Таблица Е.1.

Усреднённые значения вектора скоростей в 9 точках замера для трёх серий опытов

Точки замера	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\overline{V}_1$, м/с	8,72	9,85	11,19	18,12	27,35	24,06	16,62	16,98	9,50
$\overline{V}_2$, м/с	8,12	9,61	12,19	17,58	26,50	23,28	16,17	16,42	10,55
$\overline{V}_3$, м/с	9,55	10,83	12,30	19,94	29,96	23,58	18,32	18,68	10,45

Средняя скорость потока в циклоне в сечении *А-А* в 5 точке замера по трём сериям опытов (табл.Е.1) составила 27,93 м/с.

В таблицах Е.2, Е.3, Е.4 приведены значения абсолютной ошибки измерения в 9 точках замера в сечении *А-А*, полученные как разность между средним значением и результатом *i*-го измерения для каждой серии опытов:

$$\Delta V_i = \left|\overline{V}_i - V_i\right| \qquad (2)$$

Таблица Е.2.

Абсолютная ошибка измерений векторной скорости в 9 точках замера при первой серии опытов

Точки замера	1	2	3	4	5	6	7	8	9
ΔV_1	0,61	0,60	0,26	0,86	0,21	0,52	0,13	0,44	0,46
ΔV_2	0,52	0,77	0,68	0,03	0,25	0,54	0,39	0,22	0,04
ΔV_3	0,16	0,40	0,70	0,16	0,15	0,06	0,17	0,11	0,35
ΔV_4	0,12	0,20	0,26	0,06	0,18	0,30	0,23	0,00	0,06
ΔV_5	0,74	1,02	1,08	0,76	1,00	2,12	2,05	1,82	1,76
ΔV_6	0,26	0,60	0,66	0,34	0,58	1,70	1,63	1,40	1,34

Продолжение табл. Е.2.

ΔV_7	1,07	0,69	0,75	0,43	0,67	1,79	1,72	1,49	1,43
ΔV_8	0,95	0,39	0,33	0,65	0,41	0,71	0,64	0,41	0,35
ΔV_9	0,70	0,09	0,15	0,17	0,07	1,19	1,12	0,89	0,83
ΔV_{10}	0,80	0,07	0,01	0,33	0,09	1,03	0,96	0,73	0,67
ΔV_{11}	1,15	0,49	0,43	0,75	0,51	0,61	0,54	0,31	0,25
ΔV_{12}	0,75	0,77	0,83	0,51	0,75	1,87	1,80	0,57	0,51
ΔV_{13}	0,12	0,71	0,77	0,45	0,69	1,81	1,74	0,51	0,45
ΔV_{14}	0,34	0,34	0,40	0,08	0,32	0,56	0,63	0,86	0,92
ΔV_{15}	0,27	0,30	0,24	0,56	0,32	1,20	1,27	1,50	1,56
ΔV_{16}	0,35	0,09	0,03	0,35	0,11	0,99	1,06	1,29	1,35
ΔV_{17}	1,16	0,39	0,33	0,65	0,41	1,29	1,36	1,59	1,65
ΔV_{18}	0,21	0,86	0,80	1,12	0,88	1,76	1,83	1,04	1,10
ΔV_{19}	0,14	0,57	0,51	0,83	0,59	1,47	1,54	0,75	0,81
ΔV_{20}	0,21	0,46	0,52	0,20	0,44	0,44	0,51	0,28	0,22
ΔV_{21}	0,19	0,41	0,47	0,15	0,39	0,49	0,56	0,23	0,17
ΔV_{22}	0,27	0,56	0,62	0,30	0,54	0,34	0,41	0,38	0,32
ΔV_{23}	0,94	0,79	0,85	0,53	0,77	0,11	0,18	0,61	0,55
ΔV_{24}	0,51	0,82	0,76	1,08	0,84	1,72	1,79	1,00	1,06
ΔV_{25}	0,39	0,27	0,58	0,44	0,07	0,44	0,61	0,14	0,36
ΔV_{26}	0,14	0,13	0,13	0,03	0,06	0,22	0,47	0,12	0,57
ΔV_{27}	0,04	0,20	0,57	0,36	0,07	0,65	0,17	0,19	0,15
ΔV_{28}	0,27	0,47	0,41	0,43	1,01	0,47	0,12	0,48	0,07
ΔV_{29}	0,18	0,05	0,80	0,93	0,70	0,80	0,36	0,25	0,35
ΔV_{30}	0,71	0,79	0,34	0,03	0,11	0,63	0,39	0,40	0,45

Таблица Е.3.

Абсолютная ошибка измерений векторной скорости в 9 точках замера при второй серии опытов

Точки замера	1	2	3	4	5	6	7	8	9
ΔV_1	0,44	0,28	0,05	0,83	0,09	0,65	0,08	0,48	0,51
ΔV_2	0,01	0,17	0,39	0,03	0,13	0,67	0,43	0,16	0,04
ΔV_3	0,33	0,19	0,41	0,16	0,93	0,08	0,21	0,16	0,39
ΔV_4	0,81	0,14	0,60	0,06	0,29	0,15	0,27	0,05	0,06

Продолжение табл. Е.3.

ΔV_5	0,40	0,93	1,47	0,73	1,08	1,91	2,04	1,72	1,96
ΔV_6	0,10	0,53	1,03	0,33	0,67	1,51	1,63	1,31	1,49
ΔV_7	1,04	0,61	1,12	0,41	0,76	1,59	1,72	1,40	1,59
ΔV_8	0,48	0,43	0,02	0,63	0,29	0,55	0,67	0,35	0,39
ΔV_9	0,15	0,03	0,49	0,17	0,18	1,01	2,22	0,44	0,93
ΔV_{10}	0,40	0,12	0,32	0,32	0,02	0,86	0,98	0,66	0,75
ΔV_{11}	1,23	0,53	0,13	0,73	0,38	0,45	0,57	0,25	0,28
ΔV_{12}	0,05	0,69	2,70	0,49	0,84	1,67	1,79	0,50	0,57
ΔV_{13}	0,35	0,63	1,14	0,43	0,51	0,25	0,64	0,24	0,50
ΔV_{14}	0,61	0,27	0,75	0,07	0,42	0,69	0,56	0,88	1,02
ΔV_{15}	0,22	0,35	0,07	0,55	0,20	1,31	1,19	1,51	1,73
ΔV_{16}	0,28	0,14	0,30	0,34	0,00	1,10	0,98	1,30	1,49
ΔV_{17}	0,45	0,43	0,02	0,63	0,29	1,39	1,27	1,59	1,83
ΔV_{18}	0,29	0,89	0,52	1,09	0,74	1,85	1,73	1,06	1,22
ΔV_{19}	1,01	0,61	0,21	0,81	0,46	1,57	1,45	0,78	0,89
ΔV_{20}	0,04	0,39	0,88	0,19	0,54	0,57	0,45	0,22	0,25
ΔV_{21}	0,16	0,34	0,83	0,14	0,49	0,62	0,49	0,17	0,19
ΔV_{22}	0,23	0,49	2,68	0,29	0,63	0,47	0,35	0,32	0,36
ΔV_{23}	1,55	0,71	1,23	0,51	0,86	0,25	0,13	0,54	0,62
ΔV_{24}	1,07	0,85	0,48	1,05	0,70	1,81	1,69	1,02	1,17
ΔV_{25}	0,13	0,21	0,29	0,42	0,18	0,57	0,54	0,09	0,39
ΔV_{26}	0,31	0,07	0,19	0,03	0,17	0,36	0,41	0,17	0,63
ΔV_{27}	0,25	0,25	0,28	0,35	0,04	0,77	0,21	0,23	0,16
ΔV_{28}	0,51	0,51	0,11	0,41	0,87	0,60	0,07	0,52	0,08
ΔV_{29}	0,80	0,01	0,52	0,90	0,57	0,63	0,30	0,29	0,39
ΔV_{30}	0,83	0,82	1,68	0,03	0,22	0,75	0,33	0,44	0,50

Таблица Е.4.

Абсолютная ошибка измерений векторной скорости в 9 точках замера при третьей серии опытов

Точки замера	1	2	3	4	5	6	7	8	9
ΔV_1	0,63	0,65	0,30	0,94	0,36	0,51	0,11	0,49	0,51
ΔV_2	0,53	0,84	0,76	0,02	0,40	0,53	0,47	0,24	0,04
ΔV_3	0,22	0,44	0,78	0,18	0,29	0,06	0,22	0,12	0,38

Продолжение табл. Е.4.

ΔV_4	0,17	0,23	0,28	0,07	0,07	0,29	0,29	0,00	0,07
ΔV_5	0,77	1,13	1,18	0,83	0,97	2,08	1,29	2,00	1,94
ΔV_6	0,33	0,67	0,72	0,37	0,51	1,66	1,83	1,54	1,47
ΔV_7	1,14	0,76	0,82	0,46	0,61	1,75	1,93	1,64	1,57
ΔV_8	1,09	0,42	0,37	0,72	0,58	0,69	0,74	0,45	0,38
ΔV_9	0,73	0,10	0,16	0,20	0,05	1,17	1,27	0,98	0,91
ΔV_{10}	0,84	0,07	0,02	0,37	0,22	1,01	1,09	0,80	0,74
ΔV_{11}	0,31	0,53	0,48	0,83	0,69	0,60	0,63	0,34	0,28
ΔV_{12}	0,87	0,85	0,90	0,55	0,70	1,83	2,02	0,63	0,56
ΔV_{13}	0,17	0,79	0,84	0,49	0,63	1,77	1,95	0,56	0,49
ΔV_{14}	0,33	0,38	0,43	0,08	0,23	0,55	0,66	0,95	1,01
ΔV_{15}	0,34	0,33	0,28	0,63	0,48	1,18	1,36	1,66	1,72
ΔV_{16}	0,43	0,09	0,04	0,39	0,25	0,97	1,13	1,42	1,49
ΔV_{17}	1,32	0,42	0,37	0,72	0,58	1,27	1,46	1,75	1,82
ΔV_{18}	0,19	0,94	0,89	1,24	1,09	1,73	1,98	1,15	1,21
ΔV_{19}	0,20	0,62	0,57	0,92	0,77	1,44	1,66	0,83	0,89
ΔV_{20}	0,27	0,51	0,56	0,21	0,36	0,43	0,52	0,31	0,24
ΔV_{21}	0,25	0,46	0,51	0,16	0,30	0,48	0,58	0,25	0,19
ΔV_{22}	0,34	0,62	0,67	0,32	0,47	0,33	0,41	0,42	0,35
ΔV_{23}	0,99	0,87	0,93	0,58	4,29	0,11	0,16	0,67	0,60
ΔV_{24}	0,60	0,90	0,85	1,20	1,05	1,69	1,93	1,10	1,17
ΔV_{25}	0,39	0,30	0,65	0,48	0,05	0,43	0,63	0,15	0,40
ΔV_{26}	0,11	0,15	0,15	0,02	0,06	0,22	0,48	0,13	0,63
ΔV_{27}	0,01	0,21	0,64	0,39	0,20	0,64	0,22	0,21	0,17
ΔV_{28}	0,34	0,51	0,46	0,47	1,24	0,46	0,09	0,53	0,08
ΔV_{29}	0,24	0,06	0,89	1,02	0,90	0,78	0,36	0,28	0,38
ΔV_{30}	0,74	0,86	0,37	0,02	0,00	0,62	0,39	0,44	0,49

В таблице Е.5 приведены построчные дисперсии (дисперсии воспроизводимости) по трём сериям опытов в 9 точках замера в сечении *А-А*:

$$S_\gamma^2 = \frac{\sum_{i=1}^{30} (\Delta V_i)^2}{(30-1)} \qquad (3)$$

Таблица Е.5.

Построчные дисперсии в 9 точках замера для трёх серий опытов

Точки замера	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1 серия, S_1^2	0,35	0,31	0,34	0,31	0,29	0,26	0,20	0,52	0,33
2 серия, S_2^2	0,39	0,26	0,99	0,29	0,30	0,22	0,17	0,46	0,40
3 серия, S_3^2	0,37	0,37	0,41	0,38	0,95	0,31	0,33	0,67	0,48

Проверяем воспроизводимость опытов по критерию Кохрена для трёх серий опытов:

$$G = \frac{S^2_{\gamma\ \max}}{S^2_{\Sigma}} \tag{4}$$

где $S^2_{\gamma\ \max}$ - максимальная из построчных дисперсий. Для данного случая при n=30, γ=3, p=0,95 табличное значение G_T=0,617 [22]. По результатам обработки экспериментальных расчётов во всех точках замера $G<G_T$, т.е. опыты считаются воспроизводимыми, а оценки дисперсий однородными (табл.Е.6). В таблице Е.6 приведены сумма построчных дисперсий для трёх серий опытов:

$$S^2_{\Sigma} = \sum_{\gamma=1}^{3} S^2_{\gamma} \tag{5}$$

Таблица Е.6.

Сумма построчных дисперсий в 9 точках замера для трёх серий опытов

Точки замера	1	2	3	4	5	6	7	8	9
G	0,35	0,40	0,57	0,38	0,60	0,39	0,47	0,4	0,39
S^2_{Σ}	1,12	0,94	1,74	0,98	1,58	0,79	0,70	1,65	1,21
S_{Σ}	1,06	0,97	1,32	0,99	1,26	0,88	0,83	1,28	1,10

Число измерений n=30, число степеней свободы $f=n$-1=30-1=29; находим, что при данных параметрах для степени доверительной вероятности 95% критерий Стьюдента k=2,0 [22], Погрешность измерений векторной скорости в пятой точке замера в сечении *А-А*: 1,26·2,0=2,52. Следовательно, векторная скорость потока в циклоне (сечение *А-А*) в пятой точке замера составит V_{cp}=(27,93±2,52) м/с, значит точность измерений в этой точке составляет 9%.

В таблице Е.7 представлены усреднённые по 30 замерам векторные скорости в сечении *В-В* в 7 точках $\overline{V}_1 ... \overline{V}_{30}$.

Таблица Е.7.

Усреднённые значения вектора скоростей в 7 точках замера для трёх серий опытов

Точки замера	1	2	3	4	5	6	7

$\overline{V}_1$, м/с	12,32	15,52	24,53	18,65	29,1	18,99	9,98
$\overline{V}_2$, м/с	11,77	13,19	20,75	16,48	26,52	16,97	8,54
$\overline{V}_3$, м/с	12,07	14,59	23,15	19,07	28,65	17,76	9,81

Средняя скорость потока в циклоне в сечении *B-B* в 5 точке замера по трём сериям опытов (табл.Е.1) составила 28,10 м/с.

В таблице Е.8 приведены построчные дисперсии (дисперсии воспроизводимости) по трём сериям опытов в 7 точках в сечении *B-B*.

Таблица Е.8.

Построчные дисперсии в 7 точках замера для трёх серий опытов

Точки замера	1	2	3	4	5	6	7
1 серия, S_1^2	0,34	0,34	0,37	0,35	0,56	0,28	0,30
2 серия, S_2^2	0,35	0,24	0,90	0,26	0,67	0,20	0,15
3 серия, S_3^2	0,32	0,28	0,31	0,28	0,71	0,24	0,18

По результатам обработки экспериментальных расчётов по критерию Кохрена во всех точках замера $G<G_T$, т.е. опыты считаются воспроизводимыми, а оценки дисперсий однородными (табл.Е.9).

В таблице Е.9 приведены сумма построчных дисперсий для трёх серий опытов.

Таблица Е.9.

Сумма построчных дисперсий в 7 точках замера для трёх серий опытов

Точки замера	1	2	3	4	5	6	7
G	0,35	0,39	0,57	0,39	0,36	0,39	0,47
S_Σ^2	1,01	0,85	1,58	0,89	1,39	0,72	0,64
S_Σ	1,00	0,92	1,26	0,94	1,18	0,85	0,80

Погрешность измерений векторной скорости в пятой точке замера в сечении *B-B* равна 1,18·2,0=2,36. Следовательно, векторная скорость потока в циклоне (сечение *B-B*) в пятой точке замера составит (28,1±2,36) м/с, значит точность измерений в этой точке составляет 8,4%.

В таблице Е.10 представлены усреднённые по 30 замерам давление в сечении *A-A* в 9 точках $\overline{P}_1 ... \overline{P}_3$.

Таблица Е.10.

Усреднённые значения давления в 9 точках замера для трёх серий опытов

Точки замера	1	2	3	4	5	6	7	8	9

$\overline{P}_1$, Па	381,1	400,4	416,4	662,1	637,5	636,2	424,9	393,1	379,8
$\overline{P}_2$, Па	382,2	360,1	402,6	676,3	694,9	593,5	463,1	428,5	413,9
$\overline{P}_3$, Па	363,7	391,3	420,0	654,8	765,0	569,0	412,2	377,4	364,6

Разрежение потока в циклоне в сечении *А-А* в 5 точке замера по трём сериям опытов (табл.Е.10) составила 699,1 Па.

Таблица Е.11.

Абсолютная ошибка измерений давления в 9 точках замера при первой серии опытов

Точки замера	1	2	3	4	5	6	7	8	9
ΔP_1	2,0	0,4	1,6	7,6	9,2	4,5	13,9	2,9	10,8
ΔP_2	4,0	15,4	4,4	6,4	11,2	5,5	6,9	6,9	3,8
ΔP_3	5,0	7,6	5,6	21,4	6,2	3,5	12,9	4,1	7,8
ΔP_4	7,0	5,4	9,6	1,6	9,8	6,5	3,9	3,9	3,8
ΔP_5	5,0	13,4	6,4	8,6	0,8	1,5	7,9	1,9	9,2
ΔP_6	0,0	6,4	11,4	3,4	6,2	0,5	14,9	8,1	4,8
ΔP_7	5,0	4,4	1,6	11,6	12,8	1,5	3,9	0,9	2,8
ΔP_8	15,0	21,6	5,4	9,4	5,8	3,5	9,9	2,1	5,2
ΔP_9	7,0	0,4	10,6	7,4	11,8	5,5	0,9	3,1	1,2
ΔP_{10}	11,0	5,4	3,6	11,4	9,8	11,5	3,9	6,1	4,2
ΔP_{11}	1,0	6,4	1,4	7,6	6,8	12,5	2,9	1,1	5,2
ΔP_{12}	6,5	0,4	6,6	1,6	10,2	9,5	6,9	8,9	9,2
ΔP_{13}	11,0	4,6	7,6	0,6	6,2	3,5	8,9	12,9	12,2
ΔP_{14}	8,0	16,6	4,4	7,6	7,8	1,5	6,1	4,9	10,2
ΔP_{15}	3,0	1,4	9,4	8,4	2,2	5,5	1,1	1,1	8,8
ΔP_{16}	4,0	9,4	8,6	11,6	7,2	7,5	3,1	2,9	2,2
ΔP_{17}	9,0	15,6	2,4	5,6	1,8	5,5	0,9	1,9	9,2
ΔP_{18}	2,0	2,4	9,6	1,6	2,2	0,5	10,9	1,1	12,8
ΔP_{19}	7,0	1,1	14,4	0,6	4,2	10,5	6,9	4,1	10,2
ΔP_{20}	11,0	0,4	0,6	8,6	2,8	6,5	4,1	9,1	5,2
ΔP_{21}	14,0	15,6	7,4	6,6	4,8	8,5	4,9	3,1	1,8
ΔP_{22}	5,0	11,4	1,6	3,6	10,8	4,5	16,1	11,1	12,2

Продолжение табл.Е.11.

ΔP_{23}	4,0	6,4	7,6	1,6	6,8	1,5	6,9	3,9	10,9
ΔP_{24}	8,0	10,6	7,4	7,6	8,2	9,5	11,9	15,1	9,2

ΔP_{25}	12,0	15,4	12,6	6,4	4,2	3,5	10,9	1,1	10,8
ΔP_{26}	15,0	7,4	12,4	5,4	0,2	4,5	3,9	8,9	5,8
ΔP_{27}	7,0	11,6	4,4	7,6	8,8	6,5	7,9	7,9	0,8
ΔP_{28}	7,0	14,6	6,6	0,6	12,2	16,5	1,9	5,9	6,2
ΔP_{29}	2,0	3,4	0,4	1,6	1,2	5,5	2,9	6,1	17,8
ΔP_{30}	10,0	1,4	3,4	4,4	9,2	3,5	12,9	2,9	9,2

Таблица Е.12.

Абсолютная ошибка измерений давления в 9 точках замера при второй серии опытов

Точки замера	1	2	3	4	5	6	7	8	9
ΔP_1	2,1	0,4	1,8	7,5	10,1	4,9	9,7	3,1	11,7
ΔP_2	4,3	16,8	4,8	7,8	12,3	6,0	2,0	7,5	4,1
ΔP_3	5,4	8,3	6,1	24,1	6,8	3,8	8,6	4,5	8,4
ΔP_4	7,7	5,9	10,5	1,0	10,6	7,1	1,2	4,2	4,1
ΔP_5	5,4	14,6	6,9	8,6	0,8	1,6	3,1	2,1	10,1
ΔP_6	0,1	6,9	12,4	4,5	6,8	0,6	10,8	8,8	5,1
ΔP_7	5,5	4,8	1,8	11,9	13,9	1,7	1,2	1,0	3,0
ΔP_8	16,3	23,6	5,8	11,0	6,3	3,8	5,3	2,3	5,8
ΔP_9	7,6	0,4	11,6	8,8	12,8	6,0	4,5	3,4	1,4
ΔP_{10}	11,9	5,9	4,0	13,2	10,6	12,5	1,2	6,7	4,7
ΔP_{11}	1,1	6,9	1,5	7,5	7,4	13,6	2,3	1,2	5,8
ΔP_{12}	7,2	0,4	7,2	1,0	11,2	10,4	2,0	9,7	10,1
ΔP_{13}	12,1	5,1	8,3	0,1	6,8	3,8	4,2	14,0	13,4
ΔP_{14}	8,8	18,1	4,8	7,5	8,5	1,6	12,1	5,3	11,2
ΔP_{15}	3,3	1,5	10,2	9,9	2,4	6,0	6,7	1,2	9,5
ΔP_{16}	4,3	10,2	9,4	11,9	7,9	8,2	8,9	3,1	2,5
ΔP_{17}	9,9	17,0	2,6	5,3	1,9	6,0	4,5	2,1	10,1
ΔP_{18}	2,1	2,6	10,5	1,0	2,4	0,5	6,4	1,2	13,9
ΔP_{19}	7,7	1,2	15,7	0,1	4,6	11,4	2,0	4,5	11,2
ΔP_{20}	11,9	0,4	0,7	8,6	3,0	7,1	10,0	9,9	5,8

Продолжение табл.Е.12.

ΔP_{21}	15,3	17,0	8,0	6,4	5,2	9,2	0,2	3,4	1,9
ΔP_{22}	5,5	12,4	1,8	3,2	11,7	4,9	23,0	12,1	13,4
ΔP_{23}	4,4	6,9	8,3	1,0	7,4	1,6	2,0	4,2	11,7

ΔP_{24}	8,7	11,6	8,0	7,5	9,0	10,4	7,5	16,5	10,0
ΔP_{25}	13,0	16,8	13,8	7,8	4,6	3,8	6,4	1,2	11,7
ΔP_{26}	16,4	8,0	13,5	6,7	0,3	4,9	1,2	9,7	6,2
ΔP_{27}	7,6	12,7	4,8	7,5	9,6	7,1	3,1	8,6	0,8
ΔP_{28}	7,7	16,0	7,2	0,1	13,3	18,0	3,4	6,4	6,8
ΔP_{29}	2,1	3,7	0,4	1,0	1,3	6,0	2,3	6,7	19,3
ΔP_{30}	10,8	1,5	3,7	5,6	10,1	3,8	8,6	3,1	10,1

Таблица Е.13.

Абсолютная ошибка измерений давления в 9 точках замера при третьей серии опытов

Точки замера	1	2	3	4	5	6	7	8	9
ΔP_{1}	1,4	0,3	1,6	6,6	7,4	5,4	8,7	2,8	10,4
ΔP_{2}	12,3	10,8	4,3	6,8	9,0	6,6	1,9	6,6	3,6
ΔP_{3}	4,3	5,3	5,5	21,2	5,0	4,2	7,7	4,0	7,5
ΔP_{4}	7,3	3,8	9,4	0,9	7,8	7,8	1,0	3,7	3,6
ΔP_{5}	4,3	9,4	6,3	7,6	0,6	1,8	2,9	1,8	8,8
ΔP_{6}	0,5	4,5	11,2	3,9	5,0	0,6	9,6	7,8	4,6
ΔP_{7}	5,3	3,1	1,6	10,5	10,2	1,8	1,0	0,8	2,7
ΔP_{8}	13,9	15,1	5,3	9,7	4,6	4,2	4,8	2,0	5,0
ΔP_{9}	5,3	0,3	10,4	7,8	9,4	6,6	3,9	3,0	1,2
ΔP_{10}	10,3	3,8	3,5	11,6	7,8	13,8	1,0	5,9	4,0
ΔP_{11}	4,3	4,5	1,4	6,6	5,4	15,0	2,0	1,1	5,0
ΔP_{12}	7,7	0,3	6,5	0,9	8,2	11,4	1,9	8,5	8,8
ΔP_{13}	11,1	3,2	7,5	0,1	5,0	4,2	3,8	12,4	11,7
ΔP_{14}	8,2	11,6	4,3	6,6	6,2	1,8	10,7	4,7	9,8
ΔP_{15}	3,4	1,0	9,2	8,7	1,8	6,6	5,9	1,1	8,4
ΔP_{16}	3,3	6,6	8,4	10,5	5,8	9,0	7,8	2,8	2,1
ΔP_{17}	9,2	10,9	2,3	4,7	1,4	6,6	3,9	1,8	8,8
ΔP_{18}	1,4	1,7	9,4	0,9	1,8	0,6	5,8	1,1	12,3
ΔP_{19}	7,3	0,8	14,1	0,1	3,4	12,6	1,9	4,0	9,8

Продолжение табл.Е.13.

ΔP_{20}	10,0	0,3	0,6	7,6	2,2	7,8	8,8	8,8	5,0
ΔP_{21}	14,0	10,9	7,2	5,7	3,8	10,2	0,1	3,0	1,7

ΔP_{22}	5,3	8,0	1,6	2,8	8,6	5,4	20,4	10,7	11,7
ΔP_{23}	4,4	4,5	7,5	0,9	5,4	1,8	1,9	3,7	10,4
ΔP_{24}	7,1	7,4	7,2	6,6	6,6	11,4	6,7	14,5	8,9
ΔP_{25}	11,0	10,8	12,4	6,8	3,4	4,2	5,8	1,1	10,4
ΔP_{26}	14,9	5,2	12,1	5,8	0,2	5,4	1,0	8,5	5,6
ΔP_{27}	5,3	8,1	4,3	6,6	7,0	7,8	2,9	7,6	0,8
ΔP_{28}	7,7	10,2	6,5	0,1	9,8	19,8	3,0	5,6	6,0
ΔP_{29}	1,4	2,4	0,4	0,9	1,0	6,6	2,0	5,9	17,1
ΔP_{30}	12,3	1,0	3,3	4,9	7,4	4,2	7,7	2,8	8,8

В таблице Е.14 приведены построчные дисперсии (дисперсии воспроизводимости) по трём сериям опытов в 9 точках в сечении *А-А*.

Таблица Е.14.

Построчные дисперсии в 9 точках замера для трёх серий опытов

Точки замера	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1 серия, S_1^2	66,2	100,6	55,9	60,4	60,0	47,9	70,7	41,2	73,8
2 серия, S_2^2	78,6	119,6	66,4	71,2	71,3	56,9	53,3	48,9	87,7
3 серия, S_3^2	69,2	49,3	53,7	55,2	38,4	69,0	42,2	37,9	68,0

По результатам обработки экспериментальных расчётов по критерию Кохрена во всех точках замера $G<G_T$, т.е. опыты считаются воспроизводимыми, а оценки дисперсий однородными (табл.Е.15).

В таблице Е.12 приведены сумма построчных дисперсий для трёх серий опытов.

Таблица Е.15.

Сумма построчных дисперсий в 9 точках замера для трёх серий опытов

Точки замера	1	2	3	4	5	6	7	8	9
G	0,37	0,44	0,38	0,38	0,42	0,40	0,43	0,38	0,38
S_Σ^2	214,0	269,5	176,0	186,8	169,6	173,8	166,2	128,0	229,5
S_Σ	14,6	16,4	13,3	13,7	13,0	13,2	12,9	11,3	15,1

Погрешность измерений давления в пятой точке замера в сечении *А-А* равна 13,0·2,0=26,0. Следовательно, разрежение потока в циклоне (сечение *А-А*) в пятой точке замера составит (699,0±26,0) Па, значит точность измерений в этой точке составляет 3,7%.

В таблице Е.16 представлены усреднённые по 30 замерам давление в сечении *В-В* в 7 точках $\overline{P}_1 \ldots \overline{P}_3$.

Таблица Е.16.

Усреднённые значения давления в 7 точках замера для трёх серий опытов

Точки замера	1	2	3	4	5	6	7
$\overline{P}_1$, Па	254,0	307,0	478,0	761,0	1033,0	831,0	788,0
$\overline{P}_2$, Па	222,0	229,0	382,0	642,0	1060,0	863,0	740,0
$\overline{P}_3$, Па	226,0	257,0	362,0	564,0	959,0	790,0	755,0

Разрежение потока в циклоне в сечении *B-B* в 5 точке замера по трём сериям опытов (табл.Е.10) составила 1017,3 Па.

В таблице Е.17 приведены построчные дисперсии (дисперсии воспроизводимости) по трём сериям опытов в 7 точках в сечении *B-B*.

Таблица Е.17.

Построчные дисперсии в 7 точках замера для трёх серий опытов

Точки замера	1	2	3	4	5	6	7
1 серия, S_1^2	76,8	116,7	64,8	70,1	169,5	55,6	82,0
2 серия, S_2^2	71,5	108,7	90,4	64,7	94,8	81,7	48,5
3 серия, S_3^2	80,3	57,2	62,3	64,0	104,5	80,0	49,0

По результатам обработки экспериментальных расчётов по критерию Кохрена во всех точках замера $G<G_T$, т.е. опыты считаются воспроизводимыми, а оценки дисперсий однородными (табл.Е.18).

В таблице Е.18 приведены сумма построчных дисперсий для трёх серий опытов.

Таблица Е.18.

Сумма построчных дисперсий в 7 точках замера для трёх серий опытов

Точки замера	1	2	3	4	5	6	7
G	0,31	0,41	0,42	0,33	0,46	0,38	0,27
S_Σ^2	228,5	282,6	217,5	198,8	368,8	217,3	179,4
S_Σ	15,1	16,8	14,7	14,1	19,2	14,7	13,4

Погрешность измерений давления в пятой точке замера в сечении *B-B* равна 19,2·2,0=38,4. Следовательно, разрежение потока в циклоне (сечение *B-B*) в пятой точке замера составит (1017,3±38,4) Па, значит точность измерений в этой точке составляет 3,7%.

Также для верификации предлагаемых методов было проведено сравнение экспериментальных данных с результатами численных расчетов по векторной скорости в пятой точке замера (на оси циклона):

- в сечении *A-A*: $\Delta\bar{V}_5 = \left|\frac{\bar{V}_{5чис} - \bar{V}_{5нат}}{V^T_{5нат}}\right| = \left|\frac{27,96 - 26,03}{26,03}\right| = 0,074$ - относительная погрешность расчета составила $\Delta\bar{V}_5$ =7,4%;
- в сечении *B-B*: $\Delta\bar{V}_5 = \left|\frac{\bar{V}_{5чис} - \bar{V}_{5нат}}{V^T_{5нат}}\right| = \left|\frac{25,28 - 28,81}{28,81}\right| = 0,122$ - относительная погрешность расчета составила $\Delta\bar{V}_5$ =12,2%;

Верификация экспериментальных данных с результатами численных расчетов по давлению:

- в сечении *A-A*: $\Delta P_5 = \left|\frac{P_{6чис} - P_{5нат}}{P_{5чис}}\right| = \left|\frac{-1205,0 + 1440}{-1440}\right| = 0,163$ - относительная погрешность расчета составила Δ*P*= 16,3%.
- в сечении *B-B*: $\Delta P_5 = \left|\frac{P_{6чис} - P_{5нат}}{P_{5чис}}\right| = \left|\frac{-960,0 + 1005}{-1005}\right| = 0,044$ - относительная погрешность расчета составила Δ*P*= 4,4%.

Верификация экспериментальных данных и результатов численного исследования показала, что относительная погрешность расчета по скорости в сечении *A-A* составила $\Delta\bar{V}_5$ = 7,4%, в сечении *B-B* - $\Delta\bar{V}_5$ =12,2%. Погрешность измерений давления в сечении *A-A* составила Δ*P*=16,3%, в сечении *B-B* - Δ*P*= 4,4%.

Приложение Ж. Сертификация измерительных приборов

Kalibrier-Protokoll

Be sure. testo

Certificate of conformity • Protocole d'étalonnage
Certicifato di taratura • Informe de calibración

Wir bestätigen, dass dieses Testo-Produkt unter Beachtung eines zertifizierten Qualitätssicherungssystems nach **DIN EN ISO 9001** abgeglichen wurde.

Die dafür verwendeten Messeinrichtungen werden regelmäßig kalibriert und sind rückführbar auf die nationalen Normale der Physikalisch Technischen Bundesanstalt (PTB) Deutschlands oder auf andere nationale Normale. Wo keine nationalen Normale existieren, entspricht das Messverfahren den derzeit gültigen technischen Regeln und Normen.

Dieses Kalibrier-Protokoll belegt die Einhaltung der von uns zugesagten Toleranzen.

Sehr gerne informieren wir Sie über **Kalibrier-Zertifikate**, die die Toleranzen **des gesamten Messsystems** (Messgerät und Fühler) beinhalten.

Dieses Zertifikat benötigen Sie, wenn das Messsystem in qualitäts-relevanten Prozessen innerhalb eines nach **DIN EN ISO 9001** zertifiziertem Unternehmen eingesetzt wird.

Unsere Kalibrierlabors für Temperatur, Druck, Feuchte, Strömung und elektrische Messgrössen sind vom Deutschen Kalibrierdienst (DAkkS) akkreditierte Kalibrierlabors.

DAkkS-Kalibrierscheine werden für Messungen gefordert, bei denen die Genauigkeit eine entscheidende Rolle spielt.

We confirm that this Testo product was calibrated under the observation of a **DIN EN ISO 9001** certified quality assurance system.

The measuring installations used for this calibration are calibrated regularly and can be traced back to the national standards of the German Federal Physical and Technical Institution (PTB), or to other national standards. Should no national standards exist, the measuring procedure corresponds with the currently valid technical regulations and standards.

This calibration protocol is proof of adherence to the tolerances as confirmed by us.

We would be delighted to inform you about **certificates of conformities** which cover the tolerances for the **complete measuring system** (measuring instrument and probes).

This certificate is required only if the measuring system is to be used in processes relevant to quality in a company certified to **DIN EN ISO 9001.**

Our calibration laboratories for temperature, pressure, humidity, velocity and electrical parameters are calibration laboratories accredited by the German Calibration Service (DAkkS).

DAkkS calibration certificates are required for measurements where accuracy plays a decisive role.

Nous confirmons par la présente que ce produit testo a été étalonné sous la surveillance d'un système d'assurance qualité selon la norme **DIN EN ISO 9001.**

Les installations de mesure utilisées pour cet étalonnage sont étalonnées de facon régulière et s'appliquent aux normes nationales de l'Institut Fédéral de Techniques Physiques d'Allemagne (PTB) ou aux autres normes nationales. S'il n'existe aucune norme nationale, le processus de mesure est conforme aux règles et normes techniques actuellement valables.

Ce protocole d'étalonnage vous indique que cet appareil respecte bien les tolérances constructeurs annoncées dans nos documentations.

Un **certificat d'étalonnage** est nécessaire pour la vérification de la **chaîne complète** (appareils et sonde). N'hésitez pas à nous contacter pour de plus amples renseignements.

Ce certificat vous sera utile si vous vous trouvez être certifié ou en cours de certification **DIN EN ISO 9001.**

Notre laboratoire d´étalonnage en température, pression, humidité, vitesse d´air et paramètres électriques a été accrédité par le DAkkS - équivalent BNM/COFRAC -, Bureau de Métrologie Allemand.

Les certificats d´étalonnage DAkkS/COFRAC sont indispensables lorsque les mesures effectuées doivent être précises.

Vi confermiamo che questo prodotto è stato collaudato seguendo il sistema di certificazione di qualità **DIN EN ISO 9001.**

Gli strumenti di misura elettronici utilizzati per la calibrazione sono a loro volta regolarmente verificati e possono essere ricondotti agli standard nazionali del PTB (Physikalisch Technische Bundesanstalt), l´istituto ufficiale tedesco per la determinazione degli standard tecnici.

Questo protocollo di collaudo documenta l'osservanza delle tolleranze da noi indicate.

Siamo a Vs. disposizione per fornire informazioni sui **Certificati di Taratura** che comprendono le tolleranze del **sistema di misura completo** (strumento e sonda).

Questo documento Vi sarà utile se già siete certificati o siete in corso di certificazione **DIN EN ISO 9001.**

I nostri laboratori di taratura per temperatura, pressione, umidità, velocità dell´aria e parametri elettrici sono stati accreditati dal PTB e sono in grado di rilasciare certificati ufficiali DAkkS indispensabili quando le misure effettuate devono essere precise o riferibili.

Queste regole, riconosciute in tutta Europa, sono equivalenti a quelle SIT italiane ed alle procedure tecniche standard utilizzate in tutto il mondo.

Confirmamos que este producto Testo se calibró de acuerdo con el sistema de garantía de calidad **DIN EN ISO 9001.**

Las instalaciones de medición utilizadas para esta calibración se calibran con regularidad y pueden tracearse a los estándares nacionales del instituto Federal de Técnicas Físicas Alemán (PTB), o a otros estándares nacionales. Si no existe una norma nacional, el procedimiento de medición corresponde con las regulaciones técnicas y normas válidas en la actualidad.

Este informe de calibración es una prueba de las tolerancias que nosotros confirmamos.

Estaremos encantados en informales sobre **certificados de calibración** que cubran las tolerancias para el sistema de medición completo (instrumento de medición y sondas).

Nuestros laboratorios de calibración para temperatura, presión, humedad, velocidad y parámetros eléctricos son laboratorios de calibración acreditados por el Servicio de calibración alemán (DAkkS).

Los certificados de calibración DAkkS son necesarios para las mediciones donde la precisión sea muy importante.

0975.0002/dk/I/01.2018

Kalibrier-Protokoll

Certificate of conformity • Protocole d'étalonnage
Certicifato di taratura • Informe de calibración

Be sure. testo

Gerät / Module type / Modèle / Modelo:	**testo 521-3**
Serien-Nr. / Serial No. / No. de série / Número de serie:	**62098522**
Segmenttest / Display test / Test d`affichage / Test del visualizador:	ok

Messwerte ohne externe Messfühler / Measured values without external probe / Valeurs mesurées sans sonde de mesure externe / Valores medidos sin sonda externa:

Sollwert / Reference / Référence / Referencia:	**Toleranz / Tolerance / Tolérance / Tolerancia:**	**Istwert / Actual Value / Valeur réelle / Valor medido:**
Temperatur / Temperature / Température /		
-50.0 °C	± 0.4 °C	-50.0 °C
0.0 °C	± 0.4 °C	-0.0 °C
500.0 °C	± 1.0 °C	500.0 °C
Druckmessung / pressure measurement / Mesure de pression / Medición		
50.0 Pa	± 0.8 Pa	49.7 Pa
125.0 Pa	± 1.1 Pa	125.0 Pa
200.0 Pa	± 1.5 Pa	200.0 Pa

Datum / Date / Date / Fecha:

15.01.2020

Prüfer / Inspector / Vérificateur / Verificador:

(695)

TESTO QUALITÄT zertifiziert

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО
ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РЕГИОНАЛЬНЫЙ ЦЕНТР СТАНДАРТИЗАЦИИ, МЕТРОЛОГИИ И ИСПЫТАНИЙ В Г. МОСКВЕ И МОСКОВСКОЙ ОБЛАСТИ»
(ФБУ «РОСТЕСТ - МОСКВА»)

Регистрационный номер в реестре аккредитованных лиц RA.RU.311341

СВИДЕТЕЛЬСТВО О ПОВЕРКЕ

№ СП 2917611

Действительно до «03» февраля 2021 г.

Средство измерений Измеритель дифференциального давления TESTO 521,
наименование, тип, модификация средства измерений, регистрационный номер в Федеральном информационном фонде по обеспечению единства измерений, присвоенный при утверждении типа

Госреестр № 47453-11

заводской (серийный) номер 62098522

в составе -

номер знака предыдущей поверки -

поверено в полном объеме
наименование единиц величин, диапазонов измерений, на которых поверено средство измерений

в соответствии с МП РТ 1516-2011
наименование или обозначение документа, на основании которого выполнена поверка

с применением эталонов: 3.1.ZMA.0045.2013
регистрационный номер и (или) наименование, тип, заводской номер, разряд, класс или погрешность эталонов, применяемых при поверке

при следующих значениях влияющих факторов: температура 20,2 °С,
перечень влияющих факторов,

относительная влажность 37,5 %, атмосферное давление 96,5 кПа
нормированных в документе на методику поверки, с указанием их значений

и на основании результатов первичной ~~(периодической)~~ поверки признано пригодным к применению.

Знак поверки:

Начальник лаборатории № 443 — Денисов Дмитрий Анатольевич
должность руководителя подразделения или другого уполномоченного лица — *Подпись* — *фамилия, имя и отчество (при наличии)*

Поверитель — Герман Николай Александрович
Подпись — *фамилия, имя и отчество (при наличии)*

Дата поверки «04» февраля 2020 г.

© Н-Т-ГРАФ

МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И (ИЛИ) ПРОТОКОЛ ПОВЕРКИ

Наименование величин	Диапазоны
Дифференциальное давление	(0…2,5) гПа

Поверитель _____ подпись Герман Николай Александрович инициалы, фамилия

117418 Москва, Нахимовский пр., 31
Call-Центр: 495-544-00-00
тел. 499-129-19-11 факс: 499-124-99-96
Email: info@rostest.ru, www.rostest.ru

ООО "Н.Т.ГРАФ", г. Москва, 2019 г., уровень В

Приложение 3. Результаты численного моделирования на основе CFD

Полученное в численных исследованиях распределение скоростей потока в циклоне в поперечных сечениях *А-А* и *В-В* представлено на рис.3.1. и 3.2.

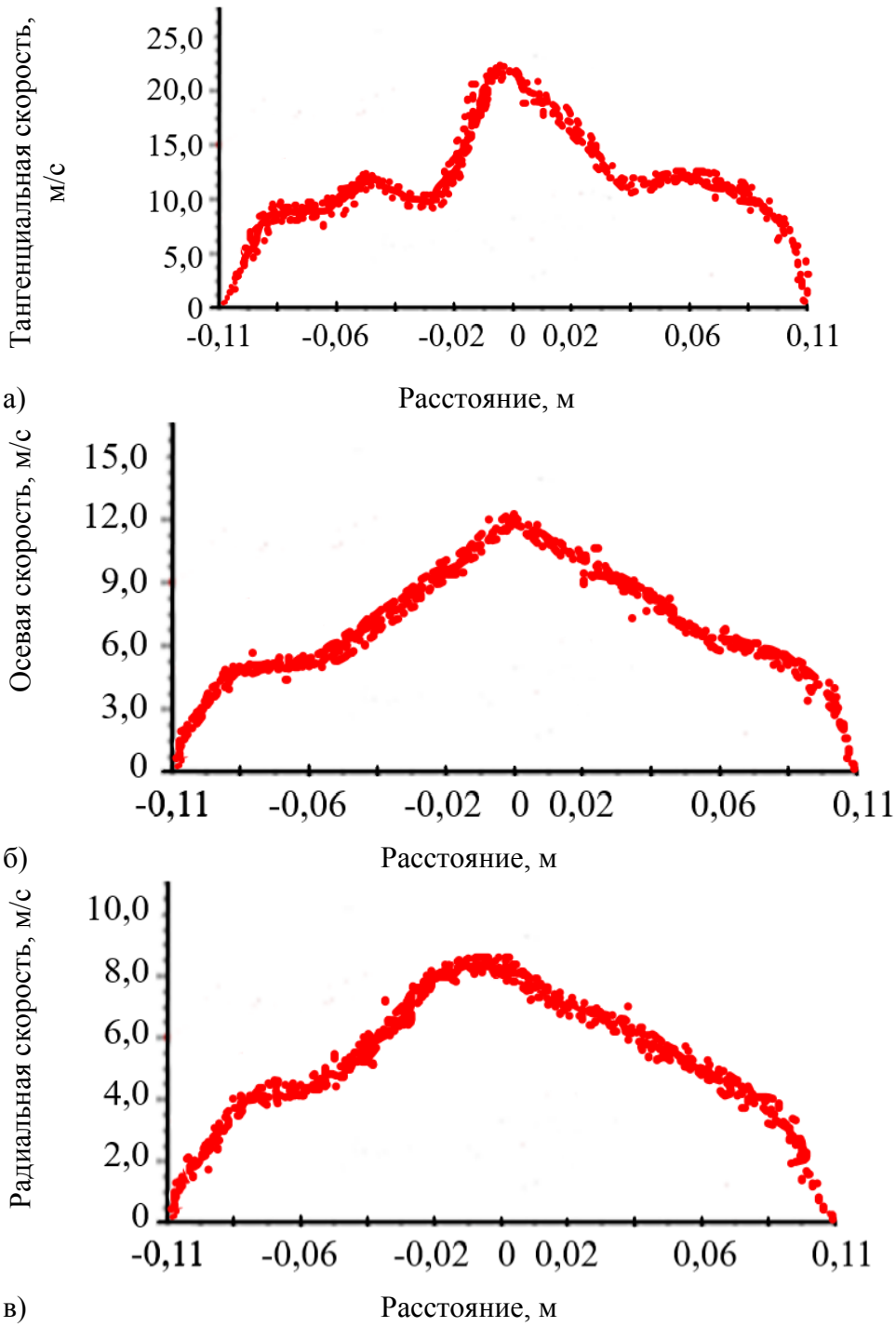
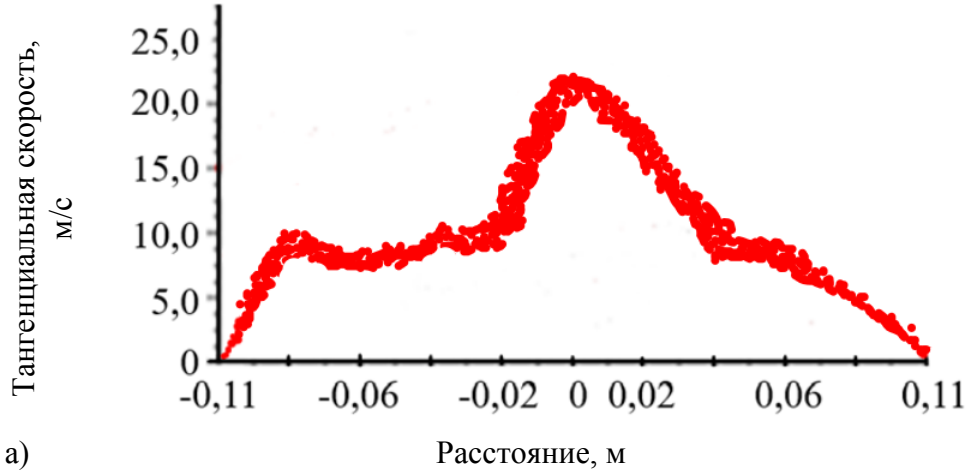
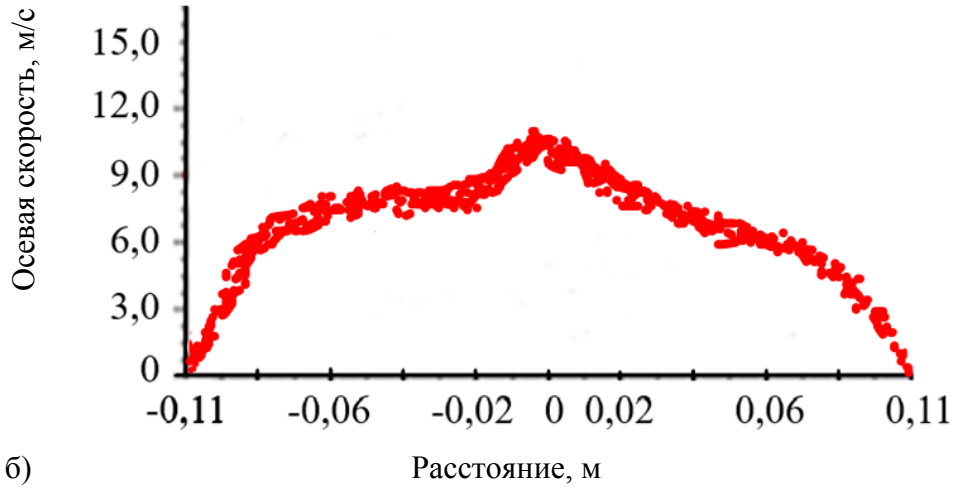


Рисунок 3.1. Изменение тангенциальной (а), осевой (б) и радиальной (в) составляющей скорости в циклоне в сечении *А-А*, полученное с помощью методов вычислительной гидродинамики (CFD), при среднем расходе Q=0,07 м^3/с





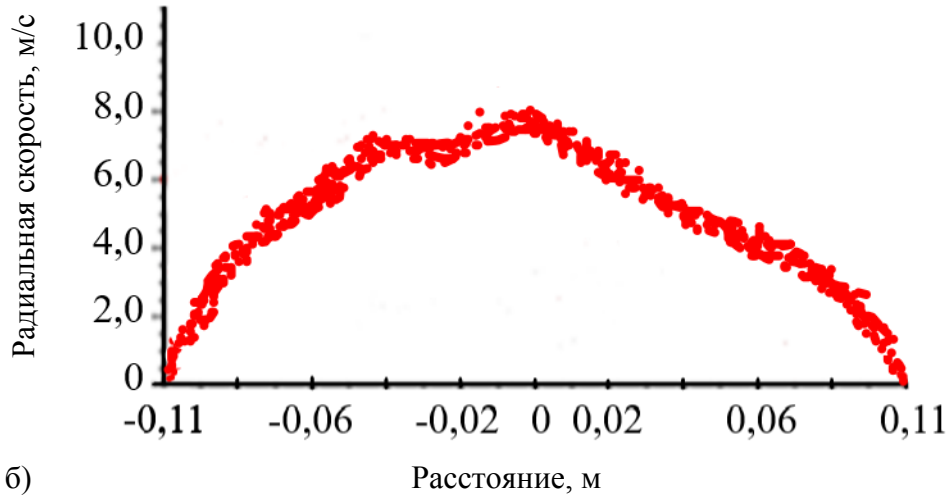


Рисунок 3.2. Изменение тангенциальной (а), осевой (б) и радиальной (в) составляющей скорости в циклоне в сечении *B-B*, полученное с помощью методов вычислительной гидродинамики (CFD), при среднем расходе Q=0,07 м^3/с

Определены изменения статического давления в поперечных сечениях *A-A* и *B-B* циклона (рис.3.3 и 3.4).

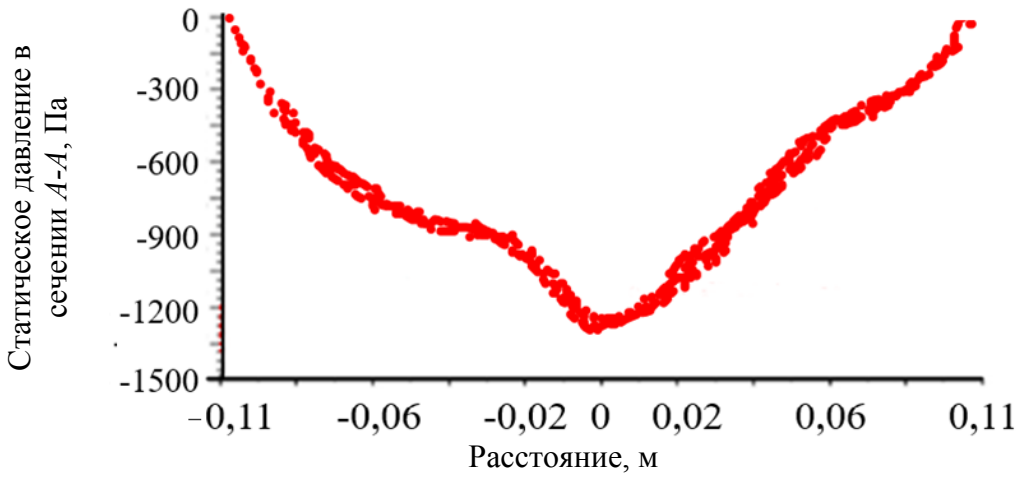


Рисунок 3.3. Изменение статического давления в циклоне в сечении *A-A*, полученное с помощью методов вычислительной гидродинамики (CFD) при среднем расходе Q=0,07 м^3/с

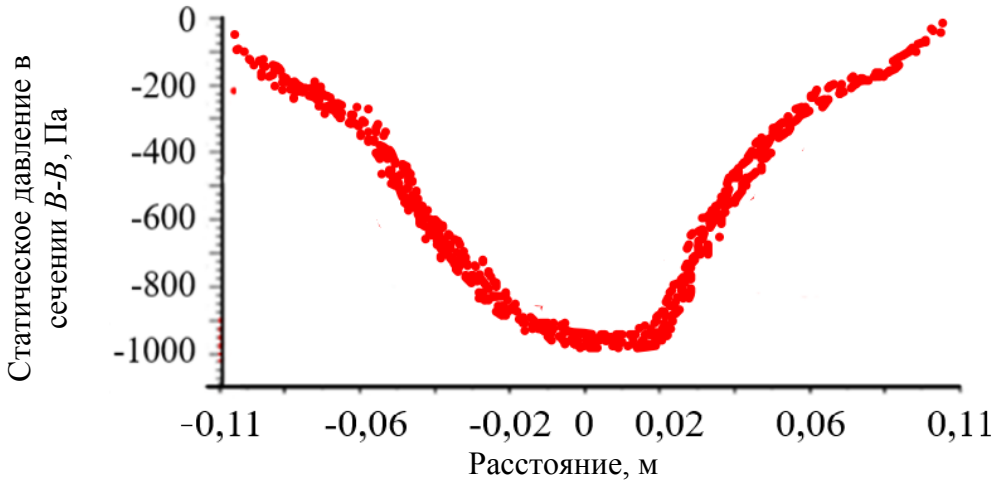


Рисунок 3.4. Изменение статического давления в циклоне в сечении *B-B*, полученное с помощью методов вычислительной гидродинамики (CFD) при среднем расходе Q=0,07 м^3/с