

На правах рукописи



**Замалиева Альбина Таврисовна**

**УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ГАЗОЧИСТНЫХ ЦИКЛОННО-  
ФИЛЬТРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ  
ИНФРАСТРУКТУРЫ ГОРОДСКИХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Специальность 05.14.01 – Энергетические системы и комплексы

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Казань – 2021

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», на кафедре «Тепловые электрические станции»

**Научный руководитель:** доктор технических наук, доцент  
**Зиганшин Малик Гарифович**

**Официальные оппоненты:** **Махоткин Алексей Феофилактович**  
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», профессор кафедры «Оборудование химических заводов»

**Сергина Наталия Михайловна**  
кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет», доцент кафедры «Безопасность жизнедеятельности в строительстве и городском хозяйстве»

**Ведущая организация:** Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург.

Защита состоится «23» марта 2021 года в 14 ч 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.082.06, созданного на базе ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», по адресу: 420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51, ауд. Д-224, тел./факс (843) 519-42-55.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, с указанием контактных данных и заверенные печатью учреждения, просим направлять по адресу: 420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51, КГЭУ, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.082.06.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Казанского государственного энергетического университета и на официальном сайте КГЭУ <https://kgeu.ru/Diss/Dissertant/273?idDiss=111>

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Ш.Г. Зиганшин

### **Общая характеристика работы**

**Актуальность проблемы.** 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». Постоянное ужесточение экологических нормативов и требований к надежности работы основного оборудования городских энергетических объектов обязывает совершенствовать технологии и технологические схемы обработки топлива в 197 газораспределительных станциях (ГРС) по Татарстану, которые относятся к ведению ПАО Газпром 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. Одним из простых способов очистки газов является осаждение взвесей в циклонах. Этим объясняется 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, таких как высокая материалоемкость и др. 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, A.A. 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.

**Объектом исследования** является система очистки топливной инфраструктуры городских энергетических систем.

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

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

**Задачи исследований:** провести анализ научно-технической литературы по исследованию методов осаждения взвесей из двухфазных закрученных потоков; теоретически исследовать степень осаждения твёрдых частиц в циклонно-фильтрующих аппаратах; выполнить численные исследования аэродинамических процессов в циклонном сепараторе и верифицировать полученные результаты; провести экспериментальные исследования степени осаждения твёрдых частиц в лабораторном и стендовом циклонно-фильтрующих аппаратах; 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.

**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 увеличение степени очистки газа в городских энергетических системах при повышении энергетической и экологической эффективности.

**Практическая значимость** 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.

**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.

**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 системного экономического 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.

**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, полученных с использованием поверенных средств измерений, а также с результатами исследований других авторов.

**Личное участие автора** 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.

#### **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.

**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+».

**Апробация работы.** Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и получили одобрение на таких конференциях, как Национальный конгресс по энергетике «Казанский государственный энергетический университет» (Казань 2014), на X-м семинаре молодых ученых и специалистов имени академика РАН В.Е. Алемасова КазНЦ РАН (Казань, 2016), «НАСКР-2016» (Чебоксары, 2016), «Качество внутреннего воздуха и окружающей среды» (Волгоград, 2017), «Водно-энергетический форум-2018» (Казань, 2018), «Инновационные технологии в машиностроении» (Томск, 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 состоит из введения и шести глав, заключения, списка использованной литературы (128 наименований) и приложений. Содержание работы изложено на 131 стр. основного текста и 35 стр. приложений, имеется 105 рисунков, 10 таблиц.

### Основное содержание работы

**Во введении** приведена общая характеристика работы, обосновываются актуальность темы, научная новизна, цель и основные задачи диссертационного исследования, описывается практическая и теоретическая значимость работы, соответствие тематики паспорту специальности 05.14.01, и перечислены основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** проведен анализ усовершенствований циклонных и фильтрующих пылеуловителей, выполненных рядом отечественных и зарубежных авторов, который 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.

**Во второй главе** 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:

$$\frac{V_0(\rho_p - \rho_G)^2 D_p^4}{\rho_G R_2^3 \eta} = Re_r, \quad (1)$$

где  $V_0$  - входная скорость, м/с;  $\rho_p$ ,  $\rho_G$  - плотности частиц и газа, кг/м<sup>3</sup>;  $D_p$  - диаметр частиц, м;  $R_2$  - радиус криволинейного движения сферической частицы, м;  $\eta$  - динамический коэффициент вязкости, Па·с.

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.

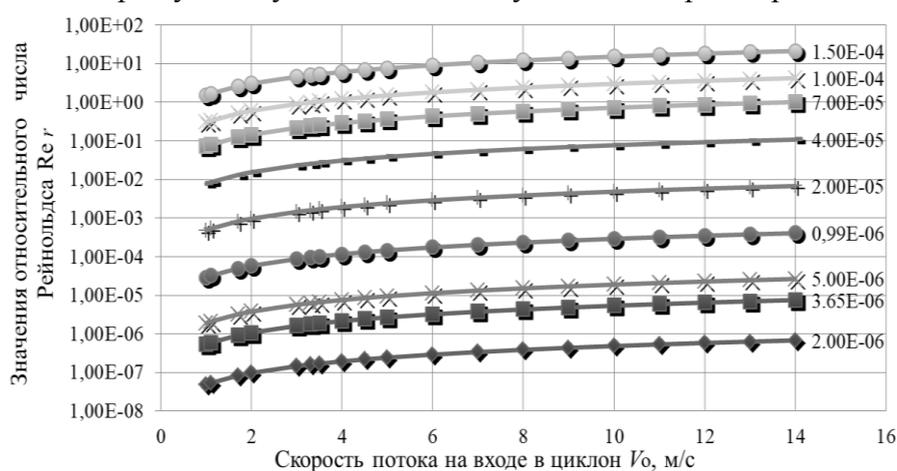


Рисунок 1. Зависимость относительного числа Рейнольдса  $Re_r$  для циклона диаметром 100 мм от  $V_0$ , м/с, при установке фильтра на расстоянии от оси циклона  $R=0,0325$  м

На рис. 1 представлена зависимость  $Re_r$  от  $V_0$ , м/с, для циклона диаметром 100 мм при установке фильтра на расстоянии от оси циклона  $R=0,0325$  м для разных размеров частиц  $D_p$ , мкм. Результаты теоретических расчетов показывают (рис.2, 3), что эффективность осаждения частиц одинакового размера растет с уменьшением радиуса установки фильтра.

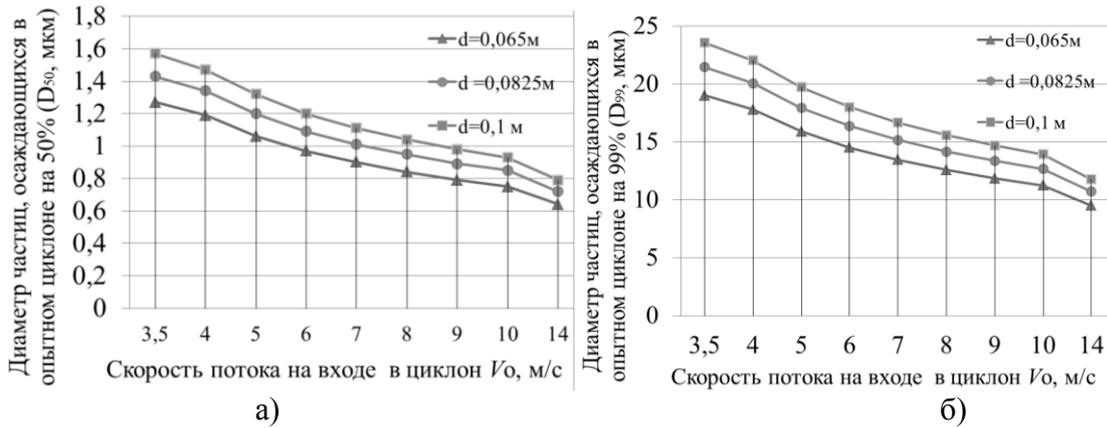


Рисунок 2. Зависимость диаметра частиц, осаждающихся в опытном циклоне  $D_p$ , мкм от скорости потока на входе в циклон  $V_0$ , м/с: а) на 50% ( $D_{50}$ , мкм), б) 99% ( $D_{99}$ , мкм)

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 на входе 14 м/с, при этом  $D_{50}=0,64$  мкм,  $D_{99}=9,52$  мкм (эффективность соответствующая эффективности обычных фильтров  $D_{50}$  меньше 1 мкм). При этом степень осаждения 99% для частиц класса  $PM_{10}$  достигается при  $Re_r=3,11 \cdot 10^{-4}$ . Следовательно, параметр  $Re_r$  позволяет находить оценочные значения степени осаждения частиц для циклона-фильтра расчётным путём.

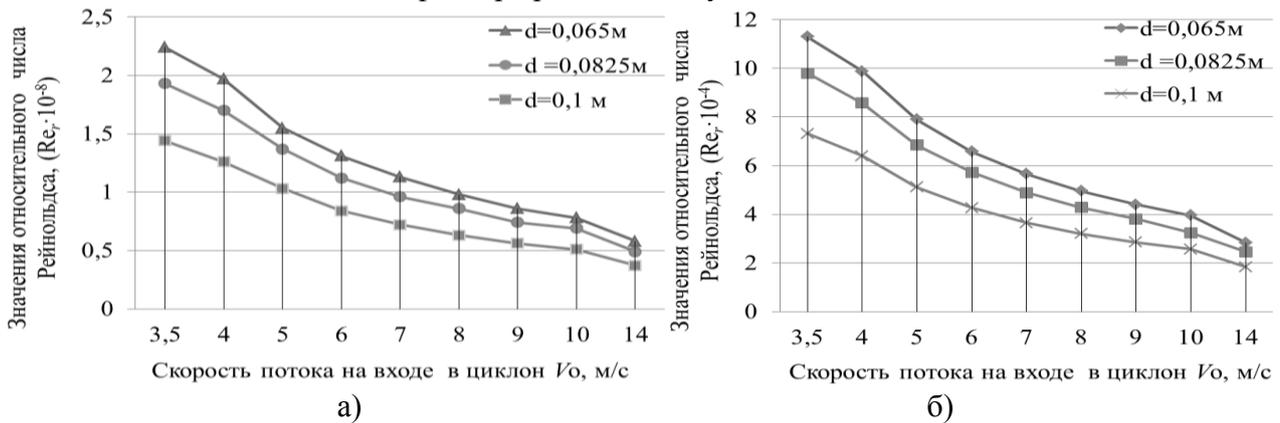


Рисунок 3. Зависимость относительного числа Рейнольдса  $Re_r$  от скорости потока на входе в циклон  $V_0$ , м/с, при: а) 50%-ной ( $Re_r \cdot 10^{-8}$ ), б) 99%-ной ( $Re_r \cdot 10^{-4}$ ) очистке в циклоне

В третьей главе на основе методов вычислительной гидродинамики выполнено моделирование аэродинамических параметров работы циклона-фильтра диаметром 200 мм, соответствующий циклону ЦН-11-200 для стендовых испытаний. Необходимость численного исследования обусловлена затрудненностью проведения подробного натурального эксперимента с непосредственным определением всех характеристик потока, и в особенности – радиальной составляющей скорости, что достаточно просто идентифицируется в численной 3d-модели.

Domain Extents:  
 x-coordinate: min (m) = -2.500000e-001, max (m) = 2.500000e-001  
 y-coordinate: min (m) = -2.500000e-001, max (m) = 2.500000e-001  
 z-coordinate: min (m) = -2.130000e+000, max (m) = 2.679600e-001  
 Volume statistics:  
 minimum volume (m3): 6.892653e-009  
 maximum volume (m3): 4.331492e-005  
 total volume (m3): 2.973648e-001  
 Face area statistics:  
 minimum face area (m2): 9.717310e-007  
 maximum face area (m2): 2.593830e-003

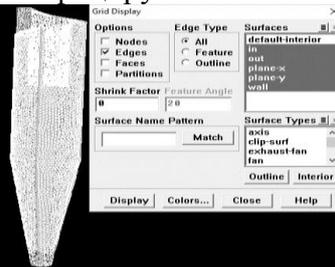


Рисунок 4. Объёмная модель циклона с размерами исходной конечно-элементной сетки

Построена геометрическая модель циклона в программе Gambit. Количество ячеек (исходная / адаптированная): (120783 / 1004211) (рис.4). Для описания движения потока через циклон в программе ANSYS Fluent использована система уравнений движения Навье-Стокса, осреднённых по Рейнольдсу. В ряде работ по моделированию турбулентности, выполненных в последнее время, показано, что хорошие результаты в численных исследованиях криволинейных потоков, в том числе в циклонах, дают не только модели типа Reynolds Stress Model (RSM), но и такие, как  $k-\omega$ , а также менее ресурсозатратные.

В нашей работе также исследована возможность применения в расчетах моделей турбулентности RSM и по Буссинеску –  $k-\omega$  и Spalart-Allmaras (S-A). Дальнейшее сопоставление результатов расчетов с опытными данными различных авторов показало, что найденные по  $k-\omega$  и S-A значения скорости и давления близки к экспериментальным, и для численных исследований была применена модель S-A как наименее ресурсозатратная. Далее была выполнена валидация результатов расчетов по модели S-A с использованием опытных данных по испытаниям циклона-фильтра.

Во многих работах, посвященных исследованию циклонов, имеются результаты аксиальных и тангенциальных скоростей, тогда как для построения пространственного вектора скорости необходима также и радиальная составляющая. Полученное в численных исследованиях распределение скоростей потока в циклоне в продольном сечении 1-1 и в поперечных сечениях A-A и B-B представлено на рис.5, 6.

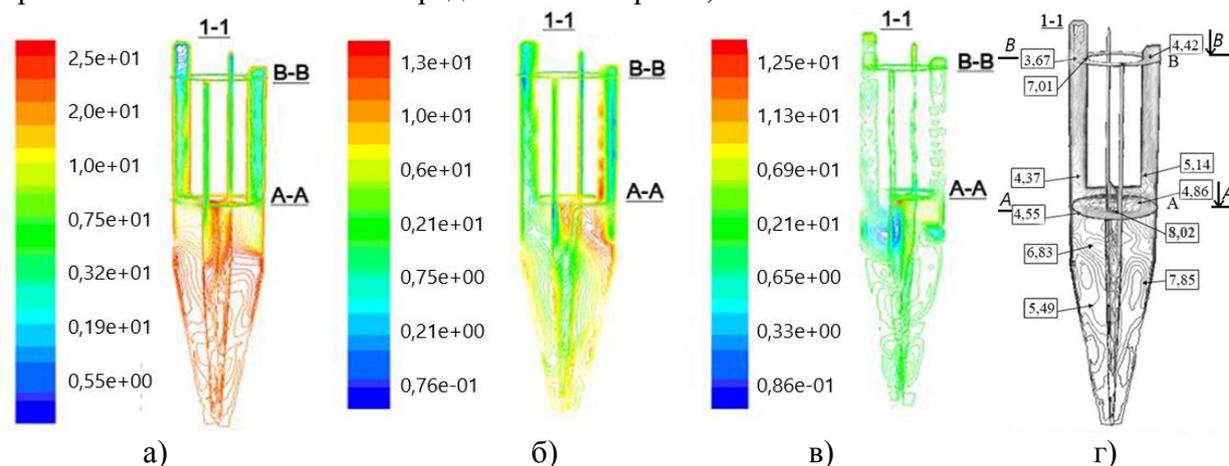


Рисунок 5. Распределение скоростей потока в пределах кольцевой зоны циклона: а) тангенциальной скорости; б) осевой скорости; в), г) радиальной скорости; на рис. г) цифрами обозначены величины скоростей, м/с, в соответствующих точках

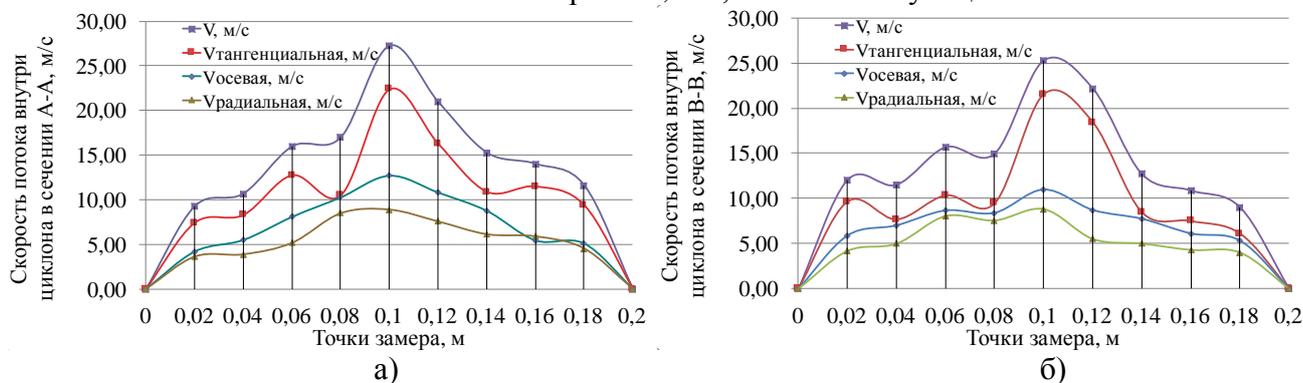


Рисунок 6. Изменение усреднённых значений тангенциальной, осевой и радиальной составляющих скоростей в циклоне, полученных в численном эксперименте, при среднем расходе  $Q=0,07 \text{ м}^3/\text{с}$ : а) в сечении A-A, б) в сечении B-B

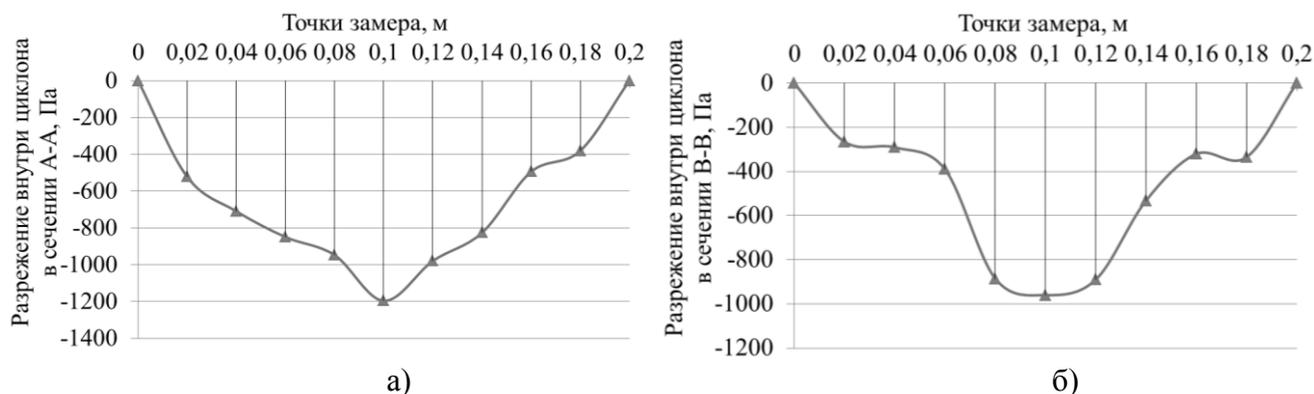


Рисунок 7. Изменение статического давления в циклоне, полученное в численном эксперименте при среднем расходе  $Q=0,07 \text{ м}^3/\text{с}$ : а) сечение  $A-A$ ; б) сечение  $B-B$

Определены изменения статического давления в поперечных сечениях  $A-A$  и  $B-B$  циклона (рис.7). Давление на входе в циклон в сечении  $B-B$  составляет  $-250 \text{ Па}$ , а на выходе из выхлопной трубы  $-960 \text{ Па}$  (рис.7 б). Следовательно, сопротивление циклона составляет  $710 \text{ Па}$ , что приемлемо при его использовании в городских газотранспортных системах.

**В четвертой главе** приведены результаты лабораторных испытаний работоспособности циклона диаметром  $100 \text{ мм}$  при условии оснащения его тканевым фильтром. Была собрана лабораторная установка (рис.8) для испытания циклонного фильтрующего аппарата. Перепады давления определялись  $U$ -образными манометрами и микроманометром ММН-240, а количество сепарируемой пыли – методом взвешивания. 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.

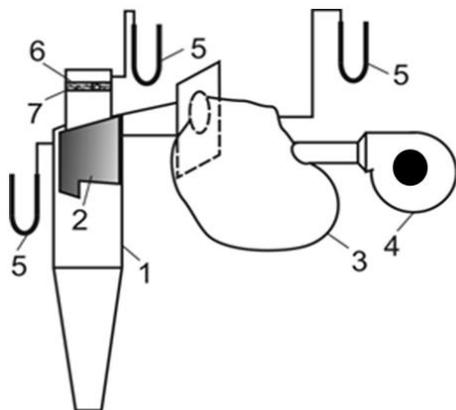


Рисунок 8. Схема лабораторной установки для испытания циклонного фильтрующего сепаратора: 1 - циклон; 2 - тканевый фильтр; 3 – контейнер с пылью; 4 - нагнетатель; 5-  $U$ -образные манометры; 6 –патрон с сеткой; 7- ткань Петрянова.

При изучении образцов фильтровальной вставки под микроскопом с  $400$ -кратным увеличением, были получены предварительные результаты по структуре и дисперсному составу осаждающейся на ткани пыли. При этом было замечено, что запыление оставляет на поверхности выходного фильтра спиральный след. Это показывает, что сохраняется даже прецессия потока, выходящего из выхлопной трубы, имеющая место при работе обычных циклонов без фильтрующих вставок. Следовательно, фильтрующая вставка не может нарушить аэродинамику кольцевого пространства аппарата, который по потоку находится выше выхлопной трубы. Таким образом, 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  $5000 \text{ Па}$ ).

**В пятой главе** выполнены стендовые испытания циклона-фильтра, конструкция которого была разработана на базе серийного циклона ЦН-11 диаметром  $200 \text{ мм}$  (рис.9).

Для проведения стендовых испытаний циклона-фильтра был приготовлен дисперсный материал в виде шамотной пыли с размером частиц  $D_p < 63$  мкм. Проба материала для испытаний отобрана в соответствии с надлежащей лабораторной практикой по ГОСТ 33044-2014. Проведен седиментационный анализ дисперсного состава отобранной пробы, принятой за эталонную. По результатам анализа на основании закона Стокса (2) получены радиусы частиц шамотной пыли  $r$ , м:

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

где  $H$  – высота оседания частиц, м;  $\tau$  – время оседания, с;  $V=H/\tau$  – скорость оседания, м/с;  $\rho_p$  – плотность частиц, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_G$  – плотность газовой среды, кг/м<sup>3</sup>;  $\eta$  – динамический коэффициент вязкости, Па·с.

Радиусы частиц  $r$ , полученные по результатам седиментационного анализа, находятся в пределах от 0,55 мкм до 30,47 мкм при этом максимальная доля фракций 19,38 % соответствует частицам радиусом 5,57 мкм (диаметром 11,13 мкм, рис.12).

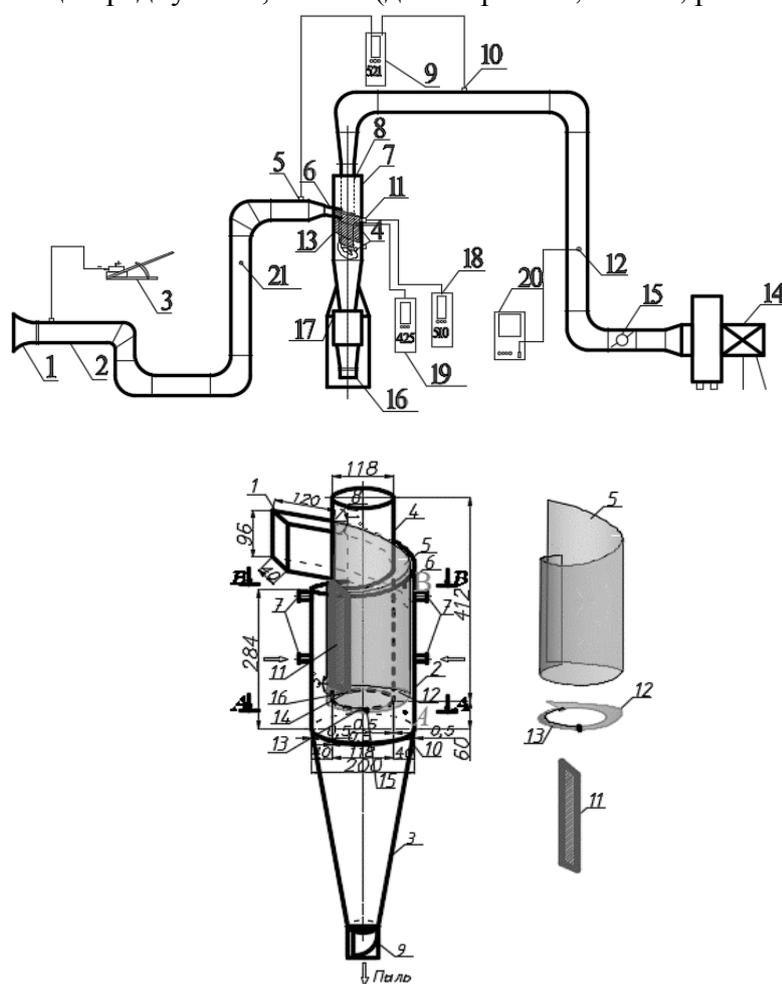


Рисунок 10. Схема конструкции циклона-фильтра: 1 – входной патрубок; 2 – цилиндрический корпус; 3 – коническое днище; 4 – выхлопная труба; 5 – фильтровальный материал; 6 – металлический каркас; 7 – продувочные штуцера; 8 – торец циклона; 9 – заслонка; 10 – детали крепежа; 11 – поперечный фильтр; 12 –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

Рисунок 9. Экспериментальная установка 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

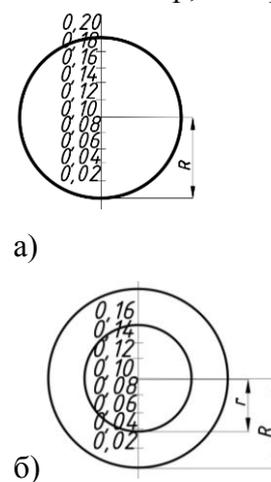


Рисунок 11. Схема расположения точек измерения давлений и скоростей в корпусе циклона: а) в сечении А-А; б) в сечении В-В, где  $R$  – радиус циклона,  $r$  – радиус выхлопной трубы

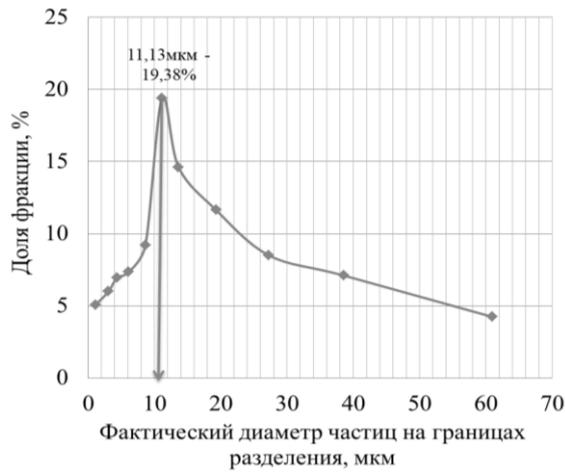


Рисунок 12. Дифференциальный график дисперсного состава пыли по результатам седиментационного анализа

На рис. 10, 11 представлены схемы конструкции циклона-фильтра и расположения точек измерения давлений и скоростей в сечениях *A-A* и *B-B*. В сечении *A-A* в 9 точках замера и в сечении *B-B* в 7 точках замера измерены тангенциальные и осевые скорости потока с помощью термоанемометра модели *Testo 425*. На рис.13 представлены распределения тангенциальной, осевой, и радиальной составляющих вектора скорости потока в циклоне при среднем расходе  $Q=0,07 \text{ м}^3/\text{с}$ . Здесь радиальная составляющая скорости определена посредством численного эксперимента, так как замерить её ввиду конструктивных особенностей циклона не представлялось возможным.

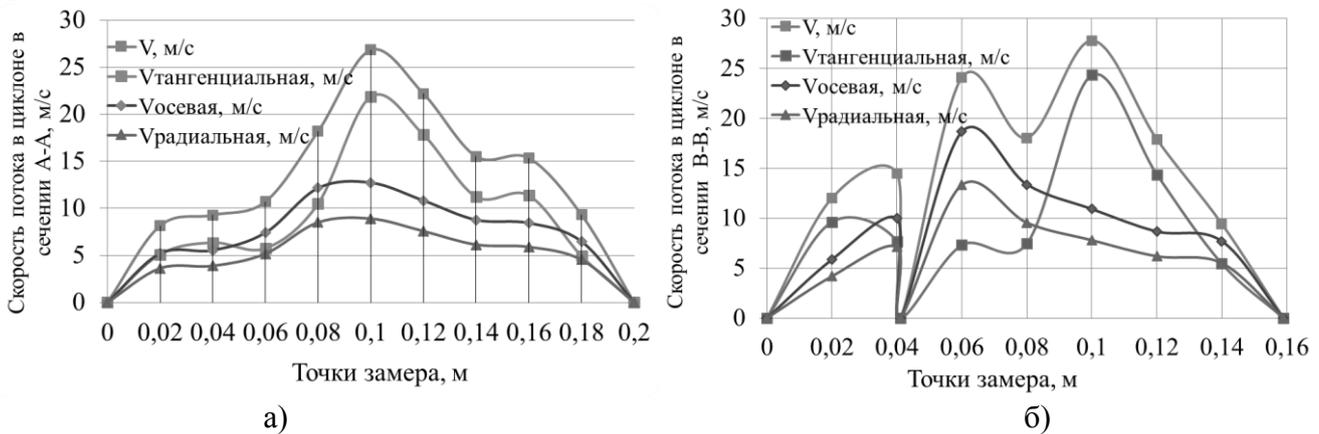


Рисунок 13. Зависимости составляющих компонентов скоростей незапыленного воздушного потока от расстояния  $x/r$  в циклоне, при среднем расходе  $Q=0,07 \text{ м}^3/\text{с}$ : а) в нижнем сечении *A-A* в 9 точках замера; б) в верхнем сечении *B-B* в 7 точках замера

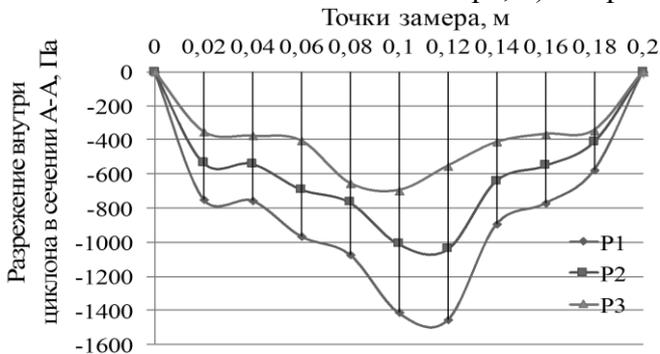


Рисунок 14. Зависимость давления в полости циклона с запылением в сечении *A-A* от расстояния  $x/r$  при средних расходах:  $P_1$  – при  $Q=0,07 \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $P_2$  – при  $Q=0,05 \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $P_3$  – при  $Q=0,03 \text{ м}^3/\text{с}$

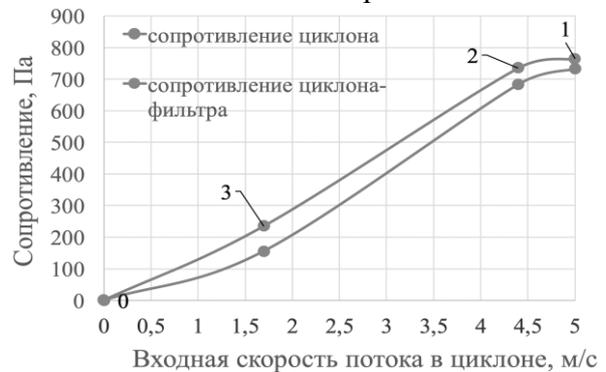


Рисунок 15. Зависимость сопротивления от входной скорости потока в циклон, при 1 -  $Q=0,07 \text{ м}^3/\text{с}$ , 2 -  $Q=0,05 \text{ м}^3/\text{с}$ , 3 -  $Q=0,03 \text{ м}^3/\text{с}$

Результаты измерения разрежения дифманометром модели *Testo 510* в циклоне в сечении *A-A* при трёх разных режимах работы вентилятора представлены на рис.14. Результаты измерения сопротивления циклона без фильтра и с установленным фильтром в зависимости от режима работы вентилятора представлены на рис.15.

В ходе экспериментов проведена проверка воспроизводимости результатов опытов и определены погрешности полученных соотношений. Воспроизводимость по трём сериям параллельных 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 *A-A* равна  $(27,93 \pm 2,52)$  м/с (точность измерений 9%), в сечении *B-B*  $(28,1 \pm 2,36)$  м/с (точность измерений 8,4%). Погрешность измерения разрежения потока в сечении *A-A* в пятой точке замера составила  $(699,0 \pm 26,0)$  Па, в сечении *B-B* –  $(1017,3 \pm 38,4)$  Па, (точность измерений 3,7%). 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  $\Delta P_5 = 16,3\%$ , в сечении *B-B* –  $\Delta P_5 = 4,4\%$ .

Таблица

Результаты испытания циклона-фильтра

№ п/п	Исходная масса пыли, $m_{исх}$ , 10 <sup>-3</sup> кг	Фильтровальная ткань			Масса пыли, осевшей на стенках циклона и в бункере, $m_{ст}$ , 10 <sup>-3</sup> кг	Масса пыли, осевшей в воздуховоде до циклона, $m_e$ , 10 <sup>-3</sup> кг	Масса пыли на ступенях импактора, 10 <sup>-3</sup> кг	Эффективность осаждения, %	Продолжительность опыта, с	Расход воздуха, $Q_{возд}$ , м <sup>3</sup> /с	Сопротивление циклона, Па	Расход пыли, $Q_{пыли}$ , 10 <sup>-3</sup> , кг/с	Концентрация пыли, $C$ , 10 <sup>-3</sup> кг/м <sup>3</sup>
		Масса до опыта, $m_{нач}$ , 10 <sup>-3</sup> кг	Масса после опыта, $m_{кон}$ , 10 <sup>-3</sup> кг	Масса осевшей пыли, $m$ , 10 <sup>-3</sup> кг									
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

Также для определения степени осаждения эталонной пыли в циклоне-фильтре была проведена серия испытаний из 20 опытов. В качестве примера в таблице приведены результаты опыта №10 продолжительностью 30 минут. Степень осаждения пыли в опыте №10:

$$\eta_{10} = \frac{m_{улав}}{m_{вх}} = \left( \frac{m + m_{ст.}}{m_{исх.} - m_e} \right) \cdot 100\% = 99,36\% .$$

Дисперсный состав пыли после циклона-фильтра определялся при помощи каскадного импактора «Озон-1», который был установлен в порт доступа 12 (рис.9). Минимальный диаметр частиц пыли, осевших на каждой ступени импактора, определялся по формуле:

$$D_{факт}^i = D_{тар}^i \cdot \sqrt{\frac{\eta_{\phi} \cdot \rho_m \cdot Q_m \cdot (273 + t_m)(P_{бар.ф} - P_{раз.ф})}{\eta_m \cdot \rho_{\phi} \cdot Q_{\phi} \cdot (273 + t_{\phi})(P_{бар.м} - P_{раз.м})}} , \quad (3)$$

где  $D_{факт}^i$  – минимальный диаметр частиц пыли, осевших на «*i*»-той ступени импактора, мкм;  $D_{тар}^i$  – минимальный диаметр частиц, осевших на «*i*»-той ступени, при тарировке импактора;  $\eta_m$ ,  $\eta_{\phi}$  – вязкость газов при температуре калибровки при  $t = 20^{\circ}\text{C}$  и отбора  $t$ ,  $^{\circ}\text{C}$ , Па·с;  $\rho_m$ ,  $\rho_{\phi}$  – плотность частиц пыли при калибровке и в пробе, кг/м<sup>3</sup>;  $Q_m = 0,167 \cdot 10^{-3}$  м<sup>3</sup>/с,  $Q_{\phi}$  – интенсивность

отбора при калибровке и в опыте;  $P_{бар.м}=101325$  Па,  $P_{бар.ф}$  – барометрическое давление при калибровке и в опыте;  $P_{раз.м}=200$  Па,  $P_{раз.ф}$  – разрежение в канале при калибровке и в опыте.

На рис.16 представлен дисперсный состав отобранной импактором пробы в дифференциальном и интегральном представлении. Проведённый анализ позволил установить медианный диаметр частиц ( $D_{50}=0,4$  мкм) и дисперсию ( $\sigma_p=2,02$ ) пыли, прошедшей через циклон-фильтр. Таким образом, усовершенствование циклона путем установки в него тканевого фильтра позволяет уменьшить диаметр отсекаания (частиц, улавливаемых на 50%), со средних для стандартных циклонов значений 10 мкм до 0,4 мкм, т.е. обеспечивает улавливание мелкодисперсных частиц класса  $PM_{10}$ ,  $PM_{2,5}$ . Следовательно, циклон-фильтр может быть использован в качестве второй (окончательной) степени очистки.

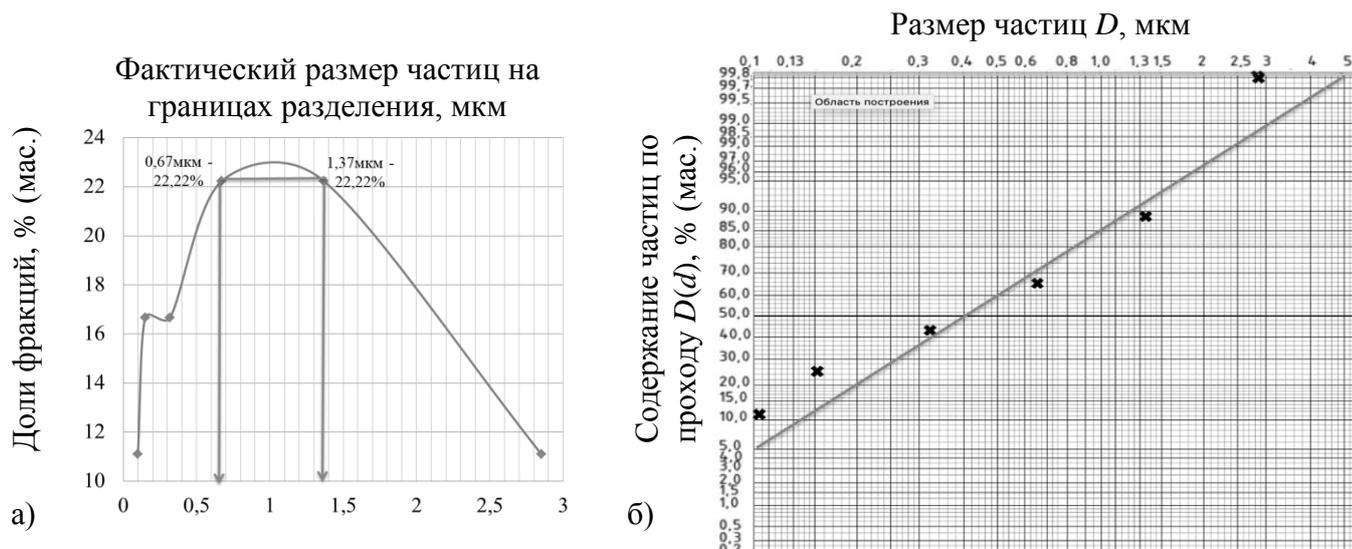


Рисунок 16. Графики дисперсного состава отобранной импактором пробы: а) дифференциальный (гистограмма); б) интегральный

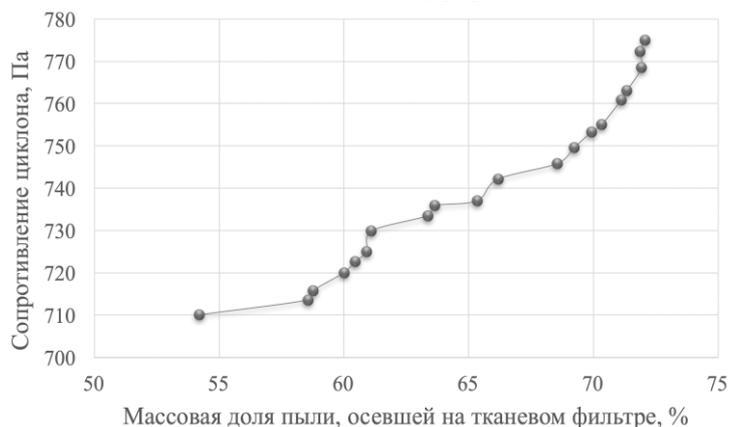


Рисунок 17. Зависимость увеличения сопротивления циклона по мере накопления пыли внутри фильтрующей перегородки

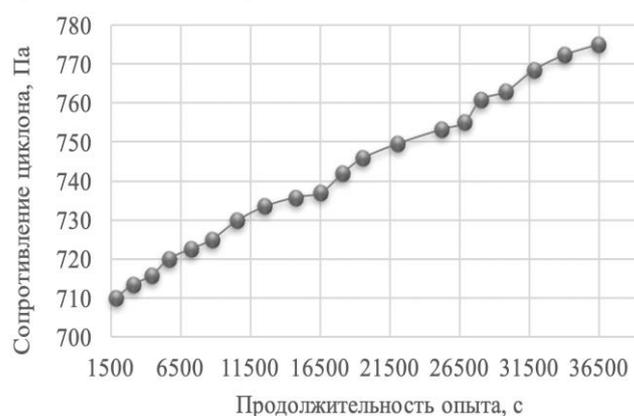


Рисунок 18. Зависимость изменения сопротивления от продолжительности опыта

По результатам проведённых исследований по мере накопления пыли на фильтрующей вставке эффективность циклона-фильтра увеличивается от 88,96% до 99,89%. При этом массовая доля пыли, осевшей непосредственно на тканевом фильтре в ходе испытаний, меняется в пределах от 0,54 до 0,72, а его сопротивление - от 710 до 775 Па (рис.17, 18).

По результатам проведенных исследований была составлена и прошла государственную регистрацию программа для ЭВМ «Программа расчёта газоочистных устройств с циклонно-фильтрующими аппаратами» по расчёту одиночных и групповых циклонов отечественных

конструкций. Программа предназначена для проведения численных исследований при конструировании новых, в том числе – циклонно-фильтрующих, вихревых аппаратов, а также для нахождения их типов и типоразмеров при проектировании газоочистки в городских газотранспортных системах с обеспечением требуемой степени очистки и минимальными энергетическими затратами.

**В шестой главе** приведены способ повышения эффективности эксплуатации топливно-энергетической системы города, вследствие усовершенствования технологии подготовки и очистки топлива. 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.

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  $\approx 339900$  руб., а при условии внедрения циклона-фильтра на все 8 ТЭЦ республики Татарстан - 2719200 руб.

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.

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.

### **Основные результаты и выводы**

Достигнута поставленная цель работы, основной результат которой заключается в повышении экологической и энергетической эффективности крупных городских энергетических систем и комплексов за счёт использования усовершенствованных газоочистных циклонно-фильтрующих элементов 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 отсекаания (частиц, улавливаемых на 50%), со средних для стандартных циклонов значений 10 мкм до 0,4 мкм, т.е. обеспечивает улавливание мелкодисперсных частиц класса PM<sub>10</sub>, PM<sub>2,5</sub>, при одновременном повышении эффективности очистки до 99,89% с минимальными энергозатратами.

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 за счёт повышения энергетической и экологической эффективности путём улучшения качества подготовки топлива 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.

### **Основные материалы диссертации опубликованы в работах**

#### *Статьи в рецензируемых научных изданиях рекомендованных ВАК по группе научных специальностей диссертации*

1. Замалиева, А.Т., Зиганшин, М.Г. Усовершенствованная установка фильтрации газа на ТЭС при подготовке топлива для городских энергетических систем // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2019. – № 5 (21). – С. 124-131. (вклад соискателя – 50%).
2. Замалиева, А.Т., Беляева, Г.И., Зиганшин, М.Г. Исследование изменений аэродинамических свойств и энергоэффективности в циклонных аппаратах для очистки газа // Территория Нефтегаз. – 2018. – № 6. – С. 114-119. (вклад соискателя – 60%).
3. Замалиева, А.Т., Зиганшин, М.Г. Повышение надёжности, энергетической и экологической эффективности систем газоочистки на ТЭС // Надёжность и безопасность энергетики. – 2018. – № 4 (11). – С. 288-293. (вклад соискателя – 66%).
4. Беляева, Г.И., Замалиева, А.Т. Исследование возвратно-поточного элемента мультициклона для очистки газа на газораспределительных станциях // Газовая промышленность. – 2017. – № 6 (753). – С. 118-122. (вклад соискателя – 80%).
5. Беляева, Г.И., Замалиева, А.Т. Исследование изменений аэродинамических свойств потока газа в батарейных циклонах // Газовая промышленность. – 2017. – № 7 (755). – С. 772-775. (вклад соискателя – 75%).
6. Замалиева, А.Т., Беляева, Г.И. Повышение энергоэффективности циклонных устройств для очистки выбросов в промышленности посредством натуральных и численных исследований // Территория нефтегаз. – 2017. – №6. – С. 106-111. (вклад соискателя – 66%).

#### *Статьи в рецензируемых научных изданиях рекомендованных ВАК по другим группам научных специальностей*

7. Замалиева, А.Т., Зиганшин, М.Г., Потапова, Л.И. Об эффективности существующих методов циклонной фильтрации при осаждении мелкодисперсных частиц классов PM<sub>10</sub>, PM<sub>2,5</sub> // Известия КГАСУ. – 2017. – № 4 (42). – С. 415-423. (вклад соискателя – 44%).
8. Замалиева, А.Т., Беляева, Г.И. Изменение аэродинамических свойств и эффективности в циклонных аппаратах посредством численных и натуральных исследований // Вестник Казанского технологического университета. – 2015. – № 4 (18). – С. 134-137. (вклад соискателя – 75%).

*Статьи в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в международной базе данных SCOPUS / Web Of Science:*

9. Zamalieva, A.T., Ziganshin, M.G. Improve energy and environmental efficiency of gas treatment systems on TPP // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. – 2019. – № 9 (330). – С. 143-153. (вклад соискателя – 50%).
10. Belyaeva, G.I., 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 481. – 2019. – P. 012041. (вклад соискателя – 33%).
11. 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 288. – 2019. – P. 012073. (вклад соискателя – 33%).
12. Belyaeva, G.I., Zamalieva, A.T., Ziganshin, M.G. Experimental and calculated testing of the efficiency of cyclone filtering devices // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 972. – 2020. – P. 012067. (вклад соискателя – 33%).

*Патент на полезную модель*

Пат. 190593 Рос. Федерация: МПК В04С 5/24, В04С 7/00. Батарейный циклон с циклонными элементами «Циклон-фильтр» / Беляева Г.И., Замалиева А.Т. // Бюл. «Изобретения. Полезные модели». – 2019. – №19. – 5 с. (вклад соискателя – 33%).

*Публикации в других изданиях*

13. Замалиева, А.Т. Анализ эффективности использования циклонной фильтрации для осаждения мелкодисперсных частиц // Сб. трудов Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов «Экология и безопасность в техносфере: современные проблемы и пути решения». – 2018. – С. 119-123. (вклад соискателя – 100%).
14. Замалиева, А.Т., Зиганшин, М.Г. Сравнительный анализ технических характеристик циклонов // Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура. – 2017. – № 4 (3). – С. 18-24. (вклад соискателя – 66%).
15. 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». – 2016. – С. 322-325. (вклад соискателя – 100%).

---

Подписано в печать 18.01.2021. Форм. бум. 60x84 1/16.

Бумага офсетная. Печать ризографическая.

Усл. печ. л. 1,25. Тираж 100. Заказ № 1801/3.

Отпечатано с готового оригинал – макета  
в типографии «Вестфалика» (ИП Колесов В.Н.)  
420111, г. Казань, ул. Московская, 22. Тел.: 292-98-92  
e-mail: westfalika@inbox.ru

---