

На правах рукописи



Беляева Гульназ Ильхамовна

**КОМБИНИРОВАННОЕ ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ  
УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ВОЗДУХООЧИСТИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ  
ГАЗОТРАНСПОРТНЫХ, ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ, ПРОМЫШЛЕННЫХ  
КОМПРЕССОРНЫХ СТАНЦИЙ**

2.1.3. Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование  
воздуха, газоснабжение и освещение

**АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ**  
на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Казань, 2026

Работа выполнена на кафедре «Атомные и тепловые электрические станции»  
ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»

Научный  
руководитель: **Зиганшин Малик Гарифович,**  
доктор технических наук, доцент по кафедре  
Теплогазоснабжения и вентиляции, профессор кафедры  
«Атомные и тепловые электрические станции» ФГБОУ  
ВО «Казанский государственный энергетический  
университет», г. Казань

Официальные  
оппоненты: **Литвинова Наталья Анатольевна,**  
доктор технических наук, доцент по специальности  
Экология, профессор кафедры техносферной  
безопасности ФГБОУ ВО «Тюменский  
индустриальный университет», г. Тюмень

**Мостовенко Любовь Владимировна,**  
кандидат технических наук, доцент по специальности  
теоретическая и прикладная теплотехника, доцент  
кафедры радиоэлектроники и электроэнергетики БУ  
ВО «Сургутский государственный университет»,  
г. Сургут

Ведущая  
организация: ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный  
технический университет», г. Волгоград

Защита диссертации состоится 01 июля 2026 года в 11 ч. 00 мин. на  
заседании диссертационного совета 24.2.310.04, созданного на базе  
ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», по  
адресу: 420066, г. Казань, ул. Красносельская, д. 51, ауд. Д-224, тел./факс  
(843) 519-42-20.

Отзывы на автореферат, с указанием контактных данных и заверенные  
печатью учреждения, просим направлять по адресу: 420066,  
г. Казань, ул. Красносельская, 51, КГЭУ, Ученому секретарю диссертационного  
совета 24.2.310.04, haybullina.87@mail.ru

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Казанского  
государственного энергетического университета и на официальном сайте КГЭУ  
<https://siteadmlnk01.kgeu.ru/struktura-vuza/dissertatsionnye-sovety/dissertatsionnyu-sovet-24-2-310-04/soiskatel-belyaeva-gulnaz-ilkhamovna/>.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2026 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
канд. техн. наук, доцент



А.И. Хайбуллина

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы исследования

Предлагаемая методика комбинированного численного исследования двухфазных потоков представляет интерес для разработки и модернизации аппаратов систем ТГВ с большим числом рабочих элементов. К таким аппаратам относятся воздухоочистительные устройства (ВОУ) для вентиляционных систем крупных промышленных предприятий, ТЭС и мини-ТЭЦ, а также для промышленных и газотранспортных компрессорных станций (КС). Так, комплексное воздухоочистительное устройство (КВОУ) для ТЭС или КС состоит из десятков тысяч элементов.

Усовершенствовать его конструкцию, например, с оптимизацией размещения элементов, можно либо после проведения длительных и дорогостоящих натурных испытаний, либо на основе результатов численных исследований. Очевидно, что замена натурального эксперимента в условиях действующего, зачастую – опасного, производства, со всех сторон является предпочтительной. Поэтому являются весьма актуальными исследования по созданию методов совершенствования крупногабаритных аппаратов со сложной конструкцией с использованием инструментов вычислительной гидродинамики (CFD – Computational Fluid Dynamics). При этом расчеты двухфазных потоков в проточной части трехмерных численных моделей требуют применения самых высокопроизводительных вычислительных кластеров. Для эффективного применения CFD в случаях, когда требуется оптимизировать конструктивные параметры ВОУ и других аппаратов с большим количеством рабочих элементов на предприятиях, оснащенных обычными вычислительными мощностями, необходимы методы, радикально уменьшающие количество вычислительных операций, например, путем замены большей части трехмерных вычислений двумерными вычислениями за счет рационального комбинирования исследований на 2d- и 3d- моделях. Анализ текущего состояния исследований выявляет недостаточную проработку направления комбинированных методов численного исследования. В представленной работе совершенствование ВОУ проводилось в направлении создания аппаратов с низким гидравлическим сопротивлением при сохранении высокой степени очистки (класс F7), что является одним из ключевых факторов, обеспечивающим высокую надежность и экономичность работы газоперекачивающих агрегатов (ГПА), газотурбинных установок (ГТУ), а, следовательно, и газотранспортной системы в целом.

Разработанный комбинированный метод исследования повысит возможности конструирования устройств с невысокими затратами энергии для тонкой очистки частиц пыли классов  $PM_{2,5}$  и  $PM_{10}$ , что ведет к улучшению санитарно-гигиенических условий и снижению энергозатрат на вентиляционные системы на объектах производственной сферы. Создаваемые устройства очистки воздуха будут иметь меньшие габариты, что позволит использовать их на любых объектах строительства, энергетики и промышленности, где имеются системы механической вентиляции и/или компрессорные установки, независимо от производительности. Вследствие многочисленности таких устройств уменьшение габаритов и снижение энергозатрат на их эксплуатацию внесет ощутимый эффект

в снижение выбросов  $\text{CO}_2$  при энергогенерации. На особую актуальность этого вопроса указывает постоянное внимание руководства страны, что подтверждает ряд директивных документов Президента и Правительства РФ.

### **Степень разработанности темы исследования**

Исследования по оптимизации соотношения величин степени улавливания и энергетических затрат газоочистительного оборудования методами экспериментального и численного моделирования проводились большим числом исследователей в нашей стране и за рубежом, такими как J. Galins, I. Langmuir, J.J. Derksen, A.C. Hoffmann, T. Tomohiko, J.K. Eaton, F.J. Souza, M.L. Shur, H. Blackburn, P.R. Spalart, M.K. Strelets, K.W. Chu, J. Chen, A.B. Yu, H. Ahmadian, S. Schmidt, W. Peng, Н.А. Николаевым, А.Ф. Махоткиным, М.Г. Зиганшиным, А.М. Зиганшиным, Ю.Р. Кареевой, А.В. Дмитриевым, Т.Н. Мустафиным, М.Б. Хадиевым, А.В. Поташевым, А.В. Бурмистровым, В.Н. Посохиным, А.И. Еремкиным, Н.А. Литвиновой, Л.В. Мостовенко и многими другими. Особо можно отметить достижения в экспериментальной технике волгоградской школы под руководством В.Н. Азарова – Д.П. Боровкова, Н.М. Сергиной и др., и в математическом моделировании аэродинамики пылевых потоков белгородской школы – К.И. Логачева, О.А. Аверковой и др. При этом в мировой науке пока не в полной мере внесена ясность в закономерности осаждения твердых частиц из вращающихся потоков и в пористом слое, а конструктивные и эксплуатационные характеристики очистных систем находят в основном эмпирически, из опыта эксплуатации подобных аппаратов.

Создание устройств, обеспечивающих высокую степень очистки газовых и воздушных потоков при низких энергозатратах перед ГТУ и компрессорными установками в системах газоснабжения и промышленной вентиляции, городской энергетики и транспорта, наиболее рационально можно проводить, основываясь на результатах исследования потоков в численных моделях циклонных и фильтрующих очистных систем. В связи с этим для эффективного совершенствования конструкций газоочистных аппаратов в первую очередь требуется рационализация способов численных исследований объектов с большим количеством (до ста и более) циклонизирующих и фильтрующих элементов, однако пока это мало разработанное направление.

**Цель исследования** – создание рационального способа комбинированного численного моделирования условий работы и эффективного расположения циклонных и фильтрующих элементов для усовершенствования ВОУ с обеспечением очистки воздуха по классу F7 в газотранспортных, энергетических и промышленных компрессорных станциях систем вентиляции, теплоснабжения, газоснабжения.

### **Задачи исследования:**

1. Провести критический анализ существующих способов численного исследования ВОУ в системах вентиляции, газо- и воздухообеспечения промышленных и энергетических объектов в газотранспортных, энергетических и промышленных компрессорных станциях.

2. Расчетное определение осаждения мелкодисперсных частиц классов  $\text{PM}_{2,5}$  и  $\text{PM}_{10}$  в воздухоочистительных устройствах с циклонными элементами для

газотранспортных, энергетических и промышленных компрессорных станциях и системах вентиляции, теплоснабжения, газоснабжения.

3. Выполнить численные исследования на основе методов вычислительной гидродинамики: 2d- по эффективному размещению очистных элементов в модульной компоновке, 3d- по эффективности работы циклонно-фильтрующего элемента.

4. Составить алгоритм и разработать рекомендации по выполнению комбинированных 2d- и 3d- исследований для совершенствования существующих и конструирования новых аппаратов типа ВОУ с большим числом очистных элементов.

5. Провести валидацию результатов численных исследований на основе натурального эксперимента.

6. Определить технико-экономическую эффективность внедрения усовершенствованного ВОУ на энергетических, газотранспортных и промышленных предприятиях.

#### **Объект исследования**

Способы численного моделирования очистных устройств вентиляционных систем крупных производственных объектов, систем газо- и воздухообеспечения городских энергетических объектов, промышленных и газотранспортных компрессорных станций.

#### **Предмет исследования**

Характеристики ресурсозатратности 2d- и 3d- численных моделей, обеспечивающих физически адекватные результаты изучения аэродинамики двухфазных потоков в очистных элементах и модулях воздухоочистных устройств.

#### **Научная новизна исследования**

1. Создана математическая модель для анализа блочной (модульной) компоновки ВОУ на основе методов CFD.

2. Разработан способ создания корректной 2d- модели трехмерного двухфазного потока в возвратно-поточном циклонном элементе, что позволило создать метод комбинированного 2d-, 3d- численного исследования.

3. Разработаны алгоритм и рекомендации по выполнению комбинированного 2d-, 3d- исследования модулей циклонных и фильтрующих элементов.

4. Получены результаты численного исследования циклонно-фильтрующих элементов для создания новой конструкции воздухоочистного устройства типа КВОУ уменьшенных габаритов.

#### **Теоретическая значимость работы**

Выполнены теоретические расчеты степени осаждения взвеси из двухфазного потока в модуле "циклон-фильтр". Составлен алгоритм и разработана методика комбинированных 2d-, 3d- исследований аппаратов с большим числом рабочих элементов, в том числе ВОУ для газотранспортных, энергетических и промышленных компрессорных станций систем вентиляции, теплоснабжения, газоснабжения.

### **Практическая значимость работы**

Приняты к внедрению предложения по повышению эффективности осаждения мелкодисперсных частиц  $PM_{10}$ ,  $PM_{2,5}$  в КВОУ КС ООО «Газпром трансгаз Казань»; предложения по повышению эффективности очистки на АО «Эссен Продакшн АГ» от мелкодисперсных частиц классов  $PM_{10}$ ,  $PM_{2,5}$ ; результаты исследования используются в учебном процессе студентов ФГБОУ ВО «КГЭУ».

### **Методология и методы исследования**

В процессе работы проводилась оценка эффективности очистки воздуха в модуле ВОУ с циклонными элементами «циклон-фильтр» на основании теоретических расчетов. Применялось численное 2d- и 3d- исследование блоков циклонных элементов на базе методов вычислительной гидродинамики (CFD, Ansys Fluent). Проводилось экспериментальное определение скоростей и давлений в циклонных элементах типа "циклон-фильтр" для валидации численных моделей.

### **На защиту выносятся**

1. Результаты расчетного определения осаждения мелкодисперсных частиц классов  $PM_{2,5}$  и  $PM_{10}$  в воздухоочистительных устройствах с циклонными элементами с использованием относительного числа Рейнольдса  $Re_r$ .
2. Способ создания корректной 2d- модели трехмерного двухфазного потока в возвратно-поточном циклонном элементе.
3. Результаты численного (2d-) определения наиболее эффективного расположения циклонных элементов в модулях воздухоочистительных устройств.
4. Результаты численных (3d-) расчетов с оценкой эффективности улова частиц пыли, алгоритм выполнения комбинированных 2d- и 3d- исследований для совершенствования компоновок очистных элементов в модулях ВОУ, валидация данных численного эксперимента по значениям, полученным в натурном эксперименте.
5. Результаты технико-экономического эффекта от внедрения улучшенного КВОУ в предприятия Республики Татарстан.

### **Достоверность результатов**

Определяется удовлетворительным совпадением сопоставляемых расчетных результатов и экспериментов, проведенных с использованием поверенных средств измерений. Полученные результаты не противоречат общепринятым научным положениям.

### **Апробация работы**

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и получили одобрение в ряде конференций Казанского государственного энергетического университета, Казанского государственного архитектурно-строительного университета и др. ВУЗов и НИИ в РФ и за рубежом, начиная с 2009 года, таких как Международная научно-практическая конференция «Инженерные системы-2010» (Москва, 2010), Международная научно-практическая интернет-конференция «Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании» (Одесса, 2011), Международная научно-техническая конференция «XVII Бенардосовские чтения»

ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина» (Иваново, 2013), Национальный конгресс по энергетике «Казанский государственный энергетический университет» (Казань, 2014), XXVI Международная Чугаевская конференция по координационной химии 9.10.2014 2014 (Саратов, 2014), Всероссийская научно-практическая конференция студентов, аспирантов, молодых ученых с международным участием (Екатеринбург, 2015), X-й семинар молодых ученых и специалистов имени академика РАН В.Е. Алемасова КазНЦ РАН (Казань, 2016), «НАСКР-2016» (Чебоксары, 2016), 15 Международная научная конференция 19-29 сентября 2017г., «Качество внутреннего воздуха и окружающей среды» (Порту – Волгоград, 2017), Всероссийская научно-практическая конференция молодых ученых, аспирантов и студентов, Юргинский технологический институт (Томск, 2017), VII очная Международная научно-практическая конференция Саратовского государственного аграрного университета имени Н.И.Вавилова (Саратов, 2018), II Международная научно-практическая конференция. Экологическая безопасность и устойчивое развитие урбанизированных территорий (Н. Новгород, 2019), IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 481 (Екатеринбург, 2019), IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 288 (Казань, 2019), на IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 972 (Екатеринбург, 2020), II Международная научно-техническая конференция «Smart Energy Systems 2021» (SES-2021) (Казань, 2021), II Международная научная конференция «Устойчивое развитие энергетики Республики Беларусь: состояние и перспективы» (Минск, 2022), Международная молодежная научная конференция Тинчуринские чтения-2023 «Энергетика и цифровая трансформация» (Казань, 2023).

#### **Личное участие автора**

Заключается в непосредственном участии в разработке конструкции и численной модели модулей с циклонными элементами «циклон-фильтр» для однофазных и многофазных потоков; в осуществлении опытных и численных исследований; проведении обработки полученных результатов; обеспечении проверки и валидации полученных результатов расчетов для однофазных и многофазных потоков.

#### **Соответствие паспорту 2.1.3**

Диссертация соответствует специальности: 2.1.3 «Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение» в части пунктов:

2. Технологические задачи теплогазоснабжения, вентиляции и кондиционирования воздуха, разработка методов энергосбережения систем и элементов теплоснабжения, вентиляции, кондиционирования воздуха, газоснабжения и освещения, охраны воздушного бассейна, защиты от шума зданий и сооружений. Очистка и расчет рассеивания загрязняющих веществ от вентиляционных выбросов.

3. Разработка и совершенствование систем теплогазоснабжения, вентиляции и кондиционирования воздуха, разработка методов энергосбережения систем и элементов теплоснабжения, вентиляции, кондиционирования воздуха, газоснабжения и освещения, охраны воздушного бассейна, защиты от шума

зданий и сооружений, аспирации и пневмотранспорта, включая использование альтернативных, вторичных и возобновляемых источников энергии; развитие методов моделирования многофазных потоков и динамических процессов в аэродисперсных системах.

4. Разработка математических моделей, методов, алгоритмов и компьютерных программ, использование численных методов, с проверкой их адекватности, для расчета, конструирования и проектирования систем теплоснабжения, вентиляции, кондиционирования воздуха, газоснабжения и освещения, охраны воздушного бассейна, защиты от шума зданий и сооружений, повышения их надежности и эффективности.

#### **Реализация результатов работы**

Результаты численного моделирования КВОУ с модулями циклонно-фильтрующих элементов, обеспечивающие повышение эффективности осаждения мелкодисперсных частиц классов  $PM_{10}$ ,  $PM_{2,5}$  в них до 99%, приняты для модернизации КВОУ компрессорной станции «Арская» ООО «Газпром трансгаз Казань», для проектирования ВОУ на объектах АО «Эссен Продакшн АГ», а также используются в учебном процессе студентов ФГБОУ ВО «КГЭУ».

#### **Публикации**

Результаты диссертационного исследования отражены в 34 публикациях, включая 3 статьи в журналах, индексируемых в SCOPUS, и 9 статей в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ (из них 3 по специальности 2.1.3). Дополнительно опубликовано 20 работ в других изданиях. Научные достижения подтверждены двумя патентами РФ на полезную модель «Батарейный циклон с циклонными элементами «циклон-фильтр» и «Циклон-фильтр».

#### **Структура и объем работы**

Диссертация состоит из введения и шести глав, заключения, списка использованной литературы (145 наименований) и 8 приложений. Объем работы составляет 156 страниц основного текста и 21 страницу приложений, представлено 66 рисунков и 22 таблицы.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** приведена общая характеристика работы, обосновываются актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и поставлены задачи диссертационного исследования. Показана научная и практическая значимость полученных результатов. Обозначены основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** выполнен критический анализ работ зарубежных и отечественных исследователей. Выявлено, что направление рационализации численных исследований объектов с большим количеством очистных элементов развито слабо. Использование комбинированного 2d-, 3d- моделирования методами CFD будет способствовать увеличению результативности исследований аэродинамики потоков в устройствах с множественными элементами вследствие обеспечения их доступности для организаций с не крупными вычислительными центрами.

**Во второй главе** выполнено расчетное определение осаждения мелкодисперсных частиц классов  $PM_{2,5}$  и  $PM_{10}$  в воздухоочистительных устройствах с циклонными элементами типа «циклон-фильтр» диаметром 100 мм для газотранспортных, энергетических и промышленных компрессорных станциях и системах вентиляции, теплоснабжения, газоснабжения. 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.

На основе расчетов найден оптимальный вариант размещения фильтра – на расстоянии 0,041 м от центра циклона при скорости потока равной 7 м/с, что обеспечивает следующие характеристики разделения частиц:  $d_{50} = 0,53$  мкм и  $d_{99} = 8,25$  мкм. Расчетами определено числовое значение комплекса  $Re_r = 3,2 \cdot 10^{-6}$ , которое является пороговым. Частицы с  $Re_r$  меньше этого значения не оседают и продолжают двигаться по кольцевой траектории. Частицы с  $Re_r$  больше  $3,2 \cdot 10^{-6}$  осаждаются на поверхностях корпуса, выходного патрубка и фильтра. Безразмерный комплекс  $Re_r$  позволяет находить оценочные значения конструктивных параметров и степени осаждения частиц в элементах типа «циклон-фильтр» расчётным путём. Это позволяет рационализировать назначение исходных данных («начальных условий») для математической модели, что облегчает реализацию численного эксперимента.

**В третьей главе** приведены результаты лабораторных испытаний работоспособности циклонного элемента диаметром 100 мм, оснащенного тканевым фильтром на расстоянии 0,041 м от центра циклона. Лабораторные исследования проведены по стандартным методикам в соответствии со стандартами ANSI/ASHRAE Standard 52.2-2007, ISO 12103-1:2024, ГОСТ Р 51708-2001. На рисунке1 показан вид лабораторной установки для его испытания.

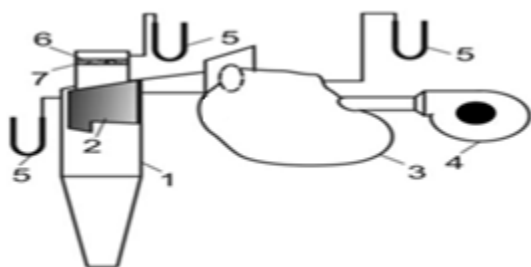


Рисунок 1. Стенд для испытания фильтрующего циклонного сепаратора 1 – циклон; 2 – тканевый фильтр; 3 – контейнер с пылью; 4 – нагнетатель; 5 – U-образные манометры; 6 – патрон с сеткой; 7 – ткань Петрянова

Значение  $d_{50}$  пыли при лабораторных испытаниях составило 2,7 мкм, дисперсия  $\sigma = 3,6$ . Результаты показали, что фильтровальная ткань улавливает 68% пыли, 18% оседает на стенках циклона, а проскок через элемент, уловленный в выхлопном патрубке циклона тканью Петрянова, составил около 14%.

Результаты исследований показали качественное соотношение с результатами теоретических расчетов с использованием комплекса  $Re_r$ , а также продемонстрировали перспективность модернизации циклонов путем интеграции фильтрующих вставок, что повышает эффективность пылеулавливания при сохранении приемлемого уровня гидравлического сопротивления.

**В четвертой главе** представлены результаты разработки и применения метода комбинированного (2d-/3d-) численного исследования эффективности очистки дисперсных выбросов в модуле ВОУ с элементами «циклон-фильтр». Построение геометрии, решение задачи проводилось в программном комплексе ANSYS Fluent. Применены приложения Design Modeler и Space Claim Direct Modeler (SCDM). Для анализа течений газовой фазы было выбрано уравнение движения Навье-Стокса, осредненное по Рейнольдсу, для замыкания которого применена  $k$ - $\epsilon$  модель турбулентности. В качестве дискретной фазы принята промышленная пыль из библиотеки Fluent типа anthracite с плотностью  $\rho = 2000 \text{ кг/м}^3$ . При моделировании движения дискретной фазы (DPM) использовался метод Лагранжа с отслеживанием траектории каждой частицы в потоке воздуха и учетом двухстороннего «сцепления» газа и частиц, т.е. их взаимовлияния на характеристики движения. Распределение размеров частиц пыли принято логарифмическое по Розину-Раммлеру, с числом фракций 10 и спреем (дисперсией) 2,5. Минимальный диаметр частиц 0,4 мкм, максимальный 40 мкм. Параметры инъекции частиц: скорость 0,01 м/с, общий расход 0,002 кг/с. Изначально на основе 2d-модели были определены локации циклонных элементов и расположение их входов, обеспечивающие максимальную степень осаждения поступающей в модуль с элементами «циклон-фильтр» ВОУ взвеси. Затем на 3d-модели испытывалась эффективность осаждения в конструкции элемента типа «циклон-фильтр», обеспечившая требуемую очистку класса F7. Это позволило объединить грубую и финишную ступени очистки в одном аппарате и существенно уменьшить габариты и материалоемкость ВОУ.

Для установления эффективного расположения циклонных элементов был проведен ряд численных экспериментов на полномасштабной 2d- модели модуля с циклонными элементами «циклон-фильтр» ВОУ. Построена двумерная 2d-модель и конечно-элементная сетка на базе квадратных элементов с шагом 5 мм; разбиение расчетной области на конечные элементы выполнено полуавтоматическим методом – расчетная сетка 2d- модели очистного аппарата имеет 79543 ячеек, а 3d- модель одного циклонного элемента – 900000 ячеек; идентифицированы границы расчетной области, на которых установлены граничные условия. Для расчетов был выбран решатель на базе давления, с "неявной" схемой решения нестационарной задачи.

При настройке решения задачи задавались параметры непрерывной и дискретной фаз. Для решения задачи в солвере были установлены следующие граничные условия для гомогенной фазы: Velocity Inlet – равномерное распределение скорости на входе в канал; Pressure Outlet – атмосферное давление на выходе из канала; Wall – граничное условие стенки, циклонных элементов. Постановка граничных условий для дисперсной фазы имела следующую особенность. Непроницаемые поверхности элементов «циклон-фильтр»

выполняли функцию улавливания частиц, а стенки корпуса – функцию их отражения. Поэтому для настройки граничных условий дискретной фазовой модели для стенок элементов и модуля ВОУ создано граничное условие «Wall». Тип распределения дисперсной фазы по размерам частиц принимался по Розину-Раммлеру, с числом фракций (числом диаметров) 10 и с параметром дисперсии (параметром разброса) 2,5.

Сначала исследовались характеристики потока с расстановкой циклонных элементов, применяемой в обычных мультициклонах, исследовались поля статического давления и скорости (рисунок 2). Расположение входов в циклонные элементы определялось в точках максимального значения полей статического давления (рисунок 3). Это позволило сформировать схему расположения циклонных элементов и входных патрубков с определением соответствующего ему гидравлического сопротивления аппарата.

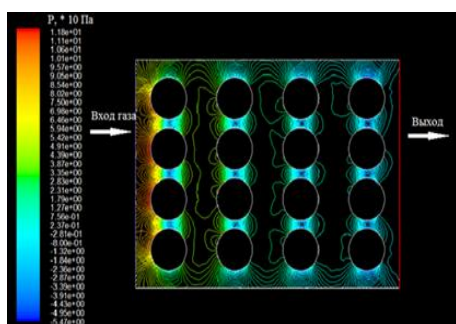


Рисунок 2. Поля статического давления в 2d-модели модуля с циклонными элементами «циклон-фильтр» ВОУ

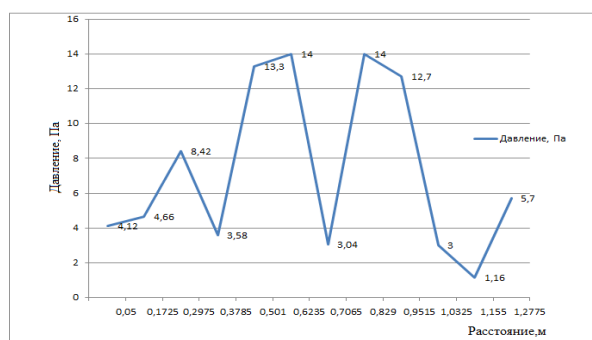
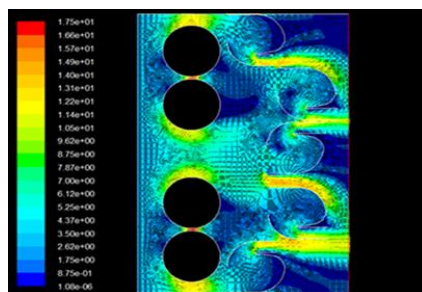


Рисунок 3. Изменение величины давления перед циклонными элементами первого ряда модуля ВОУ

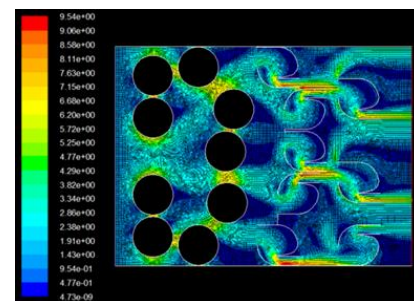
После определения по характеристикам полей давления координат наилучшей локации элементов и их полуулиточных входов круглые препятствия заменялись на элементы с полуулиточной конфигурацией, которые устанавливались по найденным координатам (рисунок 4а, б, в).



а)



б)



в)

Рисунок 4. Геометрическое моделирование элементов первого (а), второго (б) и четвертого (в) рядов модуля с циклонными элементами «циклон-фильтр» ВОУ

После проведения серии численных экспериментов первого ряда модуля в качестве наиболее эффективного расположения циклонных элементов определено попарное зеркальное расположение элементов (рисунок 4а).

Далее элементы первого ряда заменялись на сплошные элементы круглого сечения с точным соблюдением координат, а во втором ряду создавались циклонные элементы с полуулиточной конфигурацией. После нахождения координат наилучшей локации полуулиточных элементов второго ряда они также заменялись на сплошные элементы круглого сечения (рисунок 4б). Аналогично были найдены локации элементов третьего и четвертого ряда (рисунок 4в).

На рисунках 5-8 приведены графики изменения величин скорости на выходе из циклонных элементов каждого ряда.

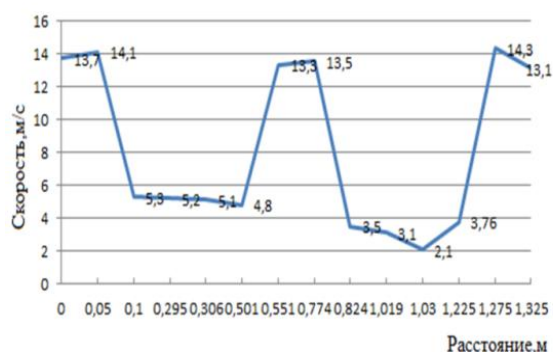


Рисунок 5. Изменение величины скорости на выходе из циклонных элементов первого ряда модуля ВОУ

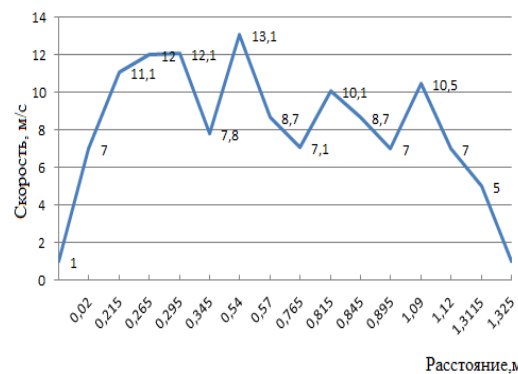


Рисунок 6. Изменение величины скорости на выходе из циклонных элементов второго ряда модуля ВОУ

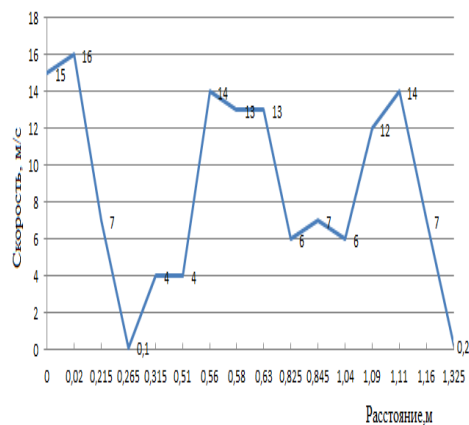


Рисунок 7. Изменение величины скорости на выходе из циклонных элементов третьего ряда модуля ВОУ

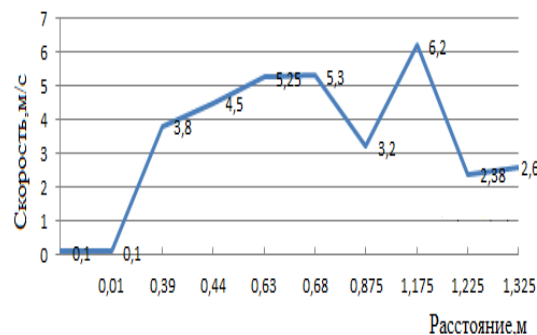


Рисунок 8. Изменение величины скорости на выходе из циклонных элементов четвертого ряда модуля ВОУ

Полный коэффициент осаждения взвешенных частиц после прохождения четырех рядов модуля ВОУ составляет 99,29% (рисунок 9), что свидетельствует о создании корректной 2d- модели трехмерного двухфазного потока в возвратно-поточном циклонном элементе.

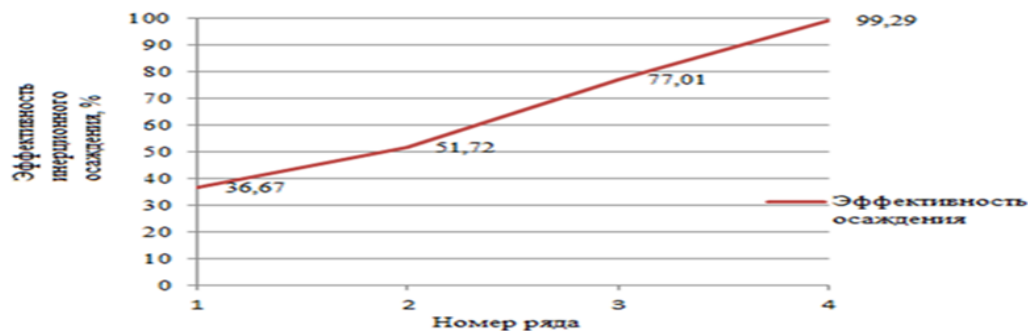
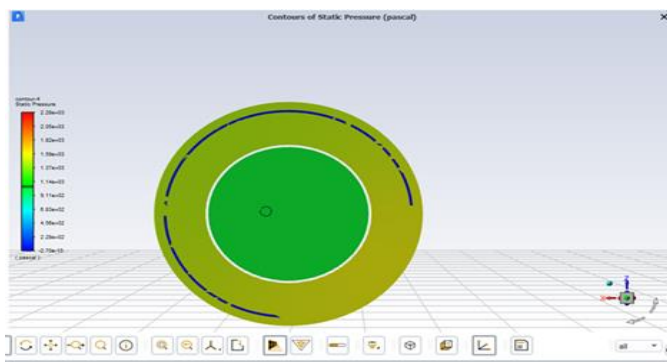


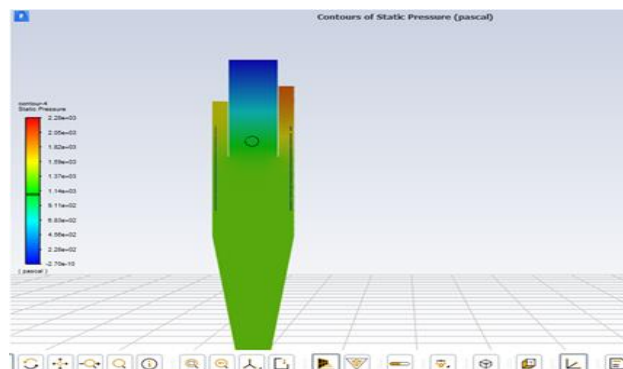
Рисунок 9. Эффективность инерционного осаждения в четырех рядах модуля ВОУ

Результаты численного 2d- определения наиболее эффективного расположения циклонных элементов в модулях воздухоочистительных устройств позволили выявить проскок частиц вплоть до размера 2,5 мкм. Поскольку фильтрующие аппараты классифицируют по величине проскока частиц размером 0,4 мкм, полученный результат не показывает высокой степени очистки субмикронных фракций. С учетом этого было принято решение о необходимости продолжения исследования с установкой пористых фильтров в полуулиточных циклонных элементах мультициклона. После нахождения наилучших локаций циклонных элементов в 2d- формате, соответствующих максимально возможному улавливанию в них взвеси, были проведены 3d-исследования эффективности отдельного очистного элемента модуля ВОУ типа «циклон-фильтр».

3d-геометрия элемента с полуулиточным вводом с диаметром корпуса 100 мм была построена в приложении ANSYS SpaceClaim Direct Modeler (SCDM) по принципам создания твердотельной модели. На рисунке 10 представлены поля давлений в продольном и поперечном сечениях циклонного элемента с фильтрующей вставкой, полученные в результате расчетов созданной численной модели.



а)



б)

Рисунок 10. Распределение давления двухфазного потока в вертикальном сечении 3d- модели циклона-фильтра диаметром 100 мм с базовой конструкцией циклона ЦН-11. Кружком обозначена тестируемая точка (точка б в таблице 1), по которой проводилась валидация результатов численных исследований путем сверки с замерами на экспериментальной установке

Сгенерирована неструктурированная тетраэдрическая сетка с числом ячеек более 900000. Для газовой фазы принята модель турбулентности RANS (осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье – Стокса). Так как решения по эффективности осаждения дисперсной части потока в циклоне при использовании модификаций RNG и Realizable – k-ε не всегда оказывались устойчивыми, то для замыкания уравнений Навье – Стокса рассматривали двухпараметрическую стандартную k-ε модель с пристенными функциями и модель SST-k-ω (модель Ментора). Для моделирования движения дискретной фазы, как и в 2d- модели, применен метод Лагранжа с отслеживанием траекторий частиц. В расчетах принят солвер на базе давления, с неявной (Implicit) схемой решения нестационарной задачи. При настройке решения для потока по гомогенной фазе задавались граничные условия Velocity Inlet и Pressure Outlet. Для внутренней стенки корпуса и выхлопной трубы задано граничное условие Wall. Параметры гомогенной фазы (воздух) приняты постоянными: температура  $t = 20^{\circ}\text{C}$ , давление  $p = 101325 \text{ Па}$ , плотность  $\rho_a = 1,204 \text{ кг/м}^3$ , динамическая вязкость  $\eta = 15,1 \times 10^{-6} \text{ Па} \times \text{с}$ . Распределение размеров частиц пыли и параметры инжекции частиц приняты такими же, как при 2d- моделировании.

Полученные результаты численных исследований позволили разработать рекомендации и алгоритм по выполнению комбинированных 2d- и 3d- исследований для совершенствования компоновок очистных элементов в модулях ВОУ (рисунок 11).

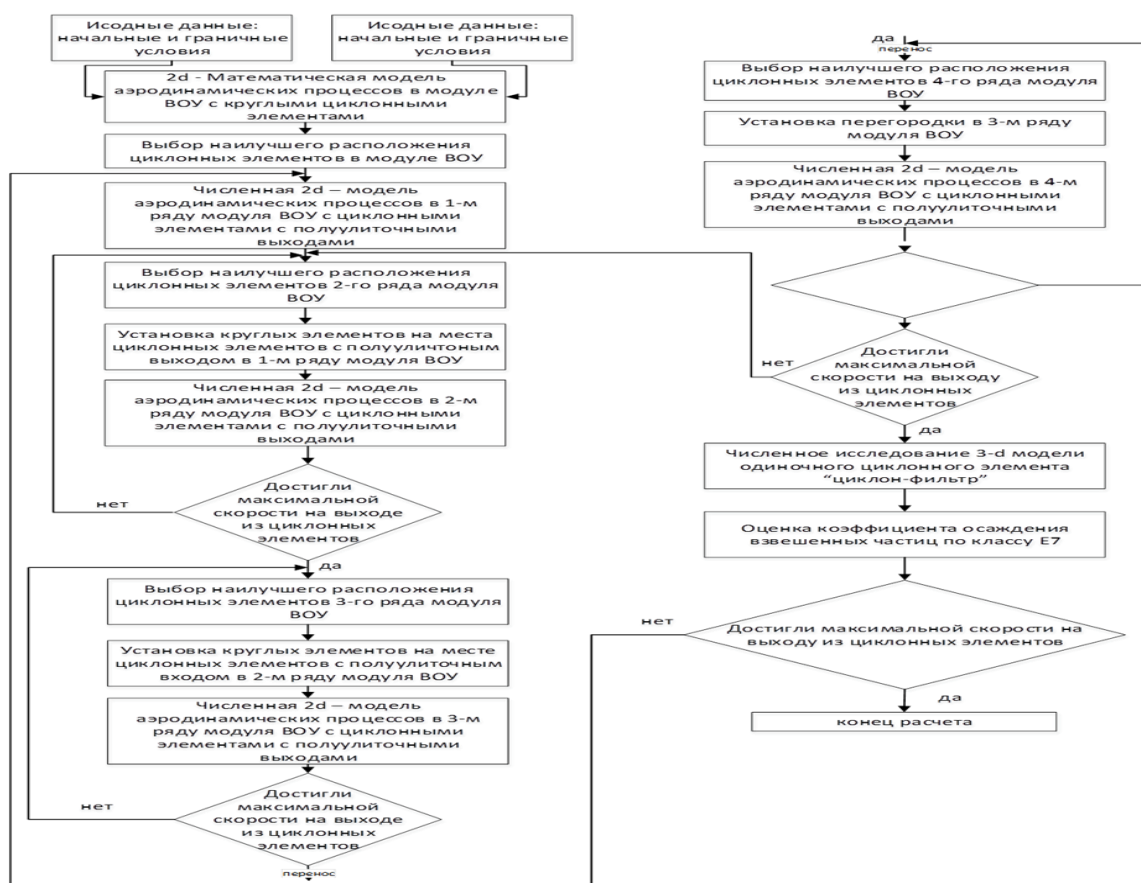


Рисунок 11. Алгоритм по выполнению комбинированных 2d- и 3d- исследований для совершенствования компоновок очистных элементов в модулях ВОУ

Методика комбинированных исследований позволяет существенно понизить требуемую мощность вычислительного ресурса вследствие кардинального уменьшения объемов вычислений, а также в несколько (оценочно – до 7,5) раз уменьшить затраты машинного времени на выполнение исследования в целом.

**В пятой главе** приведены результаты экспериментальных исследований циклонной фильтрации, которые проводились для валидации результатов численных исследований. Проведены лабораторные испытания конструкции циклонного фильтра диаметром 100 мм, разработанной на основе серийного циклона ЦН-11. В опытах определялись давление и скорость потока в тестируемой точке б элемента «циклон-фильтр» при различных расходах воздуха через него. Экспериментальная установка представлена на рисунке 12. Она содержит циклонный элемент, под выхлопную трубу которого вставлена и закреплена трубка Пито с входным отверстием 1,5 мм, U-образный манометр, микроманометр ММН-2400, нагнетатель, коллектор, регулятор напряжения и контейнер с пылью. Для нахождения сопротивления циклона замерялся перепад давления на входе и на выходе из циклона с помощью микроманометра. Расход воздуха определялся с помощью коллектора плавного входа и U-образного манометра. Давление и скорость воздуха в тестируемой точке б внутри циклона определялись по показаниям трубки Пито, оттарированной при помощи термоанемометра Testo 425 (на фото не приведен).

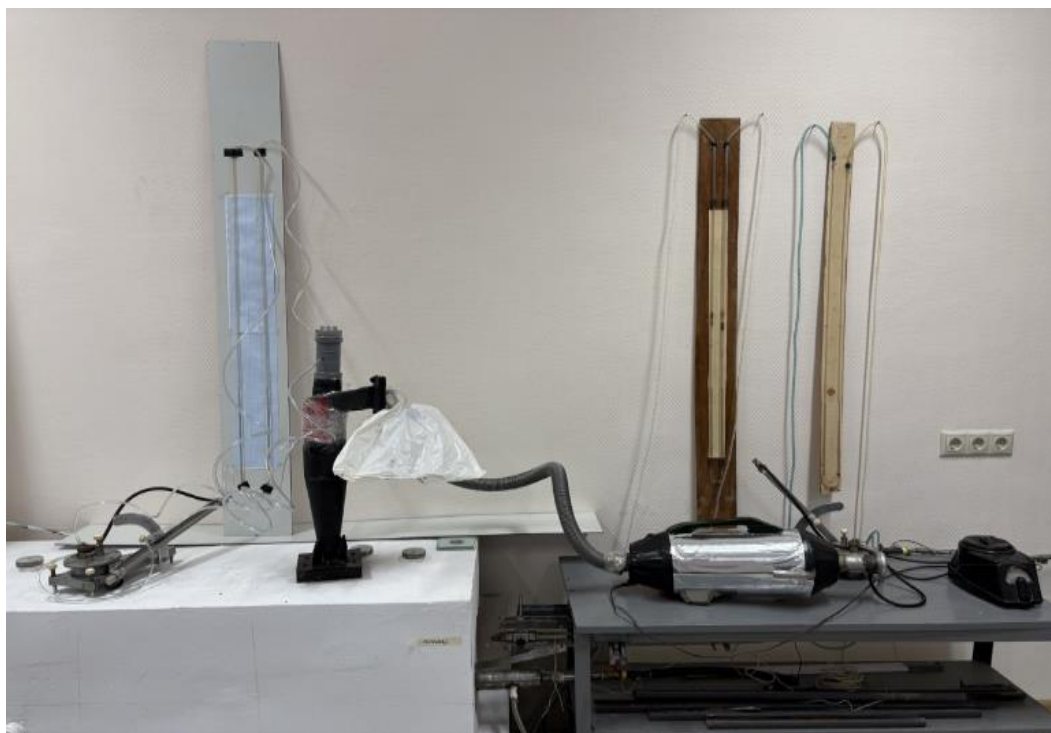


Рисунок 12. Схема экспериментальной установки для испытания циклонного фильтра диаметром 100 мм с базовой конструкцией циклона типа ЦН-11

В таблице 1 приведены характеристики потока в циклоне при проведении лабораторных измерений.

Таблица 1 – Характеристики потока в циклоне

№ измерений	Давление на коллекторе $P_{coll}$ , Па	Скорость на входе в коллектор, м/с	Расход на коллекторе, $m^3/c$	Скорость на входе в циклон	Разность полного и статического давления в т.6 циклона, Па	Скорость воздуха в т.6 циклона $V$ , м/с	Сопротивление циклона $\Delta P_{cycl}$ , Па
1	6,9	3,70	0,002	3,5	9,12±2,05	4,03 ±2,05	981
2	39,24	8,97	0,004	8,61	13,25±3,02	4,86±3,02	2150
3	58,86	10,65	0,005	10,45	19,62±2,2	5,92±2,2	3720
4	137,34	16,10	0,007	15,87	24,43±2,78	6,6±2,78	4930
5	235,44	20,90	0,010	20,74	25,51±2,90	6,75±2,90	5610
6	255,06	21,84	0,011	21,61	27,91±2,91	7,06±2,91	6750
7	458,06	30,06	0,014	28,62	32,43±2,74	7,61±2,74	7800

Результаты лабораторных замеров скорости потока в тестируемой точке циклона показали хорошее соответствие с данными, полученными в численном исследовании, при номинальном расходе, равном 28,6 м<sup>3</sup>/с на входе в циклон (рисунок 13). На расходах от половины номинального и ниже (при скорости 15,9 м/с и менее) скорость по численному исследованию также входит в интервал доверительной вероятности (6,6±2,78, 4,86±3,02, см. п.п. 4, 2 таблицы 1), а при минимальном расходе (при входной скорости 3,5 м/с) значения различаются вдвое, что может быть связано с нестабильностью реального потока внутри циклона, которая не учитывается в численной модели.

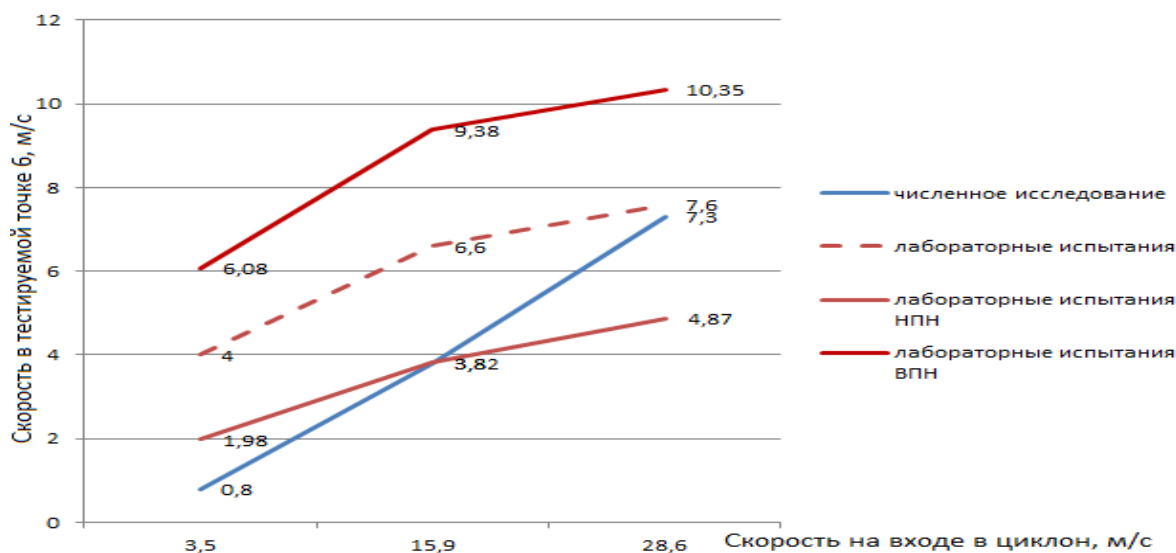


Рисунок 13. Скорости в тестируемой точке б в численном исследовании и лабораторных испытаниях

Результаты лабораторных замеров давления потока в тестируемой точке циклона показали хорошее соответствие с данными, полученными в численном исследовании, при минимальном расходе: при входной скорости 3,5 м/с получены

значения давления внутри циклона на входе в выхлопную трубу 1050 Па в численном эксперименте и 981 Па в лабораторном опыте, расхождение результатов численных и натуральных испытаний составляет 7%. В отличие от замеров скорости, при увеличении расхода расхождение в значениях давления в точке 6 возрастало. При номинальном расходе (при скорости на входе в циклон 28,62 м/с) значение давления в численном опыте составило 9500 Па, а в лабораторном эксперименте – 7800 Па (расхождение 22%). Среднее расхождение численного и лабораторного экспериментов составило 14,5%.

Проведена валидация результатов численных исследований на основе натурального эксперимента. Результаты лабораторных замеров скорости и давления потока в тестируемой точке циклона позволяют дать положительную оценку результатам валидации разработанной 3d-модели элемента типа «циклон-фильтр» для ВОУ.

**В шестой главе** проведена оценка экономической эффективности использования разработанного комплексного воздухоочистительного устройства на предприятиях Республики Татарстан. Применение усовершенствованного КВОУ в блоках очистки КС «Арская» ООО «Газпром трансгаз Казань» позволит значительно сэкономить топливный газ, экономия составит 993171 руб. Усовершенствованные ВОУ представляют собой важный элемент в системе очистки воздуха АО «Эссен продакшн АГ». В частности, затраты на техническое обслуживание и ремонт снижаются на 42600 руб. Рассчитан технико-экономический эффект от внедрения улучшенного КВОУ в предприятия Республики Татарстан, который составляет 1035771 руб. Расчетный срок окупаемости от внедрения усовершенствованного устройства составляет 3-4 года.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В результате проведенных исследований создан рациональный способ комбинированного численного моделирования условий работы и эффективного расположения циклонных и фильтрующих элементов для усовершенствования ВОУ с обеспечением очистки воздуха по классу F7 в газотранспортных, энергетических и промышленных компрессорных станциях систем вентиляции, теплоснабжения, газоснабжения.

Для достижения цели исследования были решены следующие задачи.

1. На основе критического анализа существующих способов численного исследования ВОУ в системах вентиляции, газо- и воздухоснабжения промышленных и энергетических объектов в газотранспортных, энергетических и промышленных компрессорных станциях установлено, что наиболее доступным путем сокращения ресурсозатратности численных исследований устройств с большим количеством очистных элементов для организаций с некрупными вычислительными центрами является использование комбинированного 2d-, 3d-моделирования методами CFD.

2. Проведено расчетное определение осаждения мелкодисперсных частиц классов PM<sub>2,5</sub> и PM<sub>10</sub> в воздухоочистительных устройствах с циклонными элементами диаметром 100 мм для газотранспортных, энергетических и

промышленных компрессорных станциях и системах вентиляции, теплоснабжения, газоснабжения. На основе расчетов найден оптимальный вариант размещения фильтра – на расстоянии 0,041 м от центра циклона, при котором для частиц класса  $PM_{10}$  достигается степень осаждения 99%.

3. Выполнены комбинированные (2d-, 3d-) численные исследования эффективного размещения циклонно-фильтрующих элементов в блочной (модульной) компоновке ВОУ, где эффективность очистки дисперсных выбросов в элементах составила 99,29%.

4. Разработаны алгоритм и рекомендации по выполнению комбинированных 2d- и 3d- исследований для совершенствования существующих и конструирования новых аппаратов типа ВОУ с большим числом очистных элементов, которые позволяют существенно понизить требуемую мощность вычислительного ресурса вследствие кардинального уменьшения объемов вычислений, а также в несколько (оценочно – до 7,5) раз уменьшить затраты машинного времени на выполнение исследования в целом.

5. Проведенная валидация результатов численных расчетов на натурной модели циклонного элемента диаметром 100 мм показала приемлемую точность разработанной численной модели элемента ВОУ типа «циклон-фильтр».

6. Рассчитан технико-экономический эффект от внедрения улучшенного КВОУ в предприятия Республики Татарстан, который составляет 1035771 руб., расчетный срок окупаемости от внедрения усовершенствованного устройства составляет 3-4 года.

**Рекомендации и перспективы по дальнейшему усовершенствованию разработки:**

В дальнейшем необходимы комбинированные 2d-, 3d- исследования, в соответствии с разработанными выше рекомендациями, оптимизации компоновки модулей циклонно-фильтрующих элементов с учетом мест их расположения в корпусе ВОУ с выделением модулей, размещенных в пристенной области, а также в передних и последующих рядах и созданием для них унифицированных блоков циклонно-фильтрующих элементов. Необходимы исследования по оптимизации конфигураций входных и выходных элементов ВОУ и их внутренних проходов для движения загрязненного и очищенного воздуха.

## **СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

**Публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных  
ВАК Минобрнауки РФ по специальности 2.1.3**

1. Беляева, Г.И., Зиганшин, М.Г. Численное моделирование двухфазных потоков в конструктивно сложных аппаратах очистки воздуха/ Г.И. Беляева, М.Г. Зиганшин//Надежность и безопасность энергетики.– 2025. – Т.18– № 2. – С.122-130. (вклад соискателя – 50%).

2. Беляева, Г.И., Горбунов, С.В., Зиганшин, М.Г. Комбинированное (2d - 3d) численное исследование эффективности воздухоочистительного устройства/ Г.И. Беляева, С.В. Горбунов, М.Г. Зиганшин//Надежность и безопасность

энергетики.– 2024. – Т. 17.– № 4. – С.299-305 (вклад соискателя – 33%).

3. Еремкин, А.И., Зиганшин, М.Г., Беляева, Г.И., Гимранов, И.Р. Разработка и инновационный менеджмент очистных технологий системы газоснабжения/ А.И. Еремкин, М.Г.Зиганшин, Г.И. Беляева, И.Р. Гимранов//Вестник ВолГАСУ. Сер.:Стр-во и архит.–2013.– Выпуск 31(50).Ч.2. Строительные науки.– С. 485-492 (вклад соискателя – 25%).

### **Публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ**

4. Беляева, Г.И., Зиганшин, М.Г. Уточнение размещения очистных элементов комплексного воздухоочистительного устройства для газотранспортных систем и энергогенерации на основе вычислительной гидродинамики/ Г.И. Беляева, М.Г. Зиганшин//Надежность и безопасность энергетики.–2021.–Т.14.– №3.– С. 134-141 (вклад соискателя – 50%).

5. Замалиева, А.Т., Беляева, Г.И., Зиганшин, М.Г. Исследование изменений аэродинамических свойств и энергоэффективности в циклонных аппаратах для очистки газа/А.Т. Замалиева, Г.И.Беляева, М.Г.Зиганшин//Территория Нефтегаз.– 2018.– №2.– С.114-119 (вклад соискателя – 33%).

6. Беляева, Г.И., Замалиева, А.Т. Исследование возвратно-поточного элемента мультициклона для очистки газа на газораспределительных станциях/ Г.И. Беляева, А.Т. Замалиева//Газовая промышленность.– 2017.– №6.– С. 118-122 (вклад соискателя – 50%).

7. Беляева, Г.И., Замалиева, А.Т. Исследование изменений аэродинамических свойств потока газа в батарейных циклонах/Г.И.Беляева, А.Т. Замалиева//Газовая промышленность.– 2017.– №7 (755).– С. 72-75 (вклад соискателя – 50%).

8. Замалиева, А.Т., Беляева, Г.И. Повышение энергоэффективности циклонных устройств для очистки выбросов в промышленности посредством натуральных и численных исследований/ А.Т. Замалиева, Г.И. Беляева//Территория нефтегаз.– 2017. №6.– С. 106-111 (вклад соискателя – 50%).

9. Замалиева, А.Т., Беляева, Г.И. Изменение аэродинамических свойств и эффективности в циклонных аппаратах посредством численных и натуральных исследований/А.Т. Замалиева, Г.И. Беляева// Вестник технологического университета.–2015.– Т.18.– №4– С. 134-137 (вклад соискателя – 50%).

### **Публикации в изданиях, индексируемых в международных реферативных базах Scopus и Web of Science:**

10. Belyaeva, G. I. Experimental and calculated testing of the efficiency of cyclone filtering devices / G. I. Belyaeva, A. T. Zamalieva, M. G. Ziganshin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : 5, 19 Mira Street, Ekaterinburg, 21–22 мая 2019 года. – 19 Mira Street, Ekaterinburg, 2020. – P. 012067(вклад соискателя – 33%).

11. Belyaeva, G. I. Experimental and numerical studies in elaboration the multi-cyclone with filter cells to processing of flue-gases of coal-fired and incineration power plants / G. I. Belyaeva, M. G. Ziganshin, R. D. Sukhov // IOP Conference Series: Earth

and Environmental Science, Kazan, 29 октября – 02 2018 года. Vol. 288. – Kazan: Institute of Physics Publishing, 2019. – P. 012077(вклад соискателя – 33%).

12. Belyaeva, G. I. Numerical and experimental studies of gas cleaning in multi-cyclone elements with filter inserts / G. I. Belyaeva, A. T. Zamalieva, M. G. Ziganshin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Ekaterinburg, 04–05 октября 2018 года. Vol. 481. – Ekaterinburg: Institute of Physics Publishing, 2019. – P. 012041(вклад соискателя – 33%).

### **Патенты**

13. Батарейный циклон с циклонными элементами «Циклон-фильтр»  
Беляева Г.И., Замалиева А.Т. Патент на полезную модель RU 190593 U1, 04.07.2019. Заявка № 2018101504 от 16.01.2018(вклад соискателя – 50 %).

14. Циклон-фильтр Беляева Г.И., Замалиева А.Т., Зиганшин М.Г. Патент на полезную модель 199050 U1, 11.08.2020. Заявка № 2019134772 от 29.10.2019(вклад соискателя – 33%).

### **Публикации трудов конференций, входящих в РИНЦ**

15. Беляева, Г. И., Зиганшин, М. Г. Численное исследование процессов в элементах с полуулиточным подводом батарейного циклона с вихревым потоком выбросов/Г. И. Беляева, М. Г. Зиганшин//Экологическая безопасность и устойчивое развитие урбанизированных территорий: Сборник докладов II Международной научно-практической конференции, Нижний Новгород, 23–25 апреля 2019 года.–2019. – С. 249-254(вклад соискателя – 50%).

16. Беляева, Г. И. Исследование характеристик двухфазного потока в мультициклоне методами CFD с целью энергоэффективной компоновки его элементов/Г. И. Беляева//Проблемы теплообмена и гидродинамики в энергомашиностроении: материалы докладов X школы-семинара молодых ученых и специалистов академика РАН В.Е. Алемасова.– 2016.– С.290-292 (вклад соискателя – 100%).

Подписано в печать 29.04.2026. Формат 60x84 1/16.  
Бумага офсетная. Печать ризографическая.  
Усл. печ. л. 1,25. Тираж 100. Заказ № 2704/1.

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