

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

На правах рукописи



**Беляева Гульназ Ильхамовна**

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

Специальность 2.1.3 – Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование  
воздуха, газоснабжение и освещение

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук, профессор  
Зиганшин Малик Гарифович

Казань – 2026

## Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1 Анализ существующих решений по совершенствованию методов очистки и фильтрации воздуха в системах теплогазоснабжения и вентиляции .....	14
1.1. Устройства с элементами, реализующими циклонную фильтрацию.....	14
1.1.1. Существующие схемы батарейной компоновки элементов, реализующих принципы циклонной фильтрации.....	21
1.1.2. Анализ конструктивных параметров аппаратов с групповой и батарейной компоновкой элементов .....	24
1.1.3. Преимущества и недостатки батарейных циклонов.....	25
1.2. Очистка воздуха в КВОУ, принципы работы.....	26
1.2.1. Существующие компоновки КВОУ.....	28
1.2.2. Преимущества и недостатки существующих КВОУ.....	33
1.3. Пористая фильтрация воздуха.....	40
1.3.1. Существующие виды пористых фильтров.....	41
1.3.2. Преимущества и недостатки пористой фильтрации.....	45
1.4. Исследования по совершенствованию воздухоочистительных устройств с использованием численных методов.....	46
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 1.....	52
ГЛАВА 2. РАСЧЕТЫ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЦИКЛОНОВ ПРИ ОСАЖДЕНИИ МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ В ВОЗДУХООЧИСТИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВАХ ГАЗОТРАНСПОРТНЫХ, ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ И ПРОМЫШЛЕННЫХ КОМПРЕССОРНЫХ СТАНЦИЯХ И СИСТЕМАХ ВЕНТИЛЯЦИИ, ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ, ГАЗОСНАБЖЕНИЯ.....	54
2.1. Исследование использования циклонов при осаждении мелкодисперсных частиц.....	54
2.2. Использование безразмерного параметра $Re_r$ с целью определения эффективности устройства фильтров в элементы блоков (модулей) воздухоочистительных устройств (ВОУ).....	56
2.3. Результаты подсчетов относительного числа Рейнольдса $Re_r$ для определения фракционных коэффициентов для очистки мелкодисперсных частиц .....	58
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2.....	60
ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЦИКЛОННОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ДЛЯ ВЕРИФИКАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	62
3.1. Используемые методы натуральных исследований аппаратов циклонной фильтрации запыленных потоков .....	62
3.2. Построение модели натуральных исследований, приборы и оборудование экспериментальной установки.....	63
3.3. Проведение натурального эксперимента.....	65

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3.....	66
ГЛАВА 4. КОМБИНИРОВАННОЕ ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОЧИСТКИ ДИСПЕРСНЫХ ВЫБРОСОВ В БЛОКАХ ЦИКЛОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ВОУ.....	68
4.1. Используемые методы численного эксперимента при сухой обработке запыленных выбросов.....	68
4.2. Схема комбинированного 2d-3d исследования перспективных способов совершенствования ВОУ газотранспортных, энергетических, промышленных компрессорных станций.....	77
4.3. Построение 2d- и 3d- геометрических моделей.....	80
4.4. Выбор и построение расчетной сетки 2d- и 3d- моделей.....	82
4.5. Устранение сеточных зависимостей 2d- и 3d- моделей.....	84
4.6. Постановка исходных и граничных условий для 2d- и 3d- моделей.....	84
4.7. Проведение численных исследований 2d- и 3d- геометрических моделей.....	85
4.8. Постпроцессинг. Обработка результатов численных исследований.....	109
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4.....	112
ГЛАВА 5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЦИКЛОННОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ДЛЯ ВАЛИДАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ЧИСЛЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	113
5.1. Построение модели натуральных исследований, приборы и оборудование экспериментальной установки.....	113
5.2. Проведение натурального эксперимента.....	115
5.3. Определение степени соответствия расчетной модели модулю ВОУ с элементами, реализующими принципы циклонной фильтрации.....	128
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 5.....	131
ГЛАВА 6 ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАЗРАБОТАННОГО КОМПЛЕКСНОГО ВОЗДУХООЧИСТИТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА НА ПРЕДПРИЯТИЯХ РЕСПУБЛИКИ ТАТАРСТАН.....	132
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 6.....	135
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	137
СПИСОК ИСТОЧНИКОВ ЛИТЕРАТУРЫ.....	140
Приложение А.1. Акт внедрения предложений по повышению эффективности осаждения мелкодисперсных частиц $PM_{10}$ , $PM_{2,5}$ в КВОУ КС ООО «Газпром трансгаз Казань».....	157
Приложение А.2. Акт внедрения предложений по повышению эффективности очистки газов на технологическом оборудовании АО «Эссен Продакшн АГ» от мелкодисперсных частиц классов $PM_{10}$ , $PM_{2,5}$ .....	165
Приложение А.3. Акт внедрения результатов исследования, использованных в учебном процессе студентов ФГБОУ ВО «КГЭУ».....	166

Приложение Б.1. Патент на полезную модель № 190593 «Батарейный циклон с циклонными элементами «циклон-фильтр».....	167
Приложение Б.2. Патент на полезную модель № 199050 «Циклон-фильтр».....	168
Приложение В.1 Рекомендации и по выполнению комбинированных 2d- и 3d- исследований для рационализации численных исследований с целью совершенствования существующих и конструирования новых аппаратов типа ВОУ с большим числом очистных элементов.....	169
Приложение В.2 Алгоритм по выполнению комбинированных 2d- и 3d- исследований для рационализации численных исследований с целью совершенствования существующих и конструирования новых аппаратов типа ВОУ с большим числом очистных элементов.....	174
Приложение Г Тарировка трубки Пито по показаниям термоанемометра Testo 425.....	175

## **ВВЕДЕНИЕ**

### **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 [1-6].

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  $CO_2$  при энергогенерации [7-10]. На особую актуальность этого вопроса указывает постоянное внимание руководства страны, что подтверждает ряд директивных документов Президента [11-12] и Правительства РФ [13-16].

#### **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 воздухоснабжения промышленных и энергетических объектов в газотранспортных, энергетических и промышленных компрессорных станциях.

2. Расчетное определение осаждения мелкодисперсных частиц классов  $PM_{2,5}$  и  $PM_{10}$  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 воздуховоснабжения 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 воздухоочистительных 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» (акт внедрения приведен в приложении А.1), для проектирования ВОУ на объектах АО «Эссен Продакшн АГ» (акт внедрения приведен в приложении А.2), а также используются в учебном процессе студентов ФГБОУ ВО «КГЭУ» (акт внедрения приведен в приложении А.3).

### **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» (Приложение Б.1) и «Циклон-фильтр» (Приложение Б.2).

### **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.

# ГЛАВА 1 АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ РЕШЕНИЙ ПО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ МЕТОДОВ ОЧИСТКИ И ФИЛЬТРАЦИИ ВОЗДУХА В СИСТЕМАХ ТЕПЛОГАЗОСНАБЖЕНИЯ И ВЕНТИЛЯЦИИ

## 1.1. Устройства с элементами, реализующими циклонную фильтрацию

Современные технологии систем пылеочистки существенно уменьшают выбросы пыли. Это обусловлено повторным использованием уловленной пыли, упрощением очистки воздуха, повышением надёжности аспирационных систем. Комплексный подход к совершенствованию процессов приводит к повышению эффективности очистки и снижению загрязнения окружающей среды [17].

Мультициклоны представляют собой одни из самых популярных устройств в области пылеочистой техники. Их распространённость объясняется множеством факторов, включая простоту конструкции, надёжность в эксплуатации и невысокие капитальные и эксплуатационные расходы. Эти устройства находят применение во всех отраслях промышленности, в энергетике, строительстве, сельском хозяйстве, когда необходимо очищать большие объёмы газовых потоков от взвешенных частиц. Принцип работы мультициклонов основан на одновременной работе большого количества циклонов, в каждом из которых происходит вращательное движение потока аэрозоля, в процессе которого за счёт инерционного осаждения осуществляется сепарация взвешенных частиц. Это означает, что частицы, находящиеся в потоке, под действием инерционных сил отклоняются от своего первоначального направления и осаждаются на стенках устройства [18]. Осажденные частицы опускаются по стенкам в бункер. Эффективность данного процесса во многом зависит от соотношения сил инерции и сопротивления, действующих на частицы, что в свою очередь связано с характеристиками газового потока и взвешенных в нем частиц, а также с конструктивными параметрами циклонных элементов. Конструктивные параметры аппарата, такие как форма, размеры и углы наклона входных и выходных патрубков играют ключевую роль в процессе очистки. Эти параметры

должны быть тщательно подобраны в зависимости от размера сепарируемых частиц. Мультициклоны, как правило, предназначены для эффективного осаждения взвешенных частиц среднего (от 10 мкм) и крупного размера, что делает их особенно полезными для первичной обработки выбросов, например, в дымовых газах промышленных и энергетических установок [19]. Важным аспектом работы мультициклонов является их высокая пропускная способность, что позволяет обрабатывать большие объемы воздуха за короткое время. Это делает их незаменимыми в условиях, где требуется быстрое и эффективное удаление загрязняющих веществ. Современные технологии численного моделирования позволяют улучшать характеристики циклонных элементов, что способствует повышению эффективности и долговечности. В условиях современных экологических требований и стандартов применение очистных устройств является обязательным, что способствует их дальнейшему развитию и совершенствованию [20]. Таким образом, мультициклоны представляют собой важный инструмент в борьбе с загрязнением воздуха.

Основная конструкция мультициклона состоит из нескольких циклонных элементов, которые работают параллельно и объединены в один общий корпус. Это позволяет значительно увеличить производительность устройства и улучшить его эффективность. Когда запыленный газ поступает в мультициклон, он сначала попадает в газораспределительную камеру. Эта камера ограничена трубными решетками, в которых установлены циклонные элементы. Для обеспечения оптимальной работы всего устройства газ из газораспределительной камеры должен равномерно распределяться по всем циклонным элементам. Внутри каждого элемента поток запыленного газа движется по спирали вниз вдоль внутренней поверхности стенок циклона. Это движение создается благодаря специальной конструкции и геометрии элемента. Более тяжелые частицы пыли, находясь под воздействием сил инерции, начинают двигаться поперек направления потока газа быстрее, чем менее тяжелые частицы газа. В результате этого процесса частицы пыли концентрируются в слоях газа, которые находятся ближе к стенкам циклона. Когда пыль достигает стенок, она оседает и

скапливается в пылесборнике, который расположен в нижней части устройства. В возвратно-поточных конструкциях циклонных элементов, которые приняты в дальнейшем в качестве основной конструкции для численного моделирования вследствие их большей эффективности по осаждению частиц, очищенный газ меняет направление своего движения, поднимается вверх по спирали и выходит через центральную выхлопную трубу [21], что также отмечено в ходе натурального эксперимента - выявлен спиральный след, оставляемый потоком на выходе, что указывает на сохранение прецессии потока в выхлопной трубе. Это сложное движение позволяет эффективно отделять от газа твердые частицы крупных (10 мкм и более) размеров, обеспечивая их высокую степень очистки, однако точного теоретического описания такого движения нет.

Корпус мультициклона, как правило, проектируется с секционной структурой, что позволяет поддерживать оптимальную скорость движения газов в циклонных элементах даже при изменяющихся нагрузках. Это достигается за счет возможности отключения отдельных секций, что помогает адаптироваться к различным условиям работы. Секционирование корпуса не только способствует поддержанию эффективности работы устройства, но и минимизирует риск ухудшения степени очистки газов [22]. Это связано с тем, что в процессе работы может происходить переток газов между различными элементами через пылевой бункер. Такой переток может быть вызван различиями в гидравлическом сопротивлении, которые возникают из-за неоднородности изготовления отдельных циклонов, а также из-за неравномерного распределения газового потока по элементам. Неодинаковая «пылевая нагрузка» на элементы также играет важную роль в процессе очистки. Каждый элемент может обрабатывать разное количество загрязняющих частиц в зависимости от ряда факторов, включая его конструкцию, материалы, из которых он изготовлен, и условия эксплуатации. Это может привести к тому, что некоторые циклоны будут работать менее эффективно, чем другие, что, в свою очередь, негативно скажется на общей эффективности системы. Кроме того, секционирование позволяет более точно контролировать процессы, происходящие в каждом конкретном элементе.

Мультициклоны представляют собой важный элемент в системах пылеуловления и очистки газов, и могут быть сконструированы как из возвратно-поточных, так и из прямопоточных циклонных элементов. Эти устройства играют ключевую роль в промышленных процессах, где требуется эффективное отделение твердых частиц от газовых потоков. В частности, возвратно-поточные циклонные элементы отечественного производства используют различные конструкции направляющих аппаратов для закрутки газов, что существенно влияет на их производительность и эффективность очистки [23]. Ввод воздуха в циклонные элементы может быть осевым или тангенциальным. Для тангенциального ввода используются укороченные улитки, а закрутка потока при осевом вводе осуществляется специальными направляющими конструктивными элементами двух типов. Первый из них — это направляющий аппарат типа «винт», который имеет две винтовые лопасти, наклоненные под углом  $25^\circ$ . Этот тип устройства отличается своей конструкцией, которая минимизирует вероятность забивания золой или пылью, что делает его более надежным для длительной эксплуатации. Однако, несмотря на свои преимущества в плане устойчивости к загрязнениям, аппарат типа «винт» обеспечивает меньшую степень очистки по сравнению с другим типом аппарата. Вторым типом направляющего аппарата — это аппарат типа «розетка», который может иметь восемь лопаток, также наклоненных под углом  $25^\circ$  или  $30^\circ$ . Эти аппараты отличаются более высокой эффективностью в процессе очистки, так как они способны улавливать более мелкие частицы. Однако, их конструкция может быть более восприимчива к забиванию, особенно при наличии высоких концентраций твердых частиц в газовом потоке. Важно отметить, что направляющий аппарат типа «розетка» с безударным входом демонстрирует аналогичную степень очистки, как и традиционный аппарат, но при этом обладает меньшим коэффициентом гидравлического сопротивления. Это делает его более предпочтительным выбором в ситуациях, когда необходимо оптимизировать расход энергии и повысить эффективность работы системы. Таким образом, выбор между направляющими аппаратами типа «винт» и «розетка» зависит от

конкретных условий эксплуатации и требований к степени очистки (рисунок 1.1). В современных условиях, где требования к чистоте выбросов становятся все более строгими, использование высокоэффективных циклонов становится особенно актуальным [24]. Совершенствование технологий и материалов, применяемых в конструкции этих аппаратов, открывает новые горизонты для повышения их эффективности и надежности в различных промышленных процессах.

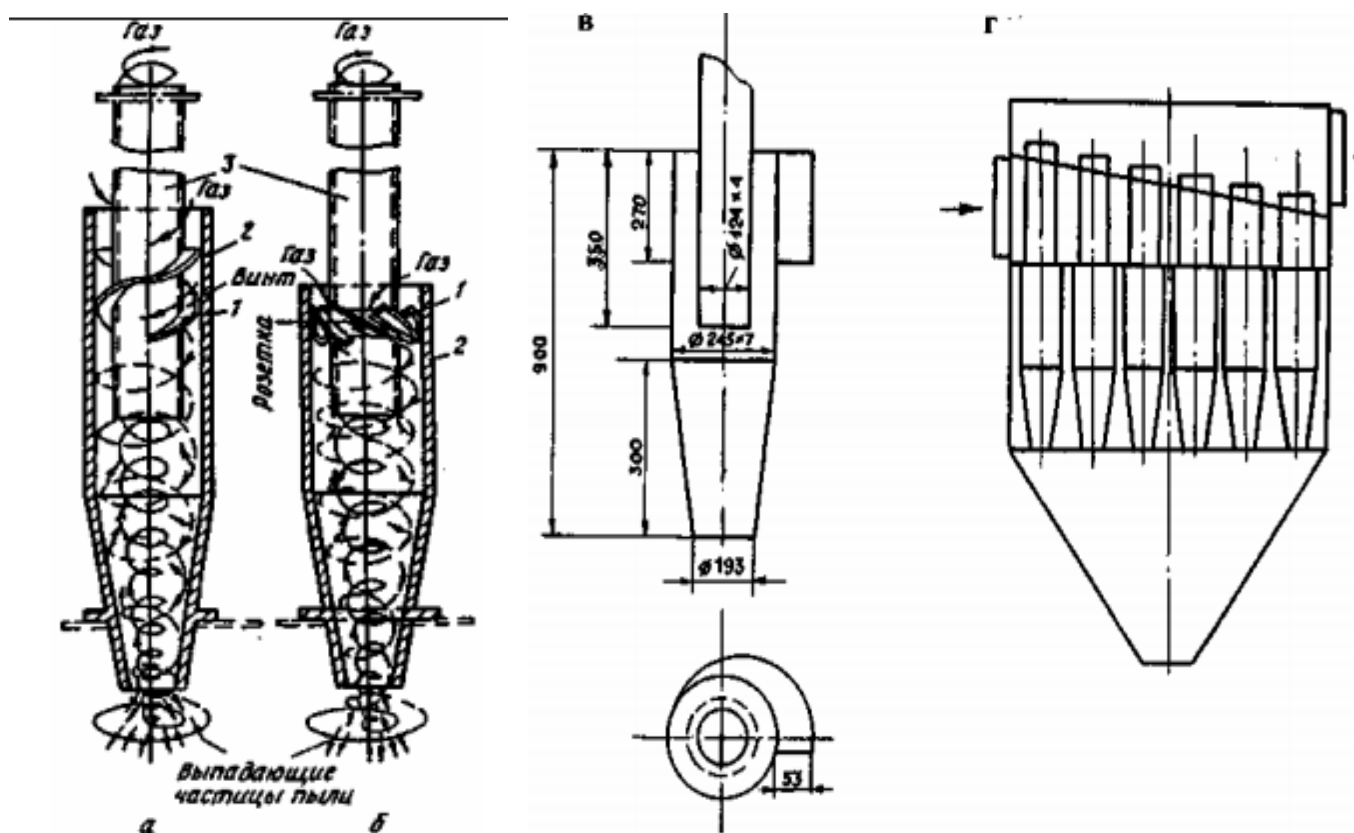


Рисунок 1.1 Циклонные элементы мультициклона:

а – с направляющим аппаратом типа «винт»; б – с направляющим аппаратом типа «розетка»; в – вход через укороченные улитки; г – четырехзаходный улиточный вход [24]

Исследователи изучают методы и технологии для повышения эффективности циклонов, которые отделяют пыль из воздуха. Хотя были попытки изменить конструкции, большинство из них не дает желаемых результатов и

увеличивает сопротивление, что снижает степень улавливания пыли. Циклонный эффект работает в широком диапазоне скоростей. При входе запыленного воздуха в циклон создается вихрь, в котором взвешенные частицы стремятся к стенкам циклона. Для улучшения работы исследуются изменения геометрии циклона специальными вставками и новые материалы. Спиральные вставки помогают создать более стабильный вихрь. Угол наклона лопаток в  $25^\circ$  повышает коэффициент очистки газа, но также увеличивает гидравлическое сопротивление, что может повышать энергозатраты. Мультициклоны обычно менее эффективны, чем одиночные, из-за зазоров, которые приводят к обратному потоку газа. Исследования элементов мультициклонов с полуулиточным подводом газа показали, что степень очистки газов в таких циклонных системах оказывается выше по сравнению с традиционными моделями с «розетками». Это связано с тем, что полуулиточные конструкции обеспечивают более равномерное распределение потока газа, что способствует лучшему улавливанию частиц и снижению потерь давления. В результате, такие циклоны становятся более предпочтительными для применения в промышленных условиях, где требуется высокая степень очистки газов. Кроме того, стоит отметить, что современные технологии численных 3d- исследований позволяют улучшать и оптимизировать конструкции одиночных циклонов [25-35], тогда как 3d- исследований по оптимизации конструктивных параметров блоков циклонов, в том числе отдельных мультициклонов, в доступной литературе обнаружить не удалось.

В данной работе рассматривается задача оптимального расположения циклонных элементов с полуулиточными входными патрубками в блоке. Это важный аспект проектирования мультициклонов и модулей ВОУ, так как правильная компоновка элементов может существенно повлиять на эффективность работы устройства. На рисунке 1.2 представлена одна из возможных конфигураций мультициклона (ЦБ-16), состоящего из шестнадцати циклонных элементов. В первой линии расположены одиночные циклоны, которые имеют самые длинные выходные трубы. Это решение позволяет добиться лучшего потока газа, но в то же время приводит к тому, что расстояние

от входного отверстия мультициклона до этих циклонов остается коротким. Это может быть полезно для уменьшения потерь давления на входе.

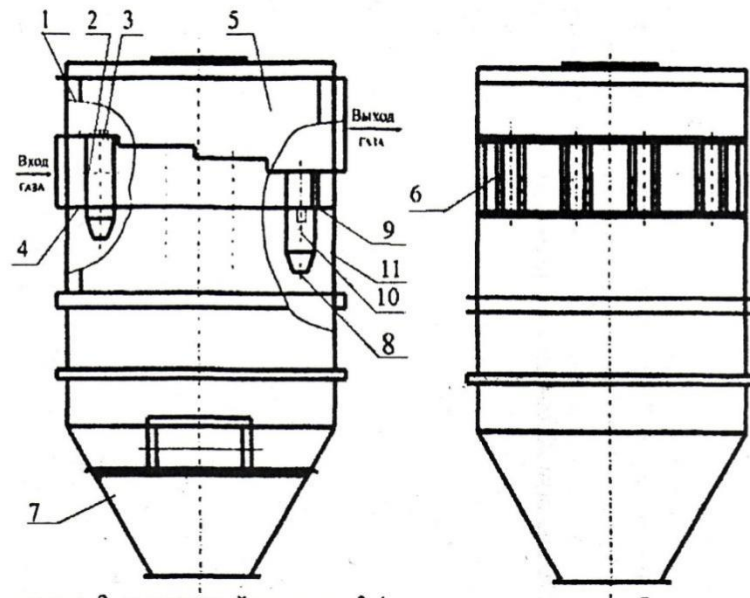


Рисунок 1.2. Схема мультициклона ЦБ-16 [37]

1 – сварной корпус, 2 –циклонные элементы с полуулиточным подводом газа, 3 – верхняя трубная доска, 4 – нижняя трубная доска, 5 – верхняя камера очищенных газов, 6 – средняя камера запыленных газов, 7 – нижняя камера запыленных газов – бункер сбора пыли, 8 – полые цилиндрические корпуса с конусной частью внизу, 9 – входные патрубки с аппаратами закручивания (полуулитками), 10 – выхлопные патрубки внутри циклонных элементов, 11 – задняя стенка

В отличие от этого, циклоны, расположенные в последнем ряду, имеют короткие выходные трубы, но находятся на большем расстоянии от входного отверстия. Такой подход позволяет уравновесить давление в системе. Эта компоновка способствует уменьшению размеров входного отверстия мультициклона, что, в свою очередь, приводит к выравниванию падения давления по всем элементам. Уравновешивание перепадов давления является ключевым фактором, поскольку оно снижает вероятность перебросов пыли между элементами, что может негативно сказаться на производительности всего

мультициклона. В результате, такая архитектура обеспечивает более стабильную и предсказуемую работу устройства, что особенно важно в промышленных условиях, где колебания в производительности могут привести к значительным потерям [37].

### 1.1.1. Существующие схемы блочной (батарейной) компоновки циклонных элементов воздухоочистительных устройств

В батарейных циклонах с элементами, работающими на принципах инерционной сепарации и гравитации, запыленный газовый поток поступает в общий входной патрубок, равномерно распределяясь между отдельными циклонами. Каждый циклон представляет собой цилиндроконическую камеру, в которую поток поступает через тангенциальный вход – улитку или винтовую розетку (рисунок 1.3).

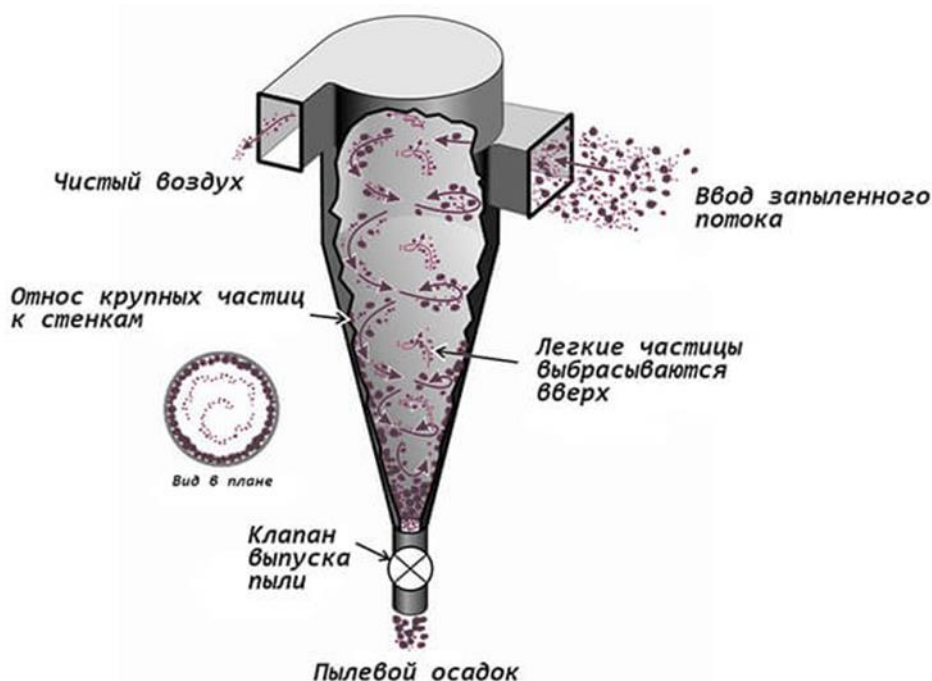


Рисунок 1.3. Элемент мультициклона с полуулиточным подводом газа [39]

Форма и геометрические параметры этих входных устройств рассчитаны для создания вращательного движения газового потока с оптимальной скоростью.

Угол наклона лопаток в винтовой розетке, как правило, варьируется от 25 до 30 градусов, обеспечивая эффективное закручивание потока и максимизацию сил инерции. Этот угол может быть оптимизирован в зависимости от размера и плотности частиц, подлежащих удалению. Сила инерции, возникающая при вращении потока, отбрасывает твердые частицы (пыль, золу, сажу и т.д.) к стенкам циклона. Более крупные и тяжелые частицы осаждаются быстрее, чем мелкие. Скорость осаждения также зависит от вязкости газа и размера циклона. Внутренние стенки циклона имеют специально разработанную поверхность, которая способствует лучшему осаждению частиц и предотвращает повторное увлечение их в газовый поток. Наличие ребристости или шероховатости на стенках увеличивает эффективность осаждения. После того, как частицы достигают стенок, они под действием гравитации и нисходящего потока воздуха скользят вниз в коническую часть циклона, а затем в общий бункер для сбора отходов. Очищенный газ, потерявший значительную часть взвешенных частиц, меняет направление своего движения в нижней части циклона, поднимаясь вверх по центральной трубе и выходя через верхний патрубок. Важной характеристикой батарейного циклона является его конструкция, позволяющая осуществлять непрерывную или периодическую выгрузку собранного осадка. Выбор системы выгрузки зависит от типа и количества осадка, а также от требований к автоматизации процесса [38].

Конструктивные особенности батарейных циклонов позволяют оптимизировать гидравлическое сопротивление. Правильный выбор диаметра и длины каждой ячейки, а также оптимальное расположение входных и выходных патрубков минимизируют потери давления в системе. Это особенно важно при обработке больших объемов газа, где небольшое снижение сопротивления может обеспечить заметную энергоэффективность. Также стоит отметить, что конструкция батарейного циклона позволяет более эффективно удалять собранную пыль [40]. В некоторых моделях предусмотрена автоматическая система очистки, например, с использованием системы обратной продувки сжатым воздухом или вибрационных механизмов. Материалы изготовления ячеек

также могут варьироваться в зависимости от агрессивности среды, от обычной стали до коррозионно-стойких сплавов или полимеров. Наконец, важным фактором является возможность модульного исполнения. При необходимости увеличить производительность, достаточно добавить новые секции к существующей установке, что делает батарейные вихревые сепараторы экономически выгодным решением, особенно при проектировании масштабируемых производственных процессов [41].

При разработке батарейных циклонов важным аспектом является контроль за обратным подсосом среды из бункера, что непосредственно влияет на эффективность работы устройства. В частности, исследования показывают, что даже небольшой процент подсасываемого воздуха может значительно снизить коэффициент полезного действия (КПД) мультициклона. Например, каждый процент подсосанного воздуха может уменьшать КПД до 4%, что является весьма значительным показателем. Это связано с тем, что обратный подсос приводит к нарушению оптимального потока воздуха и частиц, что, в свою очередь, снижает эффективность отделения твердых частиц от газов. В результате, в процессе работы мультициклона происходит увеличение нагрузки на фильтры и другие элементы системы, что может привести к их быстрому износу и необходимости частого обслуживания [42].

Важно также отметить, что в батарейных циклонах несколько секций работают совместно, и их эффективность взаимосвязана. Если одна из секций имеет отклонения от заданной формы или поверхности, это может негативно сказаться на общей производительности всей установки. В результате, даже небольшие недостатки могут привести к значительным потерям в эффективности процесса очистки [42].

Равномерное распределение входящей среды между всеми сепараторами играет ключевую роль в эффективности работы систем пыле- и золоочистки. Для достижения этого критически важного параметра входная камера в крупных установках часто проектируется в «клинообразной» форме. Это позволяет более равномерно распределить поток газа или воздуха, что, в свою очередь,

способствует лучшему отделению частиц пыли и золы. Визуально это можно представить как конструкцию, где широкая часть камеры принимает поток, а сужающаяся часть направляет его к сепараторам, тем самым минимизируя образование «мертвых зон» и обеспечивая оптимальные условия для фильтрации [43]. В случаях, когда количество циклонов составляет 2, 4 или 6, конструкция пыле- или золоочистной установки может быть более простой. Такие системы могут представлять собой технологическое соединение индивидуальных «традиционных» фильтров, которые могут быть соединены как последовательно, так и параллельно. Это дает возможность гибко подходить к проектированию и адаптировать систему под конкретные условия эксплуатации [43].

### 1.1.2. Анализ конструктивных параметров аппаратов с групповой и батарейной компоновкой элементов

Процесс осаждения пыли в элементах батарейных циклонов происходит аналогично тому, как это происходит в стандартных циклонных установках [40]. В батарейных циклонах чаще всего используются элементы с диаметром 100, 150 или 250 мм (рисунок 1.4).

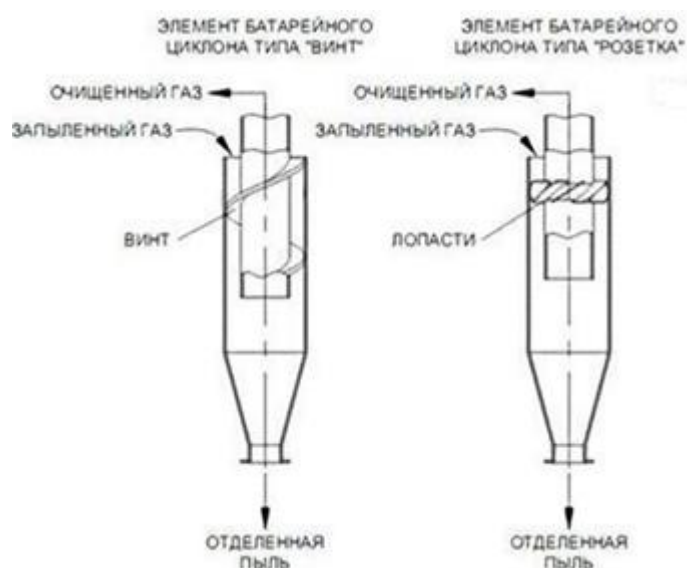


Рисунок 1.4. Элементы мультициклона типа «винт» и «розетка» [40]

Это позволяет достигать значительных скоростей запыленного газа, которые могут достигать около 4 м/с. Высокая скорость газа в сочетании с эффективной конструкцией гарантирует высокий уровень осаждения пыли, что делает эти устройства весьма эффективными для очистки.

Элементы с полуулиточным подводом обладают герметичностью в узле ввода газов. Эта герметичность позволяет минимизировать утечки и обеспечивает более эффективное взаимодействие газов с очистным оборудованием.

Степень очистки газовых смесей в циклонах может достигать 96-99% при наличии частиц размером 20 мкм, 70-95% для частиц размером 10 мкм и 30-85% для частиц диаметром 5 мкм [44].

### **1.1.3. Преимущества и недостатки батарейных циклонов**

Главные достоинства батарейных циклонов это отсутствие движущихся частей, что делает их надежными и снижает расходы на обслуживание. Они могут работать при температурах до 500 °С, а также улавливают пыль в сухом виде, упрощая утилизацию. Работа циклонов также возможна при высоких давлениях, что расширяет их область применения. Устройства сохраняют стабильную величину гидравлического сопротивления, что позволяет эффективно управлять потоками воздуха и пыли, обеспечивая тем самым высокую производительность. Простота изготовления и возможность ремонта делают батарейные циклоны доступными для большинства производств, где требуется пылеудаление.

Наконец, стоит отметить, что увеличение концентрации пыли в потоке не приводит к снижению фракционной эффективности этих аппаратов. Это означает, что они способны поддерживать высокую степень очистки даже при изменениях в условиях работы [45].

Однако, у батарейных циклонов есть недостатки. Их эффективность снижается при очистке газов с мелкими твердыми частицами, что делает их менее полезными в таких случаях. Чаще всего их используют для предварительной

очистки перед высокоэффективными системами. Циклоны устраняют крупные частицы, облегчая нагрузку на последующие фильтры.

Для тонкой очистки требуются дополнительные фильтры, и процесс фильтрации сложен из-за изменения структуры фильтров. Исследования в этой области направлены на улучшение методов очистки и снижение энергозатрат. Для достижения необходимого уровня очистки могут потребоваться неприемлемо высокие энергозатраты, что делает такие решения экономически нецелесообразными. Поэтому на этапе тонкой очистки за циклонными системами обязательно устанавливаются дополнительные фильтрующие аппараты, которые способны улавливать оставшиеся мелкие частицы. Современные исследования в области очистки газов направлены на поиск более эффективных методов и технологий, которые позволят улучшить показатели очистки и снизить энергозатраты [46].

## **1.2. Очистка воздуха в КВОУ, принципы работы**

С развитием газотурбостроения значительно улучшились технико-экономические характеристики газотурбинных установок, что стало причиной их широкого внедрения на предприятиях ТЭК за последние годы. Газотурбинные установки, благодаря своей высокой эффективности и надежности, стали основным выбором для многих энергетических компаний [47]. Важным элементом инфраструктуры ГТУ является комплексное воздухоочистительное устройство (КВОУ), которое обеспечивает поступление очищенного и подготовленного атмосферного воздуха в газотурбинные установки и газоперекачивающие агрегаты. КВОУ играет ключевую роль в защите компонентов газотурбинных установок от негативного воздействия внешней среды. Оно исключает эрозионный износ лопаточного аппарата, что особенно важно, поскольку лопатки турбин подвержены высоким механическим и термическим нагрузкам [48]. Загрязнение проточных частей компрессоров и турбин может привести к снижению их производительности и увеличению затрат

на техническое обслуживание. Таким образом, применение КВОУ не только повышает надежность работы высокоэффективных газотурбинных двигателей, но и способствует снижению топливно-энергетических затрат, что в свою очередь улучшает среднеэксплуатационную эффективность двигателей. Система очистки воздуха в составе КВОУ (рисунок 1.5) включает себя: жалюзийный сепаратор, установленный перед блоками фильтрации I и II ступеней и шумоглушитель. Жалюзи предохраняют воздушный тракт от попадания осадков и посторонних предметов. В качестве первой ступени очистки в зависимости от требований к качеству фильтрации могут быть инерционно-циклонными, накопительными (фильтрами грубой и тонкой очистки), в качестве второй ступени используются фильтры тонкой очистки (классом фильтрации воздуха Е7).

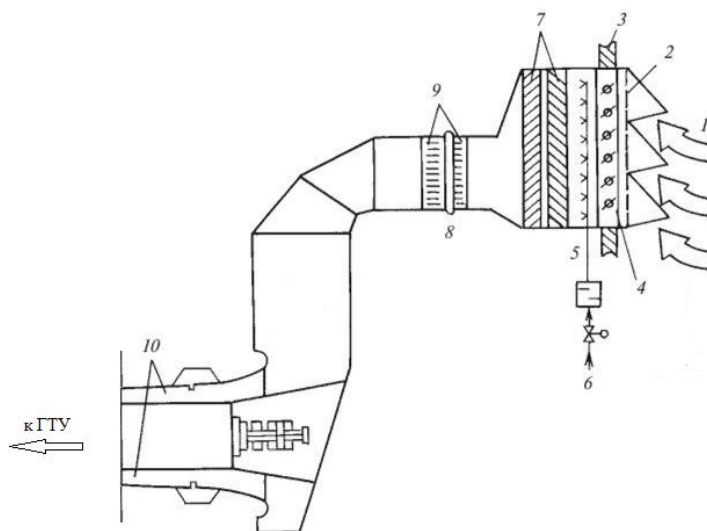


Рисунок 1.5. Схема основных элементов КВОУ: 1 — забор атмосферного воздуха; 2 — спрямляющая решетка; 3 — стена сооружения; 4 — жалюзи; 5 — антиобледенительное устройство; 6 — горячий воздух, забираемый за компрессором; 7 — очистка воздуха на I и II ступенях; 8 — компенсатор воздуховода; 9 — шумоглушители; 10 — проточная часть компрессора [48]

Кроме того, КВОУ выполняет несколько дополнительных функций, которые делают его незаменимым в современных газотурбинных системах. Оно

защищает оборудование от попадания крупных предметов, а также от пыли, что особенно актуально в условиях загрязненной окружающей среды [49]. Важной характеристикой КВОУ является его функция влагоотделения, что предотвращает образование конденсата внутри системы и снижает риск коррозии. В КВОУ в зимний период воздух подогревается за счёт теплоносителя, подаваемого в теплообменники, чтобы избежать замерзания и обледенения компонентов установки. Летнее охлаждение воздуха происходит за счет подачи в теплообменники хладагента и также является важной функцией, поскольку это позволяет поддерживать оптимальные условия работы газотурбинных установок в жаркую погоду [50]. Дополнительно, КВОУ может включать в себя шумоглушающие элементы, что способствует снижению уровня шума, создаваемого работающими установками, что важно для соблюдения экологических норм и повышения комфортности вблизи промышленных объектов. В данной работе изучение шумовых характеристик КВОУ не входит в цель и задачи исследования (источник шума – не элементы, а вентилятор). КВОУ имеют большие размеры, изучалась возможность их уменьшения, и блок шумоглушения рассматривался как элемент, который возможно исключить, например, заменой типов вентиляторов. Таким образом, комплексное воздухоочистительное устройство не только улучшает эксплуатационные характеристики газотурбинных установок, но и в значительной степени повышает их долговечность и эффективность, что делает их важным элементом в современном газотурбостроении и энергогенерации. Внедрение КВОУ позволяет оптимизировать работу установок, что в свою очередь способствует более устойчивому и экономичному производству энергии, отвечая современным требованиям к экологической безопасности и надежности [50].

### **1.2.1. Существующие компоновки КВОУ**

Выбор рационального конструктивного исполнения систем КВОУ во многом зависит от условий их эксплуатации, а также от требований к качеству

очищаемого воздуха. КВОУ можно классифицировать на два основных типа: статические и импульсные. Статические системы характеризуются тем, что фильтрующие элементы не очищаются от накопленной пыли, что делает их более простыми в конструкции и эксплуатации. Импульсные системы, в свою очередь, используют кратковременные обратные импульсы сжатого воздуха для очистки фильтров от пыли, что позволяет поддерживать их эффективность на более высоком уровне [51]. Наиболее распространены статические КВОУ, которые демонстрируют высокие технико-экономические показатели в различных условиях эксплуатации. Однако импульсные системы находят свое применение в тех регионах, где наблюдается высокая пылевая нагрузка или низкие температуры, что требует особого подхода к организации очистки воздуха. Например, в промышленных зонах с интенсивным движением и строительством, где уровень пыли может значительно превышать допустимые нормы, импульсные системы могут быть более эффективными. Содержание пыли в приземном слое атмосферы, как известно, значительно зависит от высоты забора воздуха. Исследования показывают, что с увеличением высоты на каждые 3 метра содержание пыли снижается примерно в 2 раза. На высоте более 6 метров концентрация пыли становится значительно ниже, что делает такие уровни забора воздуха предпочтительными для установки КВОУ.

Из-за отсутствия точных данных о пыли на больших высотах (нестабильность воздушных потоков), к КВОУ предъявляются высокие требования по очистке воздуха (минимум 99,5-99,7% по ГОСТ Р ЕН 779-2014[52]). Современные системы фильтрации должны соответствовать этим стандартам, требуя постоянного совершенствования. Эффективность КВОУ также зависит от места установки, учитывающего источники загрязнения, ветер и климат. Выбор КВОУ должен основываться на комплексном анализе условий эксплуатации, требований к качеству воздуха и особенностей окружающей среды.

В КВОУ очистка воздуха происходит в несколько этапов: грубая (мультициклоны для крупных частиц) и тонкая (сменные карманные/рукавные фильтры для мелких частиц). В 1990-х ЗАО «Мультифильтр» (при участии ОАО

«Газпром» и под руководством ОАО «Кировский завод») разработало КВОУ для ГПА-16 «Нева» с многоступенчатой очисткой [53]. Воздух поступает через всепогодные козырьки, защищающие фильтры. Первая ступень – мультициклоны с системой отсоса пыли, вторая – карманные фильтры для дополнительной очистки (рисунок 1.6).



Рисунок 1.6. КВОУ для газоперекачивающего агрегата ГПА-16 «Нева». Первая ступень – прямоточные мультициклоны, вторая ступень – карманные фильтры.

1990-е годы, ОАО «ВНИИтрансмаш» [54]

Разработка мультициклона базировалась на протестированном прямоточном осевом циклонном принципе. Обширные испытания на пылевом стенде (до 20 000 м<sup>3</sup>/ч) с использованием инструментальных измерений позволили получить рекомендации по оптимизации, значительно повысив эффективность и надежность системы очистки [54].

В современном мире активно используется высокоэффективная технология пылеудаления, основанная на картриджных фильтрах с автоматизированной импульсной системой самоочистки. Эта система позволяет значительно повысить эффективность работы оборудования, обеспечивая надежное удаление пыли и загрязняющих веществ из воздуха (рисунок 1.7).



Рисунок. 1.7. Современное КВОУ по технологии Donaldson на основе картриджных фильтрующих элементов с очисткой обратным импульсом сжатого воздуха [55]

Современные КВОУ используют разные фильтры (статические, импульсные, круглые, панельные) [55]. Панельные фильтры наиболее компактны и эффективны. Выбор конструкции КВОУ зависит от условий эксплуатации и режима работы фильтра (статический или импульсный с самоочисткой).

Отдельно стоит отметить КВОУ морского применения, которые требуют специальных фильтров, устойчивых к соленой воде и продуктам сгорания. Производители разрабатывают уникальные испытательные стенды и используют коррозионностойкие материалы в оригинальных конструкциях фильтров. Компоновка КВОУ может быть низко- или высокоскоростной. Разработка таких систем требует высокой квалификации для решения специфических задач морской отрасли [56].

Статическое КВОУ включает: воздухозаборные козырьки; влагоотделители; ступень предварительной фильтрации; ступень фильтров тонкой очистки; ступень (высоко)эффективных (Н)ЕРА фильтров.

Ступень предварительной фильтрации играет важную роль в системе очистки воздуха, обеспечивая защиту более тонких фильтров от избыточной пылевой нагрузки. Предварительные фильтры класса G4 защищают фильтры

тонкой очистки (F7-F9) от крупных частиц пыли, продлевая срок их службы. Доступны в различных конструкциях (круглые картриджи, компактные элементы) для адаптации к разным системам.

Фильтры тонкой очистки бывают статическими (постоянный поток воздуха) и импульсными (периодические всплески для очистки). Более высокую степень фильтрации обеспечивают (H)EPA фильтры (классы E10, E12, H14 по EN 1822:2009), критически важные для газовых турбин. (H)EPA фильтры оптимизируют работу турбины, увеличивают срок службы и снижают затраты. Решение об их установке принимает производитель турбины. На международном рынке (H)EPA фильтрация предлагается как опция для новых и модернизируемых систем.

В 2009-2014 гг. ЗАО «Мультифильтр» разрабатывало воздухоочистительные установки с круглыми картриджными фильтрами Donaldson. Компания использовала вертикальные картриджи, что упрощало замену снизу и исключало пылесборник (пыль удалялась ветром/осадками). Недостаток вертикальной конструкции – большие габариты. Горизонтальные картриджи компактнее, но менее эффективны из-за осыпания пыли с верхних рядов.

В импульсных КВОУ используются конусообразные и цилиндрические картриджи (горизонтальные ряды) или плоские панели. Конусообразные картриджи обеспечивают большую площадь фильтрации и улучшенную аэродинамику. Очистка фильтров происходит импульсом сжатого воздуха при достижении определенного уровня загрязнения. Классы очистки: F7-F9. Уловленная пыль удаляется вентиляторной системой. AAF International предлагает КВОУ с самоочищающимися плоскими панельными фильтрами (классы F7-F9) для различных применений.

В современных системах очистки воздуха с фильтрующими панелями крупные частицы пыли отводятся в вертикальные каналы, снижая нагрузку на фильтры (особенно во время песчаных бурь). Часть забираемого воздуха (6-10%) с пылью направляется в эти каналы и удаляется вентиляцией вдали от зоны

забора. Импульсная продувка очищает фильтры, продлевая их срок службы. Системы с плоскими фильтрующими панелями (например, AAF ASC) компактнее, имеют автоматическую импульсную очистку, не требуют антиобледенительной системы и байпасного клапана, что повышает надежность, снижает затраты на обслуживание и повышает общую эффективность [57].

### **1.2.2. Преимущества и недостатки существующих КВОУ**

Задача КВОУ, используемой в ГПА, заключается в обеспечении высококачественного и безопасного поступления воздуха для эффективной работы оборудования: очистка поступающего воздуха от пыли; защита от попадания посторонних предметов и льда; подогрев воздуха для предотвращения обледенения; шумоглушение до уровней звука 80 дБа на расстоянии в 1 м от плоскости воздухозабора; очистка и шумоглушение воздуха, подводимого в теплозвукоизолирующий кожух ГТД.

Типовые конструкции КВОУ ГТУ представляют собой блочные системы, которые обеспечивают эффективную работу и легкость в транспортировке. Эти блоки спроектированы таким образом, чтобы их можно было легко перемещать и монтировать на различных объектах, что делает их универсальными для применения в различных условиях [58].

Как известно, атмосферный воздух содержит множество частиц, как промышленных, так и природных, которые могут негативно влиять на работу газотурбинных двигателей (ГТД). Когда эти частицы попадают в компрессор, они способствуют образованию отложений в газоздушном тракте, что, в свою очередь, приводит к эрозионному износу проточной части двигателя. Одним из наиболее уязвимых элементов системы являются рабочие лопатки осевого компрессора. Качество входящего воздуха играет критическую роль в их износе, и даже небольшие загрязнения могут значительно сократить ресурс их работы. Это не только снижает эффективность работы самой газотурбинной установки, но и может привести к увеличению затрат на обслуживание и ремонт. Эффективная

очистка воздуха перед его поступлением в компрессор является неотъемлемой частью эксплуатации газотурбинных установок. Основным этапом в этом процессе — это фильтрация, которая включает в себя как грубую, так и тонкую очистку. На первой стадии, грубой очистки, наиболее распространенными решениями являются прямооточные батарейные циклоны и жалюзийные пылеуловители. Эти устройства работают на основе инерционных принципов, улавливая в основном крупные частицы пыли с диаметром 20-30 мкм и более. Эффективность их работы варьируется от 60 до 95%, в зависимости от конструкции и условий эксплуатации. Следующим этапом является тонкая очистка, которая осуществляется с помощью кассетных фильтров накопительного типа, например, 16 типа. Эти фильтры предназначены для улавливания мелких частиц, которые не были задержаны на первой стадии. Однако, их эффективность во многом зависит от того, насколько хорошо была выполнена грубая очистка. Если на первой стадии в воздух попадают абразивные частицы, то это может значительно снизить качество очистки на второй стадии. Одним из главных недостатков фильтров тонкой очистки является их низкая степень очистки воздуха. Это связано с тем, что в воздухозаборной камере ГТУ могут присутствовать абразивные частицы, которые не были уловлены на первой стадии фильтрации. Кроме того, повышенное гидравлическое сопротивление, возникающее из-за особенностей компоновки фильтров, также негативно сказывается на их работе. Эти факторы могут привести к снижению надежности работы газотурбинной установки и уменьшению ее коэффициента полезного действия (КПД). Важно отметить, что фракции, находящиеся в цикловом воздухе, могут оказывать влияние на характеристики проточной части ГТД. Изменения в скорости потока воздуха могут привести к нарушению соотношения давлений между ступенями компрессора, что, в свою очередь, может вызвать нестабильную работу двигателя. Это подчеркивает необходимость тщательной фильтрации воздуха, поступающего в компрессор, чтобы минимизировать риски, связанные с изменениями в его характеристиках. Для повышения эффективности работы газотурбинных установок и продления их срока службы необходимо внедрение современных

технологий очистки воздуха. Это может включать использование более совершенных фильтров, которые обеспечивают более высокую степень очистки, а также системы мониторинга качества входящего воздуха. Применение технологий электростатического осаждения частиц может повысить эффективность улавливания мелкодисперсной пыли. Важно автоматизировать процессы очистки и регулярно контролировать состояние фильтров, чтобы вовремя выявлять и устранять проблемы. Очистка воздуха, поступающего в газотурбинные установки, критически важна для их надежной работы. Улучшение технологий фильтрации и мониторинга может снизить затраты на обслуживание и продлить срок службы оборудования.

Среди инерционных пылеуловителей выделяют жалюзийные, циклонные и ротационные устройства. Жалюзийные пылеуловители имеют низкую эффективность очистки и требуют частого обслуживания, что увеличивает затраты. Также они могут обледенеть при низких температурах. Новые газотурбинные двигатели требуют высоких температур газов, что требует более совершенных систем фильтрации. Современные лопаточные аппараты компрессоров становятся более чувствительными к износу.

Правильная компоновка воздухозаборных устройств также важна для эффективности фильтров. Циклонные пылеуловители хорошо отделяют частицы, но имеют ограничения по размеру. Ротационные устройства обеспечивают высокую очистку и могут иметь систему автоматической очистки, но они дороже. Выбор типа пылеуловителя зависит от условий эксплуатации и экономических показателей. В конечном итоге, правильный подход к выбору и эксплуатации пылеуловителей может существенно улучшить надежность и эффективность работы газотурбинных установок [55-57].

КВОУ для газовых турбин представляют собой крупные металлоконструкции, обладающие высокой металлоемкостью. Основная задача, стоящая перед разработчиками новых конструкций КВОУ, заключается в создании более компактных моделей с уменьшенной металлоемкостью. Это особенно актуально для производственных объектов, где объем очищаемого

воздуха превышает  $50 \text{ м}^3/\text{с}$ . В таких случаях КВОУ не только очищают воздух, но и могут выполнять дополнительные функции, такие как осушка или увлажнение, подогрев или охлаждение. Однако такие установки зачастую имеют значительные размеры и вес. Например, КВОУ для газоперекачивающих агрегатов (ГПА-25) может весить около 20 тонн [58].

Рассмотрен модуль очистки воздуха КВОУ для ГПА-16МЖ, эксплуатируемого на КС Арская ООО «Газпром трансгаз Казань» при температурах окружающего воздуха от минус  $40^\circ\text{C}$  до плюс  $40^\circ\text{C}$  при наличии влажности до 100% при наличии снега и дождя. КВОУ состоит из следующих основных блоков: блок циклонный, секция тонкой очистки, блок шумоглушения на всасывании, площадки технического обслуживания. КВОУ рассчитан на работу в режиме круглосуточной эксплуатации. Номинальная пропускная способность по расходу очищаемого воздуха -  $98 \text{ кг/с}$ . Степень очистки не менее 99%. Потеря полного давления на выходе из КВОУ не более 995 Па. Расход воздуха на обогрев  $1,3 \text{ кг/с}$ . Конструктивные параметры КВОУ: длина – 11500 мм, ширина – 9850 мм, высота – 3300 мм. Масса КВОУ 22670 кг. Схематичное расположение основных элементов блока очистки воздуха КВОУ показано на рисунке 1.9.

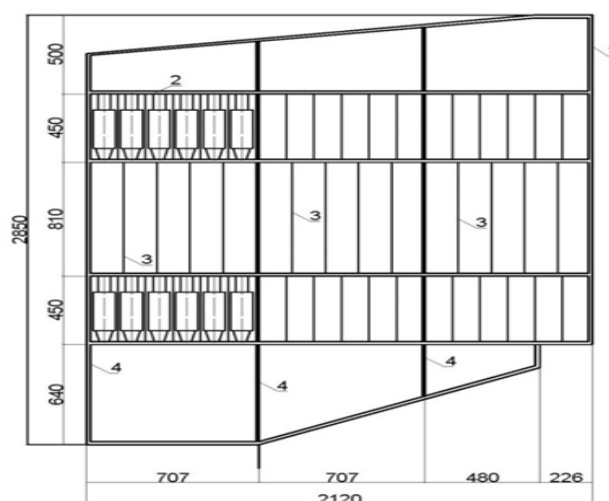


Рисунок 1.9. Схема расположения основных элементов блока очистки воздуха КВОУ газокompрессорной станции. 1- корпус КВОУ, 2 – секции циклонирования, 3 – секции тонкой очистки, 4 – секции шумоглушителей

Однако, для небольших производственных объектов, расположенных в городских условиях, применение громоздких КВОУ может быть затруднено из-за ограничений по площади и экономическим соображениям. В таких случаях предприятия предпочитают более компактные и экономически выгодные решения. Для многих производств, которые не ограничены в площади и финансах, также могут быть предпочтительнее упрощенные варианты воздухоочистных устройств. Такие устройства могут сосредоточиться исключительно на очистке воздуха и шумоглушении, что делает их более удобными для использования в условиях ограниченного пространства. Дополнительные функции, такие как подогрев или охлаждение воздуха, могут быть реализованы с помощью специализированных устройств, таких как калориферы, холодильники и кондиционеры, которые могут быть установлены отдельно на свободных площадях. С переходом к более упрощенным моделям, такие установки будут обозначаться как ВОУ (воздухоочистные установки). Несмотря на потерю комплексности, что может снизить эффективность очистки, уменьшение габаритов ВОУ может стать значительным преимуществом для современных производств. Кроме того, освобожденное пространство внутри ВОУ может быть использовано для установки дополнительных очистных элементов, что позволит улучшить степень очистки поступающей газовой среды.

Однако, в последние десятилетия, с увеличением разнообразия фильтров, предлагаемых зарубежными производителями на российском рынке, отечественные конструкторы начали переходить на использование высокоэффективных фильтровальных материалов, таких как HEPA (High Efficiency Particulate Air), которые стали популярными благодаря своей способности задерживать до 99,97% частиц размером 0,3 микрон [59].

Этот материал является аналогом ткани Петрянова, использовавшейся в СССР с середины XX века в аналитических фильтрах. В результате этого перехода конструкции КВОУ стали использовать пористые фильтры на обеих стадиях очистки, что привело к снижению интереса к циклонным технологиям, которые были признаны устаревшими и менее эффективными. Тем не менее,

последние годы показали, что такое решение может быть преждевременным, так как остаются вопросы параллельного импорта и высоких цен на зарубежные фильтры. В отличие от тканых фильтровальных материалов, волокнистые фильтры имеют значительно меньший проскок воздуха, что обеспечивает высокую степень очистки [60]. Однако процесс регенерации этих фильтров, то есть удаления уловленных частиц, требует значительных энергетических затрат. Это приводит к образованию большого объема трудно утилизируемого отработанного материала, срок службы которого, как правило, составляет всего один-два года. С другой стороны, срок службы циклонных элементов может достигать десятилетий, и их утилизация не вызывает таких сложностей, как в случае с волокнистыми фильтрами. Циклоны способны эффективно отделять большие и тяжелые частицы, что снижает нагрузку на тонкие фильтры, которые затем могут использоваться более эффективно.

Таким образом, интерес к циклонным технологиям вновь начинает расти, так как они предлагают более устойчивое и экономически оправданное решение для очистки воздуха. К тому же стоит отметить, что современные разработки в области циклонных технологий позволяют значительно улучшить их характеристики. Например, новые конструкции циклонов могут быть более компактными и эффективными, что делает их привлекательными для использования в условиях ограниченного пространства. Кроме того, применение современных материалов и технологий производства позволяет улучшить прочность и долговечность циклонных элементов, что также способствует их популяризации.

Следует также отметить, что переход на высокоэффективные фильтры типа НЕРА не является единственным возможным решением для повышения эффективности очистки воздуха в КВОУ. Циклонные технологии, несмотря на их репутацию устаревших технологий, обладают множеством преимуществ.

Поэтому предложен способ установки в КВОУ циклонных элементов с фильтрующими вставками (рисунок 1.10). Важно учитывать не только

эффективность очистки, но и экономические и экологические аспекты, связанные с утилизацией отработанных материалов и сроком службы оборудования.

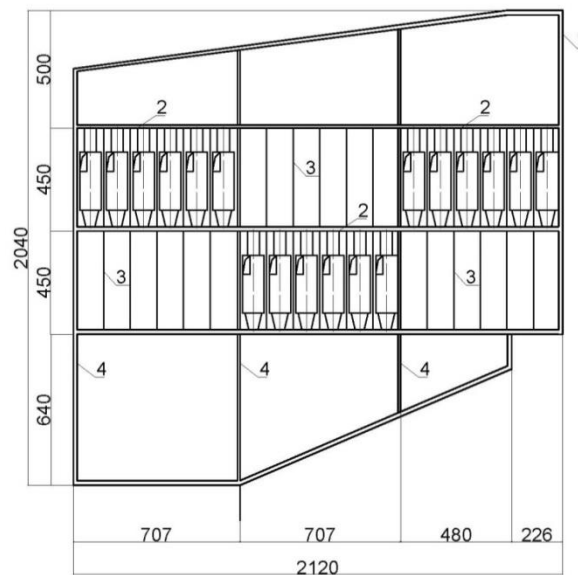


Рисунок 1.10. Схема расположения основных элементов усовершенствованной ВОУ. 1- корпус ВОУ, 2 – секции циклонных элементов с фильтрующими вставками, 3 – секции пылеудаления, 4 – секции шумоглушителей

Автором работы [61] исследованы вихревые инерционные пылеуловители со встречными закрученными потоками (ВЗП), которые демонстрируют ряд преимуществ, таких как высокая эффективность сепарации частиц и возможность оптимизации конструкций систем очистки. Отмечено, что ВЗП могут значительно улучшить существующие системы фильтрации, предложены новые схемы компоновки и более гибкие решения для снижения пылевых выбросов. Получена математическая модель, описывающая закономерности сепарации пылевых частиц. Однако рассмотренная математическая модель не сочетает в себе комбинированного метода исследования многочисленных элементов конструкции. Докторская диссертация [61] по исследованию пылеуловителей приведена в моем обзоре, как одно из последних исследований наиболее совершенных конструкций на сегодня, отличающееся наличием высокой эффективностью сепарации частиц и математической модели, описывающей

закономерности сепарации пылевых частиц. Это показало, что предлагаемый в моей работе комбинированный метод численного исследования конструкций с большим числом элементов, не затрагивался предыдущими исследователями, что показывает его новизну.

Автором работы [62] исследованы способы обеспечения объективности выбора направлений совершенствования оборудования тепловых электрических станций: основного - элементов оборудования для сжигания газообразного и твердого топлива, и вспомогательного - золоулавливающего оборудования. Представлен материал по численным исследованиям характеристик криволинейных потоков у препятствий, необходимых для определения степени осаждения частиц золы, а также высоты начального подъема струи из дымовой трубы ТЭС. В данной работе моего научного руководителя проведены численные исследования, касающиеся дымовых газов, как очистных аппаратов, так и дымовых труб. Однако и рассмотренные в этой работе численные исследования не включают в себя комбинированные исследования всех элементов газоочистного оборудования, что существенно осложняет расчеты и показывает самостоятельность моего предложения.

В связи с этим, разработанное в данной работе комбинирование нескольких методов численных исследований может стать оптимальным решением для разработки конструкций, обеспечивающих высокую степень очистки воздуха и получения достоверных результатов расчета.

### **1.3. Пористые фильтры для очистки воздуха**

Фильтрация в пористом слое представляет собой сложный и многоступенчатый процесс. Накопление взвеси в фильтре имеет стохастический характер, что приводит к изменениям в структуре фильтрующего материала. Эти изменения могут влиять на эффективность фильтрации, создавая дополнительные трудности в управлении процессом. В связи с этим оптимальные режимы работы

действующих фильтров в настоящее время устанавливаются, в основном, опытным путем, что требует значительных временных и финансовых затрат.

Фильтрация аэрозолей в пористых средах – сложный процесс, удаляющий частицы разных размеров. Улавливание происходит за счет взаимодействия частиц с элементами пористого материала. Основные механизмы: касание (зацепление) – универсальный механизм, когда частица касается поверхности и удерживается межмолекулярными силами; отсеивание (ситовой эффект) – задержка частиц, превышающих размер пор; инерционный захват – крупные частицы по инерции сталкиваются с препятствиями; гравитационное осаждение – тяжелые частицы оседают под действием силы тяжести; диффузионное осаждение – мелкие частицы осаждаются из-за броуновского движения; электростатическое взаимодействие – притягивание частиц с противоположным зарядом. Существуют волокнистые, тканевые и зернистые фильтры [63]. Волокнистые фильтры, особенно тонковолокнистые, эффективны для тонкодисперсных аэрозолей. Они могут быть одно- и многослойными, с разными типами волокон (стекловолокно, синтетические материалы). Волокнистые фильтры также используются как туманоуловители, самоочищаясь от уловленной жидкости.

Двухступенчатая фильтрация продлевает срок службы фильтров, используя инерционный фильтр для предварительной очистки от крупных частиц. Рукавные фильтры, особенно для воздуха, широко применяются в различных отраслях для очистки воздуха [63].

### **1.3.1. Существующие виды пористых фильтров**

Выбор материала для пористых фильтрующих перегородок критичен для эффективности фильтрации. Доступны зернистые слои (высокая фильтрация), металлические сетки (прочность), керамика/металлокерамика (термостойкость, агрессивные среды), волокнистые материалы (низкое сопротивление потоку), ткани и бумага (высокая степень очистки). Структура тканей, состоящих из

скрученных волокон, позволяет контролировать пористость и проницаемость для оптимальной фильтрации. Важным аспектом является также возможность комбинирования различных материалов для создания многослойных фильтров, которые могут эффективно улавливать как крупные, так и мелкие частицы. Это позволяет значительно повысить эффективность фильтрации и расширить диапазон применения таких систем. Например, в некоторых промышленных процессах могут использоваться фильтры, состоящие из нескольких слоев, каждый из которых отвечает за улавливание определенного типа загрязняющих веществ (рисунок 1.11 а, б).

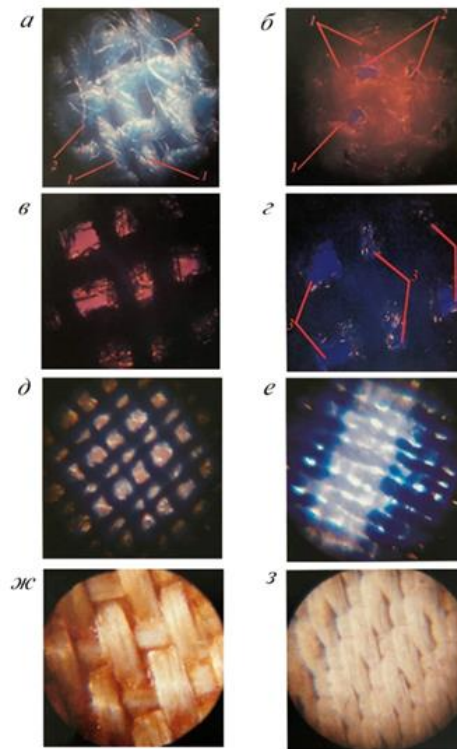


Рисунок 1.11. Структура тканого фильтрующего материала, чистая ткань: а, б – лавсан; в, г, д – ячейки ткани, перекрытые волокнами; е – сетка хлопчатобумажной ткани, сатин; ж, з – стеклоткани различной плотности плетения нитей, полотно и саржа [23]

Переплетения нитей в тканях из натуральных и искусственных синтетических волокон образуют сетку с размерами ячеек порядка одной – двух

толщин нити (рисунок 1.11 г, д, е). Волокна обычно несколько перекрывают ячейки 3, уменьшая проход между нитями (рисунок 1.11 б, в, г, д). Для фильтровальных тканей обычно используют сатиновое, полотняное и саржевое переплетение нитей (рисунок 1.11 е, ж, з) [23].

Фильтрация через пористые перегородки представляет собой сложный процесс, который имеет ряд уникальных характеристик, отличающих его от простого механического просеивания. В отличие от сит, где размеры ячеек четко определены и сопоставимы с размерами частиц, в случае пористых перегородок размеры поровых каналов значительно превышают размеры улавливаемых частиц. Это означает, что фильтрация не сводится к простому механическому отсеиванию, а включает в себя множество других физических процессов.

При прохождении через пористую структуру, частицы, такие как пыль, не просто "зацепляются" за стенки каналов. Вместо этого они осаждаются на стенках пор, которые образованы твердыми элементами перегородки. Эти стенки обладают определенными свойствами, которые способствуют удержанию частиц (рисунки 1.12, 1.13).

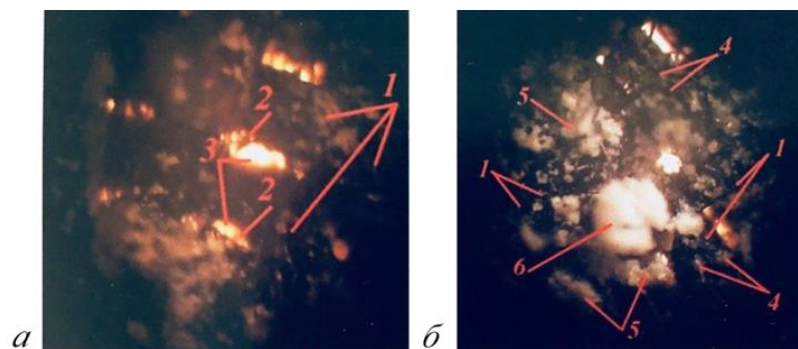


Рисунок 1.12. Пыль мелкая слипающаяся (коалин),  $\delta < 10$  мкм [23]: а – начальный период; б – формирование пылевых слоев; 1 – частицы, осевшие на нитях и волокнах (первичный слой); 2 – частицы, застрявшие в ячейках; 3 – свободные ячейки; 4,5,6 – вторичный и последующий слой

Фильтрация состоит из двух стадий: стационарной и нестационарной. В стационарной стадии осажденные частицы накапливаются в пористой

перегородке в минимальных количествах, структура перегородки почти не меняется. В нестационарной стадии происходит значительное накопление частиц, структура перегородки меняется, появляется ситовый эффект из-за образования пылевого слоя, увеличивается гидравлическое сопротивление.

Пористая перегородка обладает важным свойством – пористостью ( $\epsilon$ ), которая определяется как отношение объема пустого пространства (объема пор) к общему объему, занимаемому пористой средой. Это свойство критически важно, поскольку оно определяет, насколько эффективно фильтр может задерживать частицы. Объем твердых элементов, содержащихся в единице объема пористой среды, называется плотностью упаковки ( $\alpha$ ) [63-68].

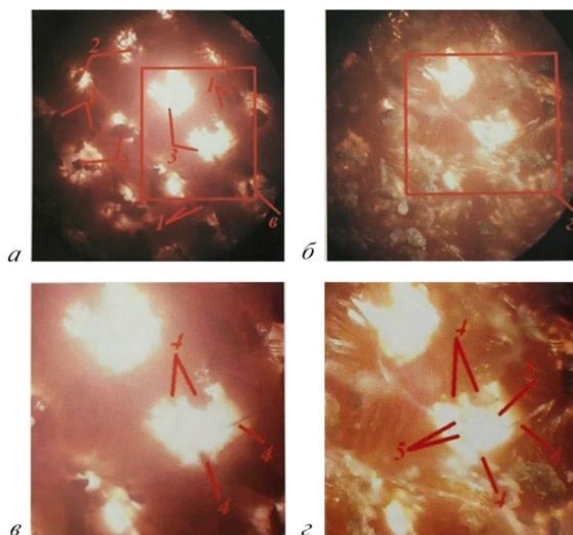


Рисунок 1.13. Фильтрация пыли тканым материалом. Пыль растительного происхождения, неслипающаяся: а – начальный период; б – образование автослоя; в, г – формирование пылевых мостиков, фрагменты; 1- частицы, осевшие при непосредственном контакте с нитями и волокнами ворса; 2 – частицы, застрявшие в ячейках; 3 – свободные ячейки; 4 – частицы и волокна, служащие опорами для образования мостиков; 5 – частицы, образующие пылевые мостики [23]

Пористость фильтрующей среды и плотность упаковки фильтрующих элементов играют ключевую роль в эффективности фильтрации, особенно в системах, где требуется удаление аэрозолей и других загрязняющих частиц.

Пористость фильтрующей среды, обозначаемая как  $\varepsilon$ , представляет собой относительное живое сечение всех поровых каналов, по которым проходит аэрозоль и ее можно определить из формулы (1.1):

$$\varepsilon = \frac{\rho_s - \rho_{\phi}}{\rho_s} = 1 - \alpha, \quad (1.1)$$

где  $\rho_s$  – плотность материала элементов фильтрующей среды;  $\rho_{\phi}$  – кажущаяся плотность фильтрующей среды.

В фильтрации воздуха и газов применяют различные материалы, включая стеклянную вату, пенополиуретан и фильтры Петрянова (ФП) из полимерных волокон. ФП, накапливая электрические заряды, эффективно улавливают пыль.

Промышленные фильтры классифицируют по форме фильтровальных элементов (рукавные, рулонные), наличию опорных устройств (каркасные, рамные), расположению вентилятора (всасывающие, нагнетательные), способу регенерации ткани (встряхивание, продувка), форме корпуса и количеству секций. Рукавные фильтры, с эффективностью до 99,7%, требуют периодической очистки встряхиванием и продувкой, но трудоемки в уходе и металлоемки. [70].

### 1.3.2. Преимущества и недостатки пористых фильтров

Фильтрация играет ключевую роль в очистке газов от взвешенных частиц. Преимущества фильтрационных установок: высокая степень очистки по сравнению с другими типами газоочистных установок, возможность улавливания частиц при любых давлениях газа, высокая эффективность при значительных концентрациях взвешенных веществ, способность очищать газы при высоких температурах. Долговечность и надежность оборудования обеспечиваются использованием химически стойких материалов. Автоматизация процесса минимизирует человеческий фактор и повышает эффективность работы системы. Стабильность процесса очистки и меньшая зависимость от изменения свойств улавливаемых частиц и расхода газов обеспечивают постоянное качество

очищаемого газа. Простота эксплуатации делает системы привлекательными для предприятий. [71].

Недостатки пористых фильтров следующие. Во-первых, необходимо периодически заменять некоторые фильтрующие перегородки, что может привести к дополнительным затратам и времени на обслуживание. Во-вторых, использование отдельных видов фильтров может требовать сравнительно высокого расхода электроэнергии, что также увеличивает эксплуатационные расходы. Громоздкость установок с фильтрами является еще одной проблемой, особенно при большом объемном расходе очищаемого газа. Это может ограничивать возможности их установки в уже существующих производственных помещениях [72]. Кроме того, относительная сложность эксплуатации таких систем может потребовать дополнительного обучения персонала. Что касается способов регенерации тканевых фильтров, то существует два основных метода – встряхивание фильтрующих элементов, которое может быть выполнено механическим или аэродинамическим способом, и обратная продувка фильтрующих элементов очищенными газами или воздухом [73, 74].

#### **1.4 Исследования по усовершенствованию воздухоочистительных устройств с использованием численных методов**

Как показано выше, существующие на сегодня воздухоочистительные устройства, использующие принципы циклонирования и/или фильтрации, имеют множество недостатков, в том числе – связанных с компоновкой элементов. КВОУ устанавливаются перед каждой ГТУ на компрессорных станциях (КС) вне зависимости от ее мощности, так как для работы компрессоров и ГТУ требуется воздух с содержанием частиц пыли менее  $PM_{2,5}$  и  $PM_{10}$  [11-15]. Поэтому создание устройств, обеспечивающих высокую степень очистки газовых и воздушных потоков при низких энергозатратах перед ГТУ и компрессорными установками в системах газоснабжения и городской энергетики, промышленности и транспорта, на сегодня является актуальной задачей, в том числе, в связи с необходимостью

достижения низкоуглеродности производства. Как показано в предыдущих параграфах, процессы циклонирования и фильтрации двухфазных потоков не поддаются точным теоретическим расчетам. Поэтому устранять недостатки в конструкциях КВОУ для обеспечения оптимальных энергозатрат при требуемой степени очистки воздуха можно предварительно на натуральных моделях или уже на действующем оборудовании. И то, и другое требует больших материальных, временных и трудовых затрат. Значительно более рационально устранение указанных недостатков можно произвести на основе результатов исследования потоков в численных моделях очистных систем, проводимых с использованием современных программных пакетов, таких как ANSYS Fluent, FlowVision и др., которые применяют методы вычислительной гидродинамики (CFD). Эти программы позволяют моделировать одно- и двухфазные потоки газа, анализировать распределение давления и температуры, а также выявлять потенциальные проблемы в конструкции КВОУ с соответствующими секциями.

Применение численного исследования для усовершенствования воздухоочистительных устройств газотранспортных, энергетических, промышленных компрессорных станций в большинстве случаев является не только рациональным, но и единственным реально осуществимым способом изучения характеристик работы устройств типа КВОУ. Вместе с тем, они представляют собой многотонные крупногабаритные сооружения, число циклонизирующих и фильтрующих элементов в конструкции которых достигает нескольких тысяч. Поэтому оптимизация расположения элементов КВОУ в трехмерной численной модели возможна только на базе очень мощных вычислительных кластеров.

Следовательно, решение задач усовершенствования конструкций воздухоочистительных аппаратов в первую очередь требует рационализации самих способов численных исследований с их адаптацией под объекты с множественным числом элементов (циклонизирующих и фильтрующих элементов в КВОУ), однако это направление разработано пока недостаточно.

В целом разработке численных методов исследования гомогенных и гетерогенных потоков в циклонизирующих устройствах посвящено неохватное число работ. В то же время среди них крайне редко встречаются исследования, авторы которых делают попытки, или хотя бы декларируют необходимость, комбинированного применения 2d- и 3d- моделирования простых (с 1 элементом) и несколько усложненных (с 2-3 элементами) объектов. Исследований же подобного рода по объектам с 10 и более элементами в доступной литературе не обнаружено.

В конце 19 и начале 20 столетий были широко распространены расчетные исследования в 2d-формате методами наложения потоков (НП) у источников и стоков простого типа, или их конформных отображений (КО). Исследования этими методами выполнялись и в конце прошлого столетия, параллельно с 2d- и 3d- методами CFD. Мотивацией использования 2d-3d комбинации для простых объектов служит удобство 2d- моделирования, заключающееся в его простоте по сравнению с 3d- моделированием, а также в возможности получения линий тока и удобной интерпретации на их основе результатов следующего, как правило – финишного, этапа исследований на основе 3d- модели исследуемого объекта.

За первую попытку декларирования необходимости комбинированного применения 2d- и 3d- моделирования в данном направлении можно принять предположение о возможности распространения результатов расчетов гидродинамических параметров осесимметричных 2d- потоков, полученных методами НП, КО, на трехмерные потоки [75-76]. Однако эти предположения количественно или/и качественно подкреплены не были и в виде непосредственной интерпретации результатов решения осесимметричных двумерных задач методами конформных отображений в качестве решения трехмерных задач продолжения не получили, а их автор перешел на более плодотворные исследования в 2d-формате методами КО [77-79].

Практически результативными по созданию связки метода конформных отображений с численными методами, в том числе – и для запыленных потоков, стали исследования белгородской школы моделирования И.Н. Логачева и К.И.

Логачева с учениками. Комбинирование метода конформных отображений (сугубо 2d-метод) с 2d- или 3d- моделированием на базе вычислительной гидродинамики (CFD) прослеживается в разработанном ими методе дискретных вихрей (МДВ) [80-82]. МДВ признан в мировой литературе как метод, дающий достоверные результаты, и верифицировался многими исследователями на основе других вычислительных методик. Сами авторы также неоднократно использовали для его верификации результаты работ других исследователей, в частности, работы в 2d-формате методами КО Посохина В.Н. [83-84]. Вместе с тем, ими исследовались, как правило, одиночные объекты, хотя и со множественными связями в потоке [85]. Отдельная же задача системного изучения и распространения комбинированного 2d-, 3d- метода на исследование гидродинамики объектов с множественными элементами в их работах не рассматривалась.

Задача связки двух или нескольких объектов в гидродинамическом взаимодействии с использованием 2d- или 3d- моделирования на основе методов CFD ставится в работах представителей казанской и белгородской школ моделирования [86]. Ими изучались характеристики взаимодействия в однофазном потоке двух-трех фасонных элементов (местных сопротивлений), в одном воздуховоде. Получены зависимости размеров вихревых зон и коэффициентов местного сопротивления от расстояния между элементами в таких узлах [87-88].

В работе [89] поставлен вопрос о системном изучении особенностей применения комбинированного 2d-, 3d- метода моделирования, проведено детальное сравнение результатов 2d- и 3d- моделирования течения неизотермического многокомпонентного (однофазного) потока. Далее это направление получает системное продолжение в ряде работ данных авторов [90-91]. Однако при этом исследуется только одиночный объект, а развитие метода в направлении исследования объектов с множественными элементами отсутствует, и не декларируется.

Авторами [29] проведен анализ известных конструкций вихревых раскручивателей и установлено что наиболее перспективным является применение раскручивающих устройств, устанавливаемых внутри выхлопной трубы, которые, не ухудшая эффективности очистки, позволяют значительно снизить энергопотребление циклонов. Однако в исследованиях не применено 2d, 3d- численное моделирование.

Разработана и исследована новая конструкция прямоточного циклона и использованием системы активного управления положением жалюзийных решеток для адаптации его работы к сезонным изменениям условиям окружающей среды [34], но также процессы методами 2d, 3d- численного моделирования не изучены.

Как было выше указано, для анализа работы сложных конструкций на основе численного моделирования проведены многочисленные исследования. Их применение (например, [92]) позволяет разработать методику моделирования для расчета основных геометрических характеристик потоков. Однако, окончательное решение об эффективности численного решения можно принять только после исследования на математической модели рабочего процесса, либо в процессе экспериментальных исследований.

В исследовании авторов [93] представлен способ моделирования системы использования энергии выхлопных газов ГПА. Кратко описан один из способов транспортировки газа компрессорными станциями через магистральные газопроводы. Работа посвящена поиску оптимального способа численного моделирования системы обработки продуктов сгорания от ГТУ газоперекачивающих агрегатов, однако способ комбинированного 2d-, 3d- численного исследования в работе не рассматривается.

Современные вычислительные средства позволяют численно рассчитывать газодинамические задачи, но требуют значительных ресурсов и времени, включая подготовку данных и построение сетки. Это ограничивает их применение в расчетах с большим количеством вариантов. Поэтому актуальна разработка менее затратных алгоритмов, жертвующих точностью ради скорости, что

компенсируется возможностью проведения большего числа расчетов и последующей точной проверкой выбранного варианта. Существуют упрощенные подходы, такие как моделирование трехмерного потока совокупностью двумерных задач [94]. Рассмотрена квазитрехмерная модель течения в проточных частях турбомашин. Приведены основные уравнения, описывающие течение в плоскости. Авторы [94] считают, что решение этой задачи позволит определить характер отклонения истинных поверхностей тока от поверхностей вращения осредненного течения. Тем самым появится возможность построения пространственной картины течения. Однако данный метод невозможно применить к задаче нахождения расположения нескольких очистных элементов, обеспечивающего максимум осаждения частиц из двухфазных потоков, движущихся вращательно в элементах и поступательно – вне элементов.

В работе [95] выполнено сравнение результатов натурального эксперимента, проведенного на инерционно-вакуумном золоуловителе второго поколения на Омской станции ТЭЦ-4, и данных численного эксперимента, рассчитанных в ANSYS CFX. Авторы внесли изменения в граничные условия после первоначальных расчетов, что позволило выдвинуть рекомендации для дальнейшего исследования инерционно-вакуумного золоуловителя. В данной задаче способ системного изучения комбинированного 2d-, 3d- метода исследования гидродинамики сложных объектов с большим числом элементов не рассматривался.

Авторами в работе [96] численно исследовалась производительность циклона, использующего запыленный генераторный газ, полученный в процессе газификации. С учетом необходимости улучшения производительности существующего циклона была проведена перепроектировка циклона. У новой конструкции циклона производительность оказалась превосходящей, но эффективность осаждения была намного выше по сравнению с экспериментальными результатами. Из анализа чувствительности результатов CFD авторы обнаружили, что возможности для ошибок возникают из-за агломерации и несферичности частиц. Исследования посредством цифровой

трассерной визуализации проводились только в плоскости (2d). Из-за сложностей проведения опытных исследований 3d-измерения не проводились, комбинированный 2d-, 3d- численный метод также не использовался.

Таким образом, анализ существующих методов численного моделирования воздухоочистки показывает, что разработка метода численного исследования с комбинированным 2d-, 3d- моделированием двухфазных потоков в объектах с множественными элементами находится в настоящее время на начальной стадии. Для моделирования очистных устройств с циклонными элементами причиной такого положения является принципиальное затруднение с корректным 2d-представлением сложного трехмерного двухфазного потока, которое давало бы результаты по осаждению взвешенной части потока, близкие к опытным данным. Нахождение способов преодоления этого затруднения и развитие метода комбинированного 2d-, 3d- моделирования будет способствовать существенному увеличению результативности исследований аэродинамики не только двухфазных, но и однофазных потоков. При изучении же объектов с многофазными потоками в множественных элементах комбинированный 2d-, 3d- метод моделирования в большинстве случаев представляется единственно возможным способом проведения исследований, при отсутствии доступа к вычислительным центрам с суперкомпьютерами.

## **ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 1**

1. Циклонные аппараты и пористые фильтры, используемые для очистки газов и воздушных потоков, имеют ряд недостатков, которые ограничивают их эффективность, особенно в условиях, когда требуется высокая степень осаждения мелкодисперсных частиц размером менее 10 мкм.
2. Анализ усовершенствований пылеуловителей выявил противоречие: повышение эффективности очистки требует больших энергозатрат из-за увеличения скорости потока или использования дополнительных механизмов. Разработки, нацеленные на снижение энергопотребления, обычно снижают

эффективность очистки. Современные решения стремятся к балансу между этими двумя параметрами.

3. Процессы циклонирования и фильтрации двухфазных потоков не поддаются точным теоретическим расчетам, и численное изучение характеристик работы устройств типа КВОУ для их усовершенствования в большинстве случаев является единственным реально осуществимым способом исследования. Вместе с тем, это конструкции с множественным числом циклонизирующих и фильтрующих элементов, и оптимизация их расположения в трехмерной численной модели возможна только на базе очень мощных вычислительных средств.

4. Решение задач усовершенствования конструкций воздухоочистительных устройств газотранспортных, энергетических, промышленных компрессорных станций в первую очередь требует рационализации самих способов численных исследований с их адаптацией под объекты с множественным числом элементов.

5. 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.

## **ГЛАВА 2. РАСЧЕТЫ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЦИКЛОНОВ ПРИ ОСАЖДЕНИИ МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ В ВОЗДУХООЧИСТИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВАХ ГАЗОТРАНСПОРТНЫХ, ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ И ПРОМЫШЛЕННЫХ КОМПРЕССОРНЫХ СТАНЦИЯХ И СИСТЕМАХ ВЕНТИЛЯЦИИ, ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ, ГАЗОСНАБЖЕНИЯ**

### **2.1. Исследование использования циклонов при осаждении мелкодисперсных частиц**

Моделирование турбулентных потоков с взвешенными частицами является серьезной вычислительной задачей. Влияние формы и размера частиц на их взаимодействие в мультифазном потоке значительно усложняет процесс. Аналитическое решение для определения параметров, характеризующих согласованность движения фаз в вихревом потоке, отсутствует. Разрабатываются упрощенные математические модели, позволяющие оценить влияние взаимодействия частиц и вихрей на их траектории. В задачах очистки выбросов, где концентрация взвеси невелика, приоритетной задачей является адекватное моделирование начального этапа взаимодействия турбулентности газового потока и частиц. Численное моделирование турбулентных потоков с частицами часто опирается на упрощение, заключающееся в том, что частицы значительно меньше масштабов турбулентности. На основе этих расчетов оценивается обратное воздействие частиц на турбулентность, то есть ее модификация под влиянием присутствия частиц.

По [97] подобная расчетная техника может быть приемлива для частиц и вихрей, значительно различающихся в размерах. Но в практических задачах диаметр частицы  $d$  может иметь одинаковый порядок с линейным масштабом Колмогорова  $\eta_K$  для однофазного потока, ввиду чего развитие физически приемлимых моделей для случая  $d \sim \eta_K$  требует самого скрупулезного моделирования взаимодействий между частицами и турбулентностью. Выбор

способа моделирования сцепления импульсов и сил между элементами дисперсной фазы и фазой носителя может стать ключевым условием правильного определения характеристик движения и сепарации реальных двухфазных потоков [98].

Авторами [99] получен новый безразмерный параметр – число момента частицы  $Pa$ , с проведением анализа уравнений Навье-Стокса, содержащих частицы, для того, чтобы понять физику, лежащую в основе модификации турбулентности частицами. Проведен ряд экспериментов, где кинетическая энергия турбулентности была изменена частицами, и все результаты можно было четко разделить на три группы в отображениях  $Re-Pa$ . Область затухания турбулентности наблюдалась между усилением области с двумя критическими числами импульса частиц. Сложная трехмерная спиральная траектория движения аэрозоля в циклонных сепараторах делает невозможным создание точной математической модели без существенных упрощений [100]. Поэтому, эффективность осаждения взвешенных частиц в этих устройствах определяется эмпирически. Теоретические усилия направлены на расчет оптимальных скоростей и давлений вращающегося потока, обеспечивающих баланс между эффективностью и энергозатратами.

Эффективность циклонной сепарации дисперсной фазы аэрозоля определяется соотношением сил инерции и сопротивления, зависящим от кривизны траектории потока, скорости и момента инерции частиц, а также вязкости среды [98]. Увеличение эффективности достигается за счет повышения силы инерции, то есть, увеличения момента инерции и скорости частиц, и уменьшения радиуса кривизны траектории. В работе исследуются сепараторы с вращательным движением потока, использующие инерционное осаждение для очистки выбросов. Разработка расчетного метода для определения эффективности осаждения позволит оптимизировать параметры очистных устройств на стадии проектирования, минимизируя энергопотребление.

Движение взвешенной частицы с массой  $m_p$ , кг и скоростью  $w$ , м/с можно описать с помощью закона Ньютона (формула 2.1)

$$\frac{m_p dw}{d\tau} = F \quad (2.1)$$

где  $F$  - Результирующая сила, влияющая на движение частицы в потоке, Н;  $\tau$  - время, с.

В практическом применении циклонов, ключевые характеристики осаждения –  $D_{50}$  и дисперсия размеров улавливаемых частиц  $\sigma_n$ , представляют собой проверенные и достоверные эмпирические данные. Эти параметры определяются производителями в ходе строгих стандартных испытаний. Имея эти данные, можно считать процесс отделения частиц от потока свершившимся и сосредоточиться на изучении системы в целом. В таком случае, для описания динамики системы можно применить принцип Остроградского-Гамильтона, утверждающий, что для реального движения интеграл Лагранжа (разности кинетической и потенциальной энергии) достигает экстремума. Это позволяет вывести обобщенный (безразмерный) параметр осаждения, сопоставляя энергетические характеристики потока и частицы через функцию Лагранжа или действие (произведение энергии на характерное время). Наиболее информативным этапом сепарации является момент отрыва частицы от линии тока. Предполагается, что к этому моменту большинство частиц уже вовлечены в движение потоком и движутся стационарно вдоль линий тока, то есть их скорости совпадают со скоростью потока. Влияние дальнейшего движения, связанного с выходом частицы из потока, можно учесть, сравнивая полученный параметр с паспортными данными циклонов.

## **2.2. Использование безразмерного параметра $Re_r$ с целью определения эффективности устройства фильтров в элементы блоков (модулей) воздухоочистительных устройств (ВОУ)**

В последние годы наблюдается активное внедрение новых материалов и технологий, что, в свою очередь, приводит к образованию новых выбросов, которые необходимо эффективно улавливать. Анализ существующих устройств

показывает, что многие из них либо обеспечивают высокую степень улавливания мелкодисперсных частиц, таких как  $PM_{10}$  и  $PM_{2.5}$ , но требуют значительных энергетических затрат, либо обладают низкой эффективностью очистки. Это создает необходимость в разработке новых решений, которые бы сочетали высокую степень очистки с экономичностью в потреблении энергии. Одним из наиболее перспективных решений в этой области является использование фильтров-циклонов, которые представляют собой устройства, совмещающие в себе функции пылеулавливания и разделения газового потока [101-107].

Предлагается циклонный аппарат, который сочетает две ступени очистки. Это позволяет эффективно осаждать мелкие частицы классов  $PM_{10}$  и  $PM_{2.5}$  с минимальными энергетическими и материальными затратами.

В циклонных очистных устройствах, которые широко используются для очистки газов и аэрозолей, степень очистки напрямую зависит как от конструктивных размеров самого аппарата, так и от физических характеристик потока, который проходит через него.

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 по формуле (2.2) с помощью критерия [108]:

$$\frac{V_0(\rho_p - \rho_G)^2 D_p^4}{\rho_G R_2^3 \eta} = Re_r \quad (2.2)$$

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.

Численные значения параметра  $Re_r$  коррелируют со степенью осаждения взвеси в сепараторах различных конструкций, реализующих вращательное

движение многофазных потоков. Параметр  $Re_r$  позволяет находить численные значения основных характеристик циклонов и других сепараторов с вращательным движением многофазных потоков расчетным путем. Несмотря на конструктивные различия рассмотренных аппаратов, их расчеты на основе  $Re_r$  приводят к результатам, близким к опытным. Поэтому значение числа  $Re_r$  для аппаратов циклонного и вихревого типов может рассматриваться как определяющий критериальный параметр, при помощи которого могут быть вычислены фракционные коэффициенты очистки примеси в зависимости от параметров потока и одного конструктивного параметра аппарата, определяющего радиус кривизны потока.

### **2.3. Результаты подсчетов относительного числа Рейнольдса $Re_r$ для определения фракционных коэффициентов для очистки мелкодисперсных частиц**

На основе теоретических подсчетов параметра  $Re_r$ , необходимых для определения фракционных коэффициентов осаждения, были получены характеристики степени осаждения частиц для циклонно-фильтрующего аппарата ЦН-11 диаметром 100 мм [109]. Расчеты проводились с использованием табличных значений конструктивных параметров аппарата:  $D_{50} = 4,5 \cdot 10^{-6}$  м, логарифм дисперсии размеров улавливаемых частиц  $\lg \sigma_\eta = 0,352$ . При плотности газа  $\rho_G = 1,293$  кг/м<sup>3</sup>, дисперсии размеров взвешенных частиц  $\sigma_p = 2,2$  для степени очистки 99% параметр осаждения  $x = 2,4$  [110]. Значение диаметра частиц, улавливаемых на 99% ( $D_{99}$ ), получено из соотношения [110] по формуле (2.3):

$$x = \lg(D_m/D_{50}) / \sqrt{(\lg \sigma_\eta)^2 + (\lg \sigma_p)^2}, \quad (2.3)$$

и составляет  $70 \cdot 10^{-6}$  м.

В качестве второй ступени очистки принят тканый фильтр из лавсана, размещенный в корпусе этого же циклона.

Рассчитаем эффективность осаждения пыли в экспериментальном циклоне. Принимаем скорости частиц от 1 до 7 м/с [109]. Находим степень осаждения в трех точках потока, соответствующих:

- $R=0,0325\text{м}$  – радиусу выхлопной трубы;
- $R=0,041\text{м}$  – среднему диаметру циклона;
- $R=0,05\text{м}$  – диаметру корпуса циклона.

Эффективность осаждения пыли находим:

а) при очистке 50% по формуле (2.4):

$$d_{50} = d_{50}^T \sqrt{\left(\frac{D}{D^T}\right) \frac{v_T}{v}} \quad (2.4)$$

где  $d_{50}^T=4,5$  мкм – табличный размер частиц для циклона ЦН-11 с диаметром 600мм;  $D$  – диаметр рассчитываемого циклона, м;  $D^T$  – диаметр табличного циклона, 0,6 м;  $v_T$  – скорость движения частиц для табличного циклона, 3,5 м/с;  $v$  – скорость движения частиц рассчитываемого циклона.

б) при очистке 99% по формуле (2.5):

$$\lg \frac{d_{99}}{d_{50}} = x \sqrt{\lg^2 \sigma_\eta + \lg^2 \sigma_p}, \quad (2.5)$$

где  $x=2,7$  – параметр осаждения;  $\sigma_\eta = 2,24$  – дисперсия пыли;  $\sigma_p = 2,2$  – дисперсия пыли обжига кольчедана.

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. Все расчеты сводим в таблицу 2.1.

Таблица 2.1 – Эффективность осаждения пыли в зависимости от скоростей

$v, \text{ м/с}$	1	2	3	3,5	4	5	6	7
$R=0,0325\text{ м}$								
$d_{50}, \text{ мкм}$	0,91	0,64	0,54	0,48	0,46	0,41	0,37	0,34
$Re_{50}, 10^{-8}$	4,72	4,61	4,3	4,02	4	3,5	1	0,9
$d_{99}, \text{ мкм}$	14,19	10,03	8,19	7,59	7,09	6,34	5,79	5,36
$Re_{99}, 10^{-6}$	8	7	5	4,8	4,75	3,06	2,8	2,63
$R=0,041\text{ м}$								
$d_{50}, \text{ мкм}$	1,41	0,99	0,81	0,75	0,7	0,63	0,57	0,53
$Re_{50}, 10^{-8}$	5,73	5,59	5,14	4,75	4,3	4,1	1	0,5
$d_{99}, \text{ мкм}$	21,83	15,44	12,6	11,67	10,91	9,76	8,91	8,25
$Re_{99}, 10^{-6}$	7,1	6,7	5,63	5,12	4,93	4,51	3,85	3,2
$R=0,05\text{ м}$								
$d_{50}, \text{ мкм}$	1,16	0,81	0,67	0,62	0,58	0,52	0,47	0,44
$Re_{50}, 10^{-8}$	5,69	5,12	4,97	4,5	4,1	3,7	1	0,76
$d_{99}, \text{ мкм}$	18	12,76	10,39	9,63	9	8,05	7,35	6,81
$Re_{99}, 10^{-6}$	6,16	5	4,73	4,2	3,15	2,73	2,51	1,73

## ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2

1.  $Re_r$  – безразмерный параметр, оценивающий эффективность осаждения частиц в циклонах и фильтрах, учитывающий скорость потока, размеры частиц и геометрию фильтра. Он обобщает энергию, необходимую для вывода частицы из вращающегося потока циклона, и позволяет вычислять фракционную степень инерционной сепарации, что важно для оптимизации процессов разделения и фильтрации в пылеулавливании, очистке газов и переработке материалов.
2. Результаты теоретических исследований в области осаждения частиц показывают, что эффективность процесса увеличивается при уменьшении радиуса, на котором устанавливается фильтр.

3. На основе теоретических подсчетов установлено, что оптимальное расположение фильтрующей вставки в циклонном элементе ВОУ диаметром 100 мм достигается на расстоянии 0,041 м от оси. При таком расположении эффективность улавливания частиц  $PM_{10}$  достигает 99%.

## **ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЦИКЛОННОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ДЛЯ ВЕРИФИКАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

### **3.1. Обзор используемых методов натурального эксперимента при сухой обработке выбросов**

Экспериментальные исследования двухфазных пограничных слоев требуют специальных измерительных приборов, позволяющих определять толщины пленок, характеристики волновых процессов на поверхностях раздела, распределение скоростей и режимы течения в пленках измерять распределение скоростей в парокапельной области слоя, напряжение трения на обтекаемой поверхности.

Практический интерес к расчетным методам определяется также сложностью полного моделирования двухфазных потоков из-за большого числа определяющих безразмерных параметров, что затрудняет перенос результатов модельных испытаний на натурную проточную часть. С аналогичными трудностями связаны попытки анализа некоторых важных, физических процессов (межфазное трение, тепломассообмен, дробление, коагуляция и т. д.). Решению этих проблем могут способствовать расчетные исследования. Создание надежных методов расчета неоднородных двухфазных течений необходимо для оптимизации решеток и ступеней турбин, работающих в области влажного пара [111].

В работе [112] исследованы параметры веерных струй от приточных устройств с очисткой воздуха, монтируемых в наружной стене. Определены расчетные скорости и избыточные температуры на оси струй в зависимости от расстояния до противоположной стены, с учетом аэродинамического сопротивления приточного устройства и угла наклона струи. Авторами представлены расчётные параметры приточных веерных струй от диффузоров универсальных круглого сечения разных марок, которые обеспечивают

оптимальный скоростной режим помещения за счет подачи чистого воздуха в верхнюю зону и середину помещения. Результаты авторов позволили получить равномерную подачу воздуха в обслуживаемую зону и соответствие оптимальному и допустимому скоростному режиму для жилых помещений. В статье найдены максимальные избыточные температуры в холодный период года, закономерности данных параметров по мере удаления от наружной стены. Проведены экспериментальные исследования по измерению скорости движения воздуха на оси приточных веерных струй от воздухораспределителей (диффузоров потолочных универсальных), смонтированных вместе с приточной установкой в наружной стене здания, в теплый и холодный периоды года. При использовании всех исследуемых воздухораспределителей расхождение теоретической кривой и опытных данных составило не более 10–15 %, что подтверждает достоверность проведенных экспериментальных исследований.

### **3.2. Построение модели натуральных исследований, описание экспериментальной установки**

Проведены лабораторные испытания работоспособности циклонного элемента диаметром 100 мм, оснащенного тканевым фильтром на расстоянии 0,041 м от центра циклона. Материал соответствовал международному стандарту ISO 3310-1-90 [113]. Лабораторные исследования проведены по стандартным методикам в соответствии со стандартами [52], ANSI/ASHRAE Standard 52.2-2007 [114], ISO 12103-1:2024 [115], ГОСТ 31831-2012 [116]. Дисперсный состав пыли определен седиментацией в воде (весовой метод). Сопротивление циклона замерялось по перепаду давления U-образными манометрами. Скорость потока вычислялась по данным микроманометра. Изготовлен и испытан опытный образец модуля КВОУ с циклонными элементами «циклон-фильтр» (рисунок 3.1) [109].

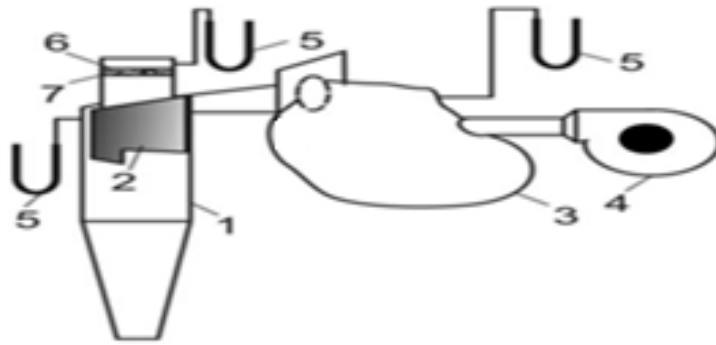


Рисунок 3.1. Стенд для испытания фильтрующего циклонного сепаратора [109]

1 – циклон; 2 – тканевый фильтр; 3 – контейнер с пылью; 4 – нагнетатель;  
5 – U-образные манометры; 6 – патрон с сеткой; 7 – ткань Петрянова.

Собрана и испытана лабораторная установка: уменьшенная модель циклонного фильтра ЦН-11 диаметром 100 мм (рисунок 3.2).

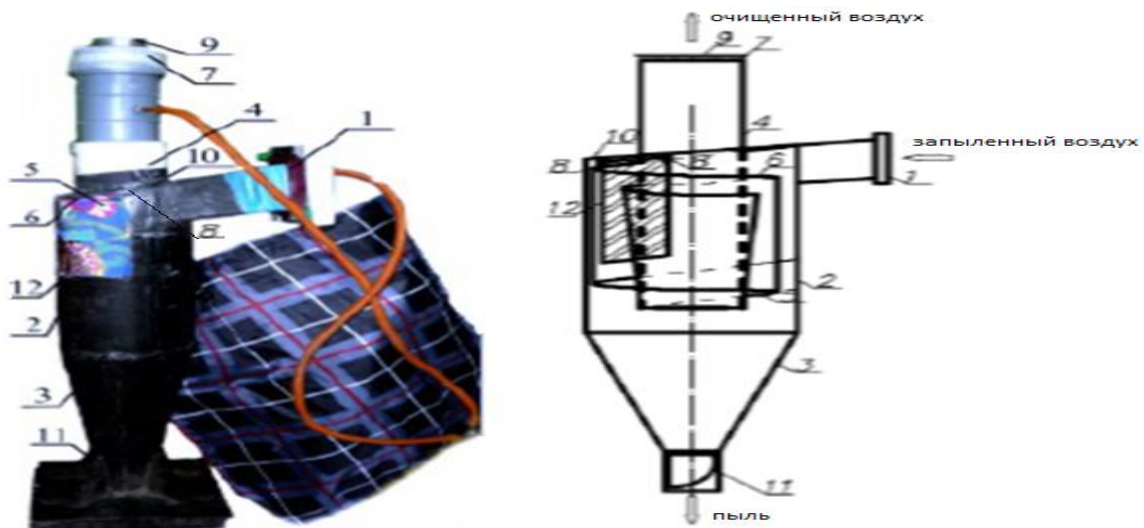


Рисунок 3.2. Лабораторная установка для испытания циклонного фильтрующего

аппарата [109]: 1 – входной патрубок; 2 – цилиндрический корпус; 3 – коническое днище; 4 – выхлопная труба; 5 – фильтровальный материал; 6 – металлический каркас; 7 – фильтр Петрянова; 8 – детали крепежа, 9 – патрон с металлической сеткой; 10 – торец циклона; 11 – заслонка; 12 – разъем для снятия фильтра

Циклон-фильтр сделан из штуцера (1), цилиндрического корпуса (2) с коническим днищем (3) и выхлопной трубы (4). Внутри трубы размещен лавсановый фильтр (5) в металлическом каркасе (6), закрепленном на торце (10). Для замены фильтра предусмотрены крепежи (8) на разъемной части корпуса. Выхлопная труба содержит патрон (9) с сеткой и фильтр Петрянова (7). Фильтровальная ткань (5) извлекается для регенерации через разъем. Замена фильтра: ослабление крепежей (8), снятие разъемной части (12), извлечение каркаса, замена фильтра (5).

### 3.3. Проведение натурального эксперимента

Для создания запыленного потока использовался нагнетатель (4), подающий воздух в емкость с тальком (3) среднего размера частиц 10 мкм (дисперсия 3,5) [109]. Этот размер выбран для имитации промышленных пылей. Масса емкости с тальком измерялась аналитическими весами ВЛА-200г-М (погрешность  $\pm 0,1 \div 0,2$  мг). Запыленный поток поступал в циклон (1) для отделения пыли по инерции. Пыль оседала на лавсановом фильтре (2). Очищенный воздух проходил через ткань Петрянова (7) и металлическую сетку (6) перед удалением. Эффективность фильтрации оценивалась взвешиванием фильтров (2, 7, 6) до и после испытаний.

Анализ распределения частиц по ткани Петрянова (7) проводился путем сравнения образцов из разных зон под микроскопом МИН-8 (25х) для оценки эффективности осаждения. Получена расходная характеристика установки (формула 3.1), связывающая расход воздуха с сопротивлением системы, что необходимо для оптимизации очистки:

$$Q_{\min} = S \cdot v = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot v \quad (3.1)$$

где  $S$  – входное сечение сопла;  $v$  – скорость потока;  $d$  – диаметр сопла [109].

При выполнении тарировки расходы на установке нагнетателя изменялись от минимального 0,001 до максимального 0,011 м<sup>3</sup>/с.

Скорость потока определялась следующим образом по формуле (3.2):

$$w = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}}, \text{ м/с} \quad (3.2)$$

где  $\Delta P$  – измеряемое давление, Па (при определении по микроманометру  $\Delta P = P \cdot k \cdot g$ , Па; по U-образному манометру –  $\Delta P = P \cdot g$ , Па);  $\rho$  – плотность воздуха при температуре  $t = 24^\circ\text{C}$  [109] и определяется по формуле (3.3):

$$\rho = \rho_0 \frac{273}{273 + t}, \text{ кг/м}^3 \quad (3.3)$$

где  $\rho_0 = 1,293$  кг/м<sup>3</sup> - плотность воздуха при температуре  $t = 0^\circ\text{C}$  [109].

Эксперимент включал четыре этапа, варьирующих массу пыли (минимальную/максимальную) и скорость потока (минимальную/максимальную). Полученные результаты, проанализированные с помощью микроскопа МИН-8 (увеличение 400х), предоставили предварительные данные о структуре и дисперсности пыли. Наиболее длительный эксперимент (30 минут) критически важен для оценки эффективности циклонного фильтра. Экспериментальные данные, подтвержденные численным моделированием и испытаниями, доказывают, что добавление фильтровальных элементов не искажает поток и позволяет использовать CFD-моделирование для оптимизации устройства.

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% [109].

### ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3

1. Лабораторные испытания показали, что фильтровальная ткань эффективно улавливает 68% пыли. Дополнительные 14% задерживаются выходным фильтром из ткани Петрянова. Оставшиеся 18% пыли оседают на стенках циклона.
2. Результаты исследований показали качественное соотношение с результатами теоретических расчетов с использованием комплекса  $Re_\tau$ , а также продемонстрировали перспективность модернизации циклонов путем интеграции

фильтрующих вставок, что повышает эффективность пылеулавливания при сохранении приемлемого уровня гидравлического сопротивления

## **ГЛАВА 4. КОМБИНИРОВАННОЕ ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОЧИСТКИ ДИСПЕРСНЫХ ВЫБРОСОВ В БЛОКАХ ЦИКЛОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ВОУ**

### **4.1. Используемые методы численного эксперимента при сухой обработке запыленных выбросов**

В ANSYS Fluent для анализа двумерных потоков доступно шесть моделей вязкости: невязкая, ламинарная, Spalart-Allmaras, k-epsilon, k-omega и Reynolds Stress. Для трехмерных задач используются модели Detached Eddy Simulation и Large Eddy Simulation, которые не относятся к моделям RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes, осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье – Стокса). Модели, основанные на методах RANS, представляют собой мощные инструменты для описания турбулентных потоков, однако, они имеют свои особенности и ограничения. Эти модели фокусируются на осреднении турбулентных движений, что позволяет им работать эффективно даже при использовании относительно грубой сетки, которая может быть значительно больше по размеру, чем сами турбулентные вихри. Это делает их менее требовательными к вычислительным ресурсам по сравнению с более сложными моделями, такими как DES (Detached Eddy Simulation) и LES (Large Eddy Simulation). Модели RANS хорошо изучены и имеют обширную базу знаний, что позволяет им быть надежными для различных областей применения [117]. Они часто используются в инженерных расчетах, таких как аэродинамика, гидродинамика и теплообмен, где важно учитывать поведение турбулентных потоков. Эти модели могут применяться как для двумерных, так и для трехмерных течений, что делает их универсальными инструментами в области численного моделирования. Основным принципом работы моделей RANS заключается в осреднении уравнений Навье-Стокса, что позволяет выделить средние значения скорости и давления, а также учитывать эффекты турбулентности через дополнительные уравнения, такие как уравнение для кинетической энергии турбулентности. Это позволяет моделям RANS

предсказывать характеристики потока, такие как распределение скорости, давление и теплопередача, с достаточной точностью для многих практических задач. Однако, несмотря на свои преимущества, модели RANS имеют и ограничения. Например, они могут не всегда точно описывать динамику мелкомасштабных вихрей или сложные взаимодействия в потоке, что может приводить к ошибкам в расчетах. В таких случаях, когда требуется более детальное представление о турбулентных структурах, предпочтение может отдаваться моделям LES или DES, которые, хотя и требуют больших вычислительных мощностей, способны более точно воспроизводить поведение турбулентных потоков.

Анализ современных методов моделирования вращающихся двухфазных потоков в циклонах показывает, что, несмотря на развитие вычислительных технологий и теоретических основ, модели RANS по-прежнему остаются основным инструментом для решения прикладных задач [118]. Эти модели основаны на рейнольдсовом осреднении параметров турбулентности и уравнениях Навье-Стокса, что позволяет получать достаточно точные результаты при умеренных затратах вычислительных ресурсов.

Уравнения Навье-Стокса – дифференциальные уравнения в частных производных, описывающие движение вязкой ньютоновской жидкости. В общем случае трёхмерного течения жидкости представляют собой три скалярных дифференциальных уравнения, выражающих баланс импульса (количества движения) для вязкой жидкости (обобщение второго закона Ньютона). Для несжимаемой жидкости они записываются следующим образом в векторном виде по формуле (4.1):

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = -(\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} + \nu \Delta \vec{v} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \vec{f}, \quad (4.1)$$

где  $\nabla$  – оператор Набла,  $\Delta$  – векторный оператор Лапласа,  $t$  – время,  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости,  $\rho$  – плотность,  $p$  – давление,  $\vec{v} = (v^1, \dots, v^n)$  – векторное поле скорости,  $\vec{f}$  – векторное поле массовых сил.

Уравнения Рейнольдса (RANS (Reynolds-averaged Navier–Stokes)) — уравнения Навье — Стокса (уравнения движения вязкой жидкости), осреднённые по Рейнольдсу. Описание турбулентных течений осуществляется с помощью метода осреднения Рейнольдса. Этот подход основан на представлении случайно варьирующихся параметров потока (скорость, давление, плотность) в виде суммы их осредненных значений и пульсационных составляющих. В контексте стационарных, несжимаемых ньютоновских жидкостей, уравнения Рейнольдса принимают вид по формуле(4.2):

$$\rho \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = \rho \bar{f}_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ -\bar{p} \delta_{ij} + \mu \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \overline{\rho u'_i u'_j} \right], \quad (4.2)$$

В данном уравнении, усреднённые по времени переменные величины обозначены надстрочной чертой, тогда как их пульсационные компоненты представлены апострофом. Что касается левой части уравнения, она показывает, как меняется импульс жидкости со временем, и это изменение напрямую связано с тем, как меняется усреднённая скорость. Изменение компенсируется (правая часть уравнения) осреднёнными внешними силами  $\rho \bar{f}_i$ , осреднёнными силами давления  $-\bar{p} \delta_{ij}$ , вязкостными силами  $\mu \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right)$ . Кроме того, в правую часть входят кажущиеся напряжения (напряжения Рейнольдса, турбулентные напряжения)  $-\overline{\rho u'_i u'_j}$ , учитывающие дополнительные потери и перераспределение энергии в турбулентном потоке (по сравнению с ламинарным потоком).

В отличие от исходных уравнений Навье — Стокса, уравнения Рейнольдса, описывающие осреднённое по времени течение жидкости, вводят новые неизвестные функции, характеризующие турбулентные напряжения. Эта особенность приводит к тому, что система из шести неизвестных оказывается незамкнутой, и для её решения необходима дополнительная информация.

Задача замыкания уравнений решается с использованием простых статистических моделей турбулентности, чаще всего двухпараметрических, таких как k-ε, что делает их доступными для широкого круга инженеров и

исследователей. В то время как предшествующие модели турбулентности уделяли внимание широкому спектру явлений, модель  $k$ - $\varepsilon$  концентрируется на динамике кинетической энергии турбулентности. Модель длины смешения, напротив, демонстрирует ограниченную применимость. Ее фундаментальное допущение заключается в изотропности турбулентной вязкости, что подразумевает единообразие связи между напряжениями Рейнольдса и тензором средней скорости деформации по всем пространственным направлениям. Эта модель, опираясь на современные представления о турбулентных явлениях, рационализирует систему, минимизируя число неопределенных переменных. В результате, она представляет собой набор уравнений, пригодных для анализа широкого спектра турбулентных течений. Для кинетической энергии турбулентности  $k$  стандартная модель турбулентности  $k$ - $\varepsilon$  имеет вид по формуле (4.3):

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + 2\mu_t E_{ij} E_{ij} - \rho \varepsilon, \quad (4.3)$$

где  $u_i$  – составляющая скорости в соответствующем направлении;  $E_{ij}$  – составляющая скорости деформации;  $\mu$  – динамическая вязкость;  $\mu_t$  – вихревая вязкость. Уравнения гласят, что скорость изменения  $k$  или  $\varepsilon$  во времени плюс перенос  $k$  или  $\varepsilon$  за счёт адвекции равны переносу  $k$  или  $\varepsilon$  за счёт диффузии, плюс скорость образования  $k$  или  $\varepsilon$ , минус скорость разрушения  $k$  или  $\varepsilon$ .

Однако, у моделей RANS есть и свои недостатки. Одной из основных проблем является их ограниченная способность к адекватному описанию процессов переноса энергии в вихревых структурах, особенно когда они движутся по криволинейным траекториям. Это приводит к тому, что результаты расчетов могут значительно отличаться от реальных значений, особенно в сложных геометриях, таких как циклоны. В таких случаях более предпочтительным оказывается метод крупномасштабного моделирования вихрей LES, который позволяет более точно учитывать динамику крупных вихревых структур. Эти структуры, как правило, имеют размеры, сопоставимые с размерами

ограничивающих поверхностей, что делает их критически важными для понимания процессов сепарации в циклонах. Использование метода LES для моделирования вращающихся двухфазных потоков в циклонах позволяет значительно улучшить точность расчетов. В отличие от RANS, где рассматриваются усредненные параметры, LES позволяет фокусироваться на динамике отдельных вихрей, что ведет к более реалистичному описанию процессов, происходящих внутри циклона. Тем не менее, применение LES сопряжено с высокими вычислительными затратами, так как для достижения достоверных результатов необходимо детальное разрешение вихрей широкого спектра частот. Это требует значительных мощностей вычислительных систем и может быть нецелесообразным для многих практических задач. В связи с этим возникла необходимость в разработке гибридных подходов, которые бы сочетали преимущества обоих методов. Такие подходы, как, например, RANS/LES, позволяют использовать RANS для описания больших, устойчивых структур потока, в то время как LES применяется для моделирования мелких вихрей и флуктуаций. Это дает возможность значительно сократить вычислительные затраты, сохраняя при этом уровень точности, необходимый для решения инженерных задач [119].

Необходимо также учесть, что характерный радиус кривизны потока в циклоне – один из основных, но не единственный параметр, лимитирующий эффективность осаждения. Его влияние на сепарацию взвеси из вращающегося потока происходит опосредованно, через инерционные свойства сепарирующихся частиц. Поэтому в расчетах необходимо вместе с характерным радиусом принимать во внимание диаметр и плотность частиц, входную скорость, плотность и динамический коэффициент вязкости потока, то есть все параметры, входящие в безразмерный комплекс  $Re_r$ . В связи с этим представляется целесообразным использование гибридных моделей RANS с фильтрацией уравнений Навье-Стокса на базе комплекса  $Re_r$ , что позволяет выполнять расчеты с приемлемым вычислительным ресурсом.

Высокие скорости крутки потока представляют собой серьезную проблему для традиционных статистических моделей турбулентности, таких как модели  $k-\epsilon$  и  $k-\omega$ , которые широко применяются в рамках подходов к осредненным по Рейнольдсу уравнениям Навье-Стокса. Эти модели основываются на предположении о том, что поток может быть представлен в виде суммы осредненных и флуктуационных компонентов, однако при высоких скоростях крутки это предположение часто оказывается неэффективным. Когда потоки становятся высокоскоростными и подвержены значительной кривизне, простые линейные напряженно-деформационные корреляции, используемые в RANS, начинают терять свою состоятельность. Это связано с тем, что кривизна линий тока, сопровождающих вращение, создает сложные структуры потока, которые не могут быть адекватно описаны стандартными методами. В результате возникают эпюры скорости, которые характерны для квазитвердого вращения, что еще больше усложняет анализ и прогнозирование поведения потока. В отличие от RANS, метод крупномасштабного моделирования вихрей LES предоставляет более точный подход к решению задач, связанных с турбулентностью. В LES крупномасштабные структуры потока, которые несут наибольшее количество кинетической энергии, разрешаются непосредственно, что позволяет получить более детализированное описание динамики потока. Мелкие вихри, которые имеют меньшее влияние на общий поток, моделируются с помощью математических моделей подсеточных масштабов. Это позволяет значительно уменьшить ошибки, возникающие при использовании упрощенных моделей, и обеспечивает более точные результаты, особенно в условиях сложной геометрии и высоких скоростей. Кроме того, LES позволяет исследовать различные физические явления, такие как взаимодействие потоков с препятствиями, явления смешивания и передачу тепла. Это делает метод особенно полезным в таких областях, как аэродинамика, гидродинамика и энергетические технологии. Важно отметить, что хотя LES и требует больших вычислительных ресурсов по сравнению с RANS, его преимущества в точности и предсказательной

способности делают его незаменимым инструментом в современных исследованиях турбулентности [120].

Стандартная модель Смагорински (standard Smagorinsky model, SM) [121], определяет неизвестные напряжения для уравнений движения Рейнольдса по формуле (4.4):

$$\tau = -2 \cdot \nu_t \cdot \bar{S}, \quad (4.4)$$

где  $\bar{S} = \left[ \nabla \bar{u} + (\nabla \bar{u})^T \right] / 2$  – усредненный тензор скорости деформации;  $\nabla \bar{u}, (\nabla \bar{u})^T$  – градиенты средней и усредненной по Рейнольдсу пульсационной скорости турбулентного потока;  $\nu_t \approx l \cdot \nu = (C_S \bar{\Delta})^2 |\bar{S}|$  – константа, составленная из масштабов длины  $l = \bar{\Delta}$  и скорости  $\nu = \bar{\Delta} \cdot |S|$  пульсаций, скорректированная константой Смагорински  $C_S$  [122].

В динамической модели Смагорински по формуле (4.5) (dynamic Smagorinsky model, DSM) [123], используется общее отношение (тождество) Germano:

$$\zeta = T - \hat{\tau}, \quad (4.5)$$

посредством которого связывается напряжение на сеточном уровне  $\tau$  и тестируемом уровне  $T$ , полученном после фильтрации подсеточных вихрей от крупномасштабных  $\bar{\Delta}, \bar{\Delta}$  по уравнению Navier-Stokes. При этом для отсеченных значений волн подсеточного масштаба, в предположении масштабного подобия подсеточных и крупных вихрей, берется та же модель с тем же коэффициентом:  $\tau - \frac{1}{3} \text{tr}(\tau) I = -2 (C_S \bar{\Delta})^2 |\bar{S}| \cdot \bar{S}$ ;  $T - \frac{1}{3} \text{tr}(T) I = -2 (C_S \bar{\Delta})^2 |\bar{S}| \cdot \bar{S}$ . Эти соотношения используем в уравнении (4.6):

$$\zeta - \frac{1}{3} \text{tr}(\tau) I = -2 (C_S \bar{\Delta})^2 \mu, \quad (4.6)$$

где  $\mu = -2 (\bar{\Delta} / \bar{\Delta})^2 |\bar{S}| \cdot \bar{S} - |\bar{S}| \bar{S}$ .

Для создания «динамической оценки» шкалы вихрей, которая предполагает постоянную корректировку линейных размеров как сеточного, так и подсеточного

масштабов в процессе вычислений, необходимо рассмотреть тензорное уравнение (4.6). В рамках данной процедуры происходит двойное сокращение, в результате чего из уравнения исключается изотропная компонента  $\zeta$ . Это исключение позволяет более точно учитывать анизотропные свойства течений, что особенно важно для сложных задач в гидродинамике и других областях, связанных с движением жидкостей и газов. Динамическая оценка шкалы вихрей может быть получена с помощью тензора  $\mu$ , который представляет собой тензор–девиатор напряжений по формуле (4.7). Этот тензор играет ключевую роль в анализе деформаций и напряжений в материале, поскольку он позволяет выделить анизотропные свойства, которые могут значительно влиять на поведение системы:

$$\zeta:\mu = -2(C_S \bar{\Delta})^2 \mu:\mu, \quad (4.7)$$

Согласно с этой процедурой вычисляется зависимое от координат и времени значение, обновляемое на каждом расчетном шаге. Достоинно особого внимания, что произведение  $C_S \bar{\Delta}$  может рассматриваться, как длина пути смещения без явного указания длины шкалы на уровне сетки. Это существенное преимущество метода, особенно необходимое при сложной геометрии расчетного пространства.

В соответствии с описанной процедурой, значение, зависящее от координат и времени, обозначаемое как  $(C_S \bar{\Delta})$ , обновляется на каждом шаге расчета. Это обновление обеспечивает высокую точность моделирования, так как учитывает изменения в состоянии системы. Особое внимание стоит уделить тому, что произведение, получаемое в результате данной процедуры, может рассматриваться как длина пути смещения  $l_S$ . Это важно, поскольку позволяет избежать явного указания длины шкалы на уровне сетки, что является значительным преимуществом метода. В контексте сложной геометрии расчетного пространства, такая возможность упрощает процесс моделирования и сокращает затраты на вычисления, так как не требует дополнительной информации о масштабах сетки и вычисления  $\bar{\Delta}$  по формуле (4.8):

$$-0,5(\zeta:\mu)/(\mu:\mu) = [C_S(x,t)\bar{\Delta}]^2 = l_S^2, \quad (4.8)$$

Один из недостатков метода динамической оценки в том, что по (4.8) могут генерироваться отрицательные значения турбулентной вязкости, которые при частом возникновении могут дестабилизировать процедуру вычисления. В настоящее время расчеты ограничиваются условием по длине пути смещения  $|(l_s / \bar{\Delta})^2| < C_s^2$ . Другим недостатком при моделировании газового потока в циклоне может стать необходимость учета в определении масштаба вихря всего тензора напряжений, а не только его девиаторной части. При сдвиговых деформациях в газовом потоке может произойти изменение не только формы, но и объема. При этом потребуется учет и шаровой составляющей тензора.

Техника крупномасштабного моделирования (LES, Large Eddy Simulation) зарекомендовала себя как эффективный инструмент для анализа осевых скоростей потока в циклонах. Однако, несмотря на положительные результаты в этой области, существует значительное несоответствие с экспериментальными данными, особенно в отношении тангенциальных составляющих. Это может быть связано с ошибками в вычислении линейных размеров отфильтровываемых вихрей, которые не учитывают искажения объема. Важно отметить, что влияние энергии подсеточных вихрей на результаты расчетов в рамках модели LES, по сути, должно быть ограниченным, поскольку она в первую очередь фокусируется на крупных вихревых структурах. Для улучшения точности расчетов необходимо обратить внимание на течение не только в кольцевом сечении циклона, но и в области под входной трубой, где поток достигает максимальных значений вращения. В этой зоне значительное влияние на формирование потока оказывают сужающие конические стенки циклона, которые могут изменять динамику движения жидкости и газа, вызывая дополнительные сложности в моделировании. В таких условиях статистические модели, использующие различные виды пристенных функций, могут продемонстрировать более высокую эффективность [124]. Среди перспективных подходов к моделированию выделяется гибридная техника, известная как моделирование отсоединенного вихря (DES, Detached-

Eddy Simulation). Этот метод сочетает в себе преимущества как крупномасштабного моделирования, так и более детализированного подхода к моделированию мелких вихрей, что позволяет достичь более точных результатов в сложных потоках, характерных для циклонов. Для проверки результатов численных расчетов необходимо проводить верификацию на натуральных моделях, используя отработанную методику стендовых испытаний. Это позволит не только подтвердить теоретические выводы, но и выявить возможные несоответствия между расчетными и экспериментальными данными. Важно, чтобы такие испытания учитывали все аспекты работы циклона, включая влияние различных геометрических параметров и режимов потока [125].

#### **4.2. Схема комбинированного 2d-3d исследования перспективных способов совершенствования ВОУ газотранспортных, энергетических, промышленных компрессорных станций**

Модели RANS, к которым относятся  $k$ - $\epsilon$ ,  $k$ - $\omega$  и Spalart-Allmaras, хорошо изучены и имеют четко определенные области применения. Они применимы как для двухмерных, так и для трехмерных задач, что делает их универсальными инструментами для инженеров и исследователей. Одним из главных преимуществ RANS является возможность работы с относительно грубой сеткой, что упрощает процесс моделирования и уменьшает требования к вычислительным ресурсам.

В отличие от моделей RANS, которые предоставляют усредненные характеристики потока, модели DES и LES сосредотачиваются на более глубоком и детальном описании турбулентных процессов. Модели RANS, как правило, используют усредненные уравнения, что позволяет быстро получать результаты, но при этом теряется много информации о мелкомасштабных вихрях и их взаимодействии. В отличие от них, DES и LES нацелены на более точное моделирование динамики потока, что делает их особенно ценными для анализа сложных потоковых явлений, таких как взаимодействие потоков с поверхностями, обтекание тел и другие сложные аэродинамические задачи. Основное

преимущество DES и LES заключается в их способности захватывать как временные, так и пространственные изменения в потоке. Это позволяет исследователям более глубоко понять динамику турбулентности, включая процессы, происходящие на крупных масштабах, а также их влияние на мелкие вихри. В частности, LES моделирует крупные вихри, которые оказывают значительное влияние на перенос импульса, тепла и массы, в то время как мелкие вихри, которые не играют столь важной роли, могут быть смоделированы более простыми способами. Турбулентность в реальных условиях всегда проявляется в трехмерной форме, и именно поэтому использование моделей DES и LES возможно только в трехмерных решателях (солверах). Это требует значительных вычислительных ресурсов, так как трехмерные модели требуют больше данных и времени для обработки [126].

Физическое моделирование воздушного потока в циклоне, необходимое для изучения осредненной и пульсационной скоростей, оказалось крайне сложной задачей для авторов [127-134]. Столкнувшись с техническими препятствиями, они обратились к математическому моделированию, используя трехмерные уравнения Навье-Стокса и  $k$ - $\epsilon$  модель турбулентности в программном пакете Flow 3D.

В руководстве к программе Fluent [135] представлены ориентировочные соотношения затрачиваемого компьютерного времени на решение задач с применением различных моделей турбулентности. Эти модели играют важную роль в численном моделировании потоков жидкости и газа, так как они позволяют предсказать поведение турбулентных потоков, которые являются сложными и многообразными. На рисунке 4.1 представлена диаграмма, показывающая относительные затраты компьютерного времени (CPU time) в процентах для различных моделей. В качестве базовой модели для сравнения принята стандартная  $k$ - $\epsilon$  модель турбулентности, которая занимает 100% времени. Эта модель является одной из самых распространенных благодаря своей простоте и эффективности для широкого класса задач. Интересно отметить, что модель Спаларта – Аллмараса, которая считается более продвинутой, требует несколько меньших затрат времени по сравнению с  $k$ - $\epsilon$ , хотя разработчики не уточняют,

насколько именно меньше. Это может быть связано с тем, что данная модель использует более сложные уравнения, но при этом оптимизирована для повышения вычислительной эффективности. С другой стороны, модели, такие как DES и LES, требуют значительно больше вычислительных ресурсов, чем стандартная RANS модель, которая представлена в данном контексте как RSM (Reynolds Stress Model) [1363].

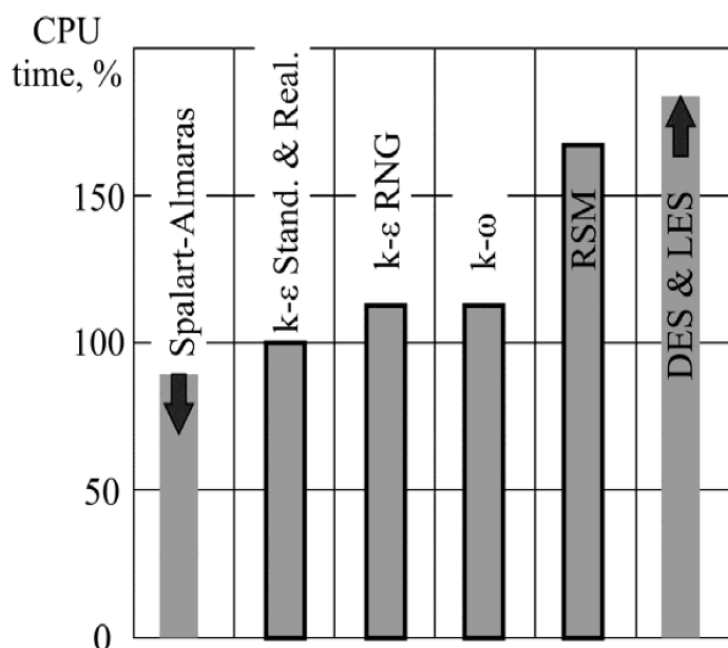


Рисунок 4.1 Сравнение моделей турбулентности по использованию компьютерных ресурсов

В данной работе более подробно рассмотрена и применена k-ε модель турбулентности, которая является одной из наиболее распространенных и широко используемых моделей в вычислительной гидродинамике. Модель k-ε относится к классу дифференциальных моделей турбулентности, что означает, что для описания турбулентных потоков в ней используются два дополнительных дифференциальных уравнения [137].

К достоинствам k-ε моделей относится высокая точность при расчете свободных сдвиговых течений. Они достаточно универсальны и не требуют задания каких-либо дополнительных параметров. Тем не менее, трудности,

связанные с их применением в пристенных областях, заставляют исследователей изобретать все новые и новые модели. Однако до настоящего времени никаких предпочтений среди моделей, базирующихся на концепции осреднения по Рейнольдсу, по существу, не наблюдается, поскольку не существует «универсальной» модели турбулентности.

Разработка численных моделей циклонирования является непростой задачей, а численные эксперименты достаточно трудоемкие и ресурсозатратные. Разработан метод комбинированного 2d- и 3d- численного исследования циклонирования, который приведет к упрощению расчетов. Сначала с помощью 2d-модели выявлены оптимальные места расположения циклонных элементов и их входов для максимального осаждения взвеси [46]. Затем на 3d-модели тестируются конструкции этих элементов для достижения наивысшей степени очистки. В данном исследовании оценивается, насколько успешно происходит осаждение в модуле КВОУ, состоящим из циклонных элементов «циклон-фильтр», благодаря чему в одном аппарате стало возможным сочетание грубой и финишной очистки и сокращение материалоемкости ВОУ, вследствие уменьшения габаритов (рисунок 1.10).

### **4.3. Построение 2d- и 3d- геометрических моделей**

Геометрия устройства создана в ANSYS. Применены приложения DesignModeler и SpaceClaim Direct Modeler (SCDM). Этапы решения газодинамических задач в программном комплексе ANSYS Fluent [135]: построение расчетной модели; разбиение модели на конечные элементы; определение границ модели; задание граничных условий; задание параметров счета; расчет; визуализация результатов расчета.

Численное моделирование циклонирования сложно и ресурсоемко из-за множества учитываемых факторов (поток, частицы, скорость и др.). Комбинированный 2d-,3d- подход значительно упрощает этот процесс.

В соответствии с рекомендациями, представленными в литературе [110-112], для анализа течений жидкости была выбрана k-ε модель. Для построения геометрической модели использовались возможности препроцессора DesignModeler. В результате была создана двумерная модель (2d), которая включает в себя конечную элементную сетку, состоящую из квадратных элементов. Такой выбор сетки обеспечивает хорошую точность расчетов и позволяет эффективно моделировать сложные геометрические формы. Разбиение расчетной области на конечные элементы было выполнено с использованием полуавтоматического метода, что значительно ускорило процесс сеточного разбиения и уменьшило вероятность ошибок, связанных с ручным вводом. Важным этапом подготовки модели является идентификация границ расчетной области. На этих границах в солвере устанавливаются граничные условия, которые определяют поведение жидкости на границах расчетной области.

В работе изучена двухмерная модель батарейного циклона ЦБ-16, предназначенного для эффективного отделения пыли из газового потока. Мультициклон состоит из 4-х рядов и 16 элементов (Ø245 мм) с полуулиточным подводом газа. Ступенчатое расположение циклонных элементов, где входные патрубки последующих рядов находятся ниже предыдущих, способствует лучшему распределению запыленного потока и улучшает условия для осаждения частиц. Нижние крышки входных патрубков последнего ряда интегрированы с нижней трубной доской, что упрощает конструкцию и обеспечивает эффективный вынос пыли. Запыленный газ поступает в мультициклон, пыль осаждается в бункере, а очищенный газ выводится. Особое внимание при проектировании уделено расположению полуулиточных входов.

В 1-м ряду ЦБ-16 (1335x445 мм) с полуулиточными препятствиями (Ø 245 мм) происходит осаждение пыли (0,5-45 мкм) из воздушного потока (4 м/с). Эффективность разделения обусловлена разницей в инерции частиц и газа. Исследование проводилось при стандартных условиях (20°C, 101325 Па), с использованием постоянных значений плотности ( $\rho=1,204$  кг/м<sup>3</sup>) и коэффициент

динамической вязкости ( $\eta=15,110^{-6}$  Па•с) воздуха для точного моделирования процесса сепарации [135].

#### 4.4. Выбор и построение расчетной сетки 2d- и 3d- моделей

На рисунке 4.2 представлена сгенерированная в геометрической модели расчетная квадратная неструктурированная сетка с шагом 5 мм.

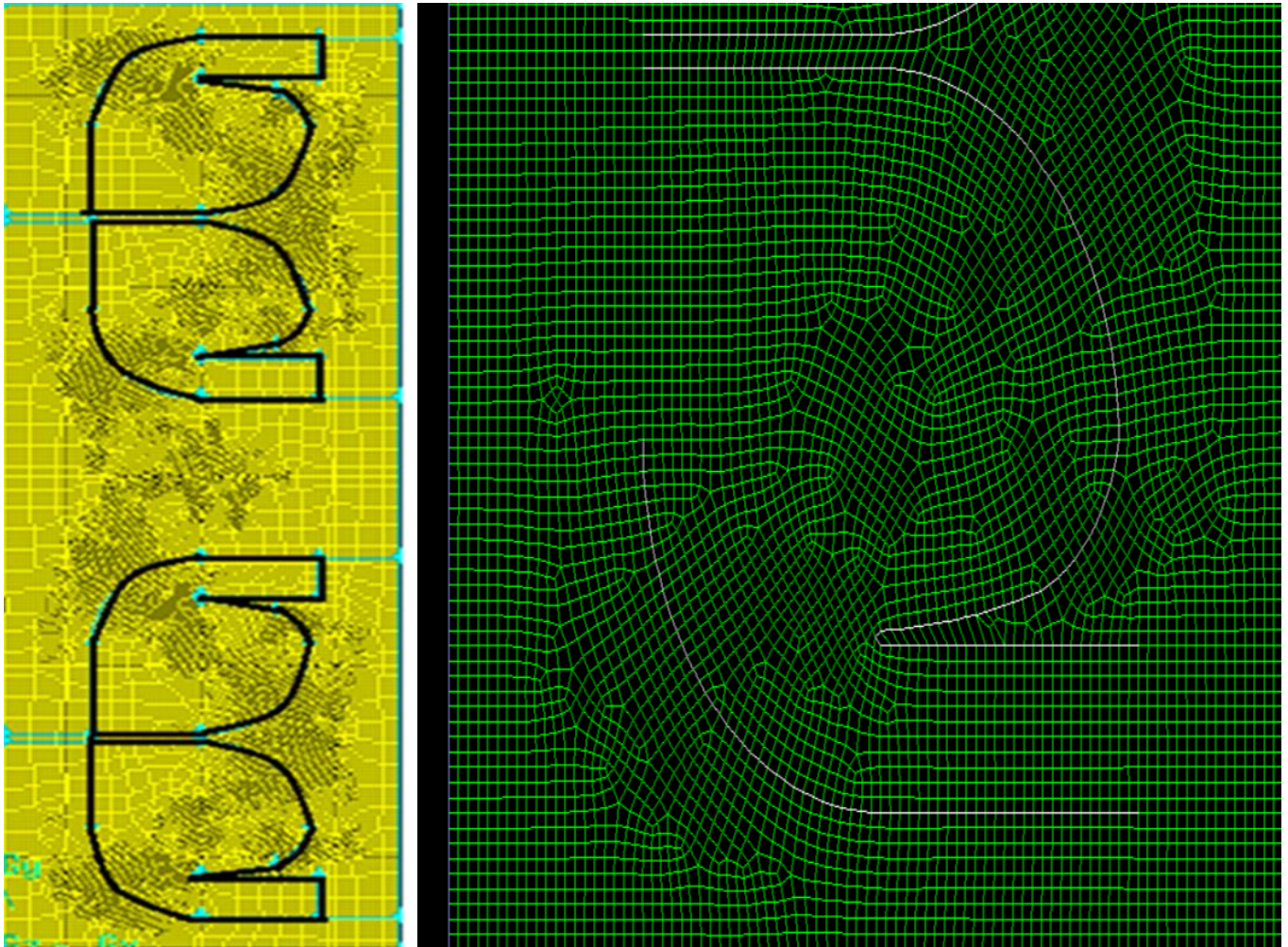


Рисунок 4.2. Пример построения геометрической модели и генерация сетки для первого ряда модуле КВОУ с циклонными элементами «циклон-фильтр» [46]

Такой тип сетки является общепринятым в современных численных исследованиях, поскольку он обеспечивает адекватное представление геометрических особенностей исследуемой области. Неструктурированные сетки,

как правило, используются в задачах, где необходимо учитывать сложные формы и детали, например, в аэродинамических расчетах или при моделировании потоков в сложных системах. Ключевым преимуществом неструктурированных сеток является их гибкость: они могут адаптироваться к изменяющимся условиям и сложным геометриям, что делает их особенно полезными для инженерных приложений. Сгенерированная в программе DesignModeler конечно-элементная сетка численной модели была экспортирована в солвер программного комплекса SpaceClaim Direct Modeler. ANSYS Fluent — это мощный инструмент для численного моделирования потоков жидкости и теплопередачи, который широко используется в научных и инженерных исследованиях. Эта модель имеет объемную конечно-элементную сетку, где максимальный объем ячейки составляет  $1,3710^{-4}$  м<sup>3</sup>, а минимальный —  $4,9410^{-8}$  м<sup>3</sup>. Такое распределение объемов ячеек позволяет более точно моделировать поведение потоков и взаимодействие частиц в различных зонах устройства. Количество ячеек в сетке составляет 63214 для исходной сетки и 546897 для адаптированной. Это значительное увеличение числа ячеек указывает на то, что проводилась адаптация сетки для повышения точности расчетов в критически важных областях, где ожидаются высокие градиенты поля. Кроме того, количество граней увеличилось с 146879 до 287456, а узлов — с 12547 до 43654, что также свидетельствует о более детальном представлении сложной геометрии. Для проверки успешности итерационного процесса мы следили за динамикой невязок. Невязка, представляющая собой количественную меру расхождения между расчетными и истинными значениями, служит критерием успешного завершения вычислений при её снижении. Для обеспечения сходимости итерационного цикла и минимизации риска расходимости, а также для оптимизации скорости вычислений, были определены начальные условия для дискретных областей модели [139]. Настройка модели завершилась достижением заданных уровней невязок, что потребовало 20000 итераций. Это число, хотя и варьируется в зависимости от сложности модели и требуемой точности, оказалось достаточным для получения стабильного и точного решения в данном случае.

#### 4.5. Устранение сеточных зависимостей 2d- и 3d- моделей

После завершения экспорта сетки в программном комплексе SpaceClaim Direct Modeler, был проведен тщательный анализ для устранения возможной сеточной зависимости. Это критически важный этап, поскольку качество сетки напрямую влияет на точность получаемых результатов. Для этого были проверены несколько ключевых параметров, таких как качество сетки, ее масштабирование и адаптация конечных элементов. Важно отметить, что для обеспечения корректности решения геометрические размеры модели должны строго соответствовать масштабу 1:1. Это значит, что все размеры в модели должны быть представлены в тех же единицах измерения, что и в реальной физической системе. В процессе проверки качества сетки особое внимание уделялось таким аспектам, как равномерность распределения элементов, их форма и размер, а также наличие возможных искажений, которые могут привести к ошибкам в расчетах. Кроме того, была проведена адаптация сетки в областях с высоким градиентом физических параметров, что позволяет улучшить точность расчетов в критических зонах. Для выполнения расчетов был выбран решатель на базе давления, который позволяет эффективно решать задачи, связанные с нестационарными процессами. Нестационарные задачи требуют применения "неявной" схемы решения, что обеспечивает стабильность и сходимость расчетов.

#### 4.6. Постановка исходных и граничных условий для 2d- и 3d- моделей

При настройке решения задачи задавались параметры непрерывной и дискретной фаз [46]. 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 [46]. Постановка граничных условий для дисперсной фазы имела следующую особенность. Непроницаемые поверхности элементов «циклон-фильтр» выполняли функцию улавливания частиц, а стенки корпуса – функцию их

отражения [140]. 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.

#### **4.7. Проведение численных исследований 2d- и 3d- геометрических моделей**

Для более глубокого понимания динамики потоков в циклонных сепараторах, были проведены расчеты, касающиеся скорости и давления потока на различных сечениях устройства. Исходные условия варьировались с входной скоростью потока от 3,5 до 20 м/с, что позволяет анализировать поведение потока при различных режимах работы циклона. При этом наблюдается, что скорость потока значительно уменьшается вблизи стенок циклона. Это явление связано с эффектом трения и взаимодействием потока с поверхностью устройства, что приводит к образованию пограничного слоя, где скорость потока ниже, чем в центральной части. Интересно, что максимальные значения скорости фиксируются именно на выходном сечении циклона, что указывает на то, что кинетическая энергия потока накапливается и усиливается по мере продвижения к выходу. На рисунке 4.3 представлены графики (эпюры) скорости и давления в продольном сечении модели циклона при входной скорости 3,5 м/с. Эти графики визуализируют изменения параметров потока и показывают расположение поперечных сечений, что позволяет более детально анализировать. После тангенциального входа поток воздуха, попадая в корпус циклона, начинает двигаться по спирали, создавая осесимметричное винтовое движение, которое направлено вниз. Это движение обусловлено конструкцией циклона, где воздух, входя под углом, начинает вращаться вокруг своей оси. Важной особенностью этого процесса является то, что после прохождения кольцевой зоны, где поток воздуха начинает уплотняться, вертикальная составляющая скорости потока

вблизи стенок корпуса начинает постепенно уменьшаться. овать распределение скорости и давления в различных точках устройства.

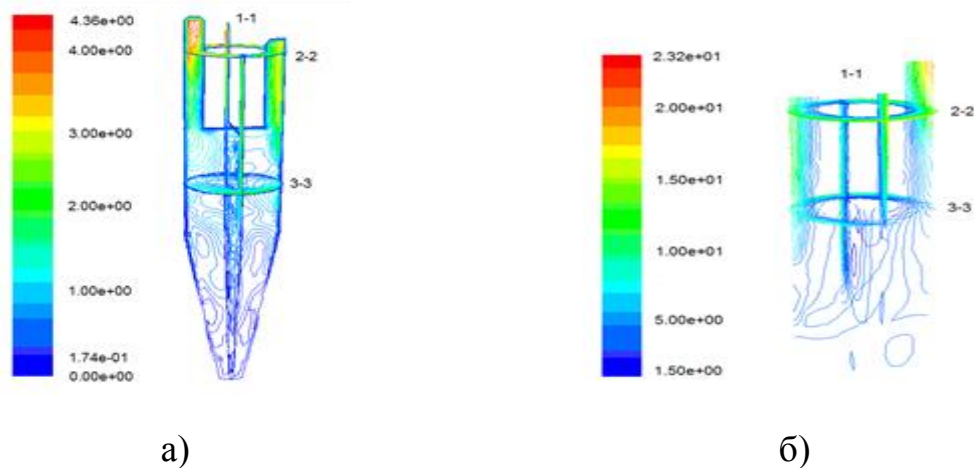


Рисунок 4.3. Распределение скорости потока (а) и давления (б), в пределах кольцевой зоны в продольном сечении циклона 1-1, 2-2 – поперечное сечение на входе циклона; 3-3 – поперечное сечение на выходе потока из кольцевой зоны циклона [46]

Это снижение скорости происходит из-за увеличения давления в сужающейся конической части циклона. Коническая форма циклона играет ключевую роль в его работе, так как она способствует конвертации кинетической энергии потока в потенциальную. При движении воздуха вниз, его скорость уменьшается, а давление, наоборот, возрастает, что связано с законом Бернулли. В результате этого процесса в нижней части циклона образуется область с повышенным давлением, что создает условия для отделения твердых частиц или капель жидкости от газа.

На рисунке 4.4 показаны изобарические поверхности на входе в кольцевую зону (сечение 2-2) и на выходе из нее (сечение 3-3).

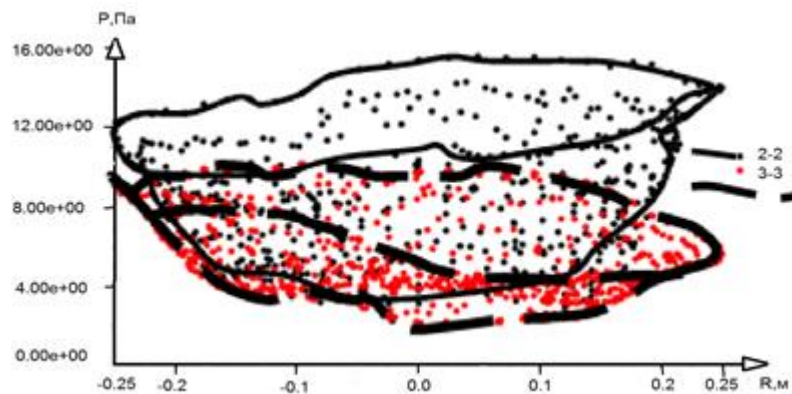


Рисунок 4.4. Распределение давления на входе (сечение 1-1) и выходе (сечение 2-2) кольцевой зоны циклона [46]

В процессе исследования наблюдается снижение давления на выходе из модуля КВОУ с циклонными элементами «циклон-фильтр» по сравнению с его входом, в среднем на 10-12 Па. Это явление является важным аспектом работы циклонных систем, так как оно может влиять на эффективность очистки и общий расход энергии. В рамках численного эксперимента был изучен возвратно-поточный элемент модуля КВОУ с циклонными элементами «циклон-фильтр» с диаметром 500 мм. Такой диаметр позволяет достичь оптимальных характеристик разделения частиц и улучшает качество очистки газов от твердых частиц. Результаты эксперимента показывают, что использование модуля КВОУ с циклонными элементами «циклон-фильтр» с дополнительным конструктивным элементом, а именно тканым фильтром из лавсана, значительно повышает эффективность работы системы. Лавсан, благодаря своим физико-химическим свойствам, обладает высокой прочностью и стойкостью к химическим воздействиям, что делает его идеальным материалом для фильтров. Это дополнение позволяет значительно увеличить площадь фильтрации, что, в свою очередь, способствует более качественному удалению мелкодисперсных частиц из потока газа. В связи с вышеизложенным, можно рекомендовать внедрение

исследованного циклонного элемента с тканым фильтром в качестве составной части в модуле КВОУ с циклонными элементами «циклон-фильтр» ЦБ-16.

Понимание эффективного расположения циклонных элементов в модуле КВОУ с циклонными элементами «циклон-фильтр», таком как ЦБ-16, является ключевым для повышения его эффективности и продуктивности. Численные исследования при фиксированной скорости входа запыленного потока газа в 4 м/с позволяют сосредоточиться на влиянии конфигурации и размещения циклонных элементов на процессах осаждения частиц и общей энергоэффективности. В связи с этим проведены численные эксперименты в модуле КВОУ с циклонными элементами «циклон-фильтр».

В первом эксперименте моделировалось стандартное расположение циклонных элементов внутри модуля КВОУ с циклонными элементами «циклон-фильтр», характеризующееся равномерным шагом между ними. Рисунок 4.5 иллюстрирует распределение статического давления в горизонтальном сечении этой конструкции. Численное моделирование, включавшее решение уравнений Навье-Стокса с учетом турбулентности, показало, что максимальные значения давления наблюдаются не только в лобовой части циклонных элементов первого ряда, но и во всех последующих рядах. Это подтверждает наличие эффекта взаимного влияния циклонов, где поток, пройдя через один циклон, влияет на характеристики потока в соседних элементах. Наблюдаемые максимумы давления обусловлены замедлением потока перед лобовой частью каждого циклона, что приводит к образованию зоны повышенного давления. Примечательно, что величина этих максимумов может варьироваться в зависимости от ряда, отражая постепенное снижение кинетической энергии потока по мере его движения через модуль КВОУ с циклонными элементами «циклон-фильтр». Это снижение связано с потерями энергии на преодоление сил трения и вихреобразование внутри циклонов. Более того, распределение давления зависит от ряда факторов, включая диаметр циклонов, расстояние между ними, геометрию входного патрубка и скорость потока.

Результаты исследования дают основу для совершенствования конфигурации входов циклонных аппаратов. Для более детального анализа проведена серия экспериментов с различными параметрами конструкции, чтобы определить оптимальную конфигурацию, обеспечивающую максимальную эффективность разделения и минимальные потери давления.

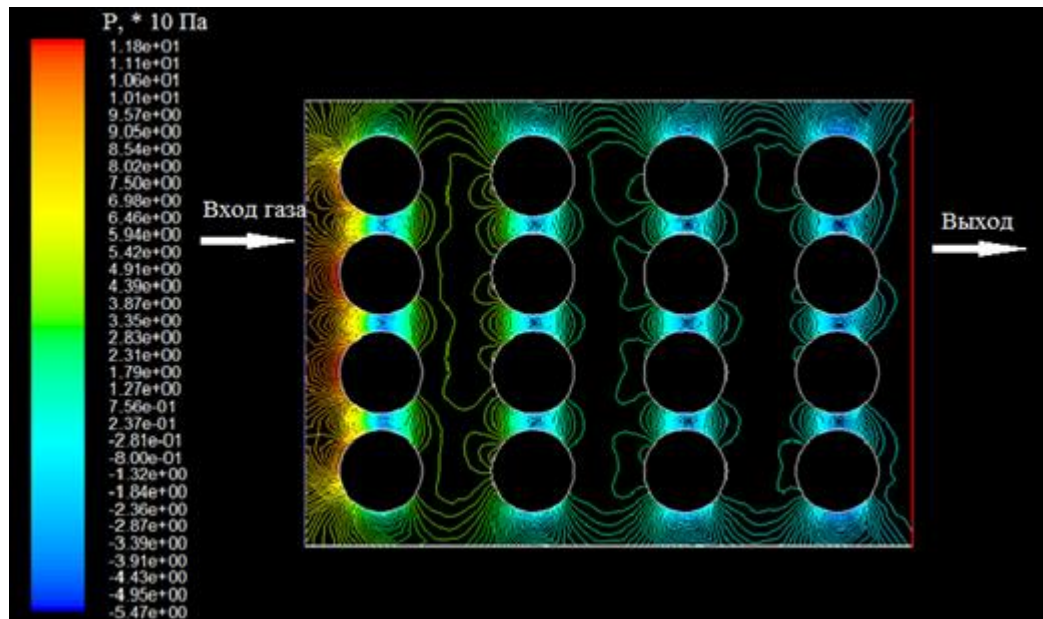


Рисунок 4.5. Распределение статического давления в модуле КВОУ с циклонными элементами «циклон-фильтр»

Анализ эпюр скорости в сечении модуля КВОУ с циклонными элементами «циклон-фильтр», представленный на рисунке 4.6, выявил существенное превышение скоростных параметров в межэлементных пространствах. Это явление напрямую связано с эффектом сужения потока, возникающим между отдельными циклонными элементами. Уменьшение площади проходного сечения приводит к локальному увеличению скорости газового потока в соответствии с принципом сохранения расхода. Важно отметить, что характер распределения скорости не является равномерным и сильно зависит от геометрии циклона, расстояния между элементами и их формы. Например, использование циклонных элементов с заостренными краями может приводить к более резкому сужению потока и, как следствие, к еще более высоким скоростям в межэлементных зонах.

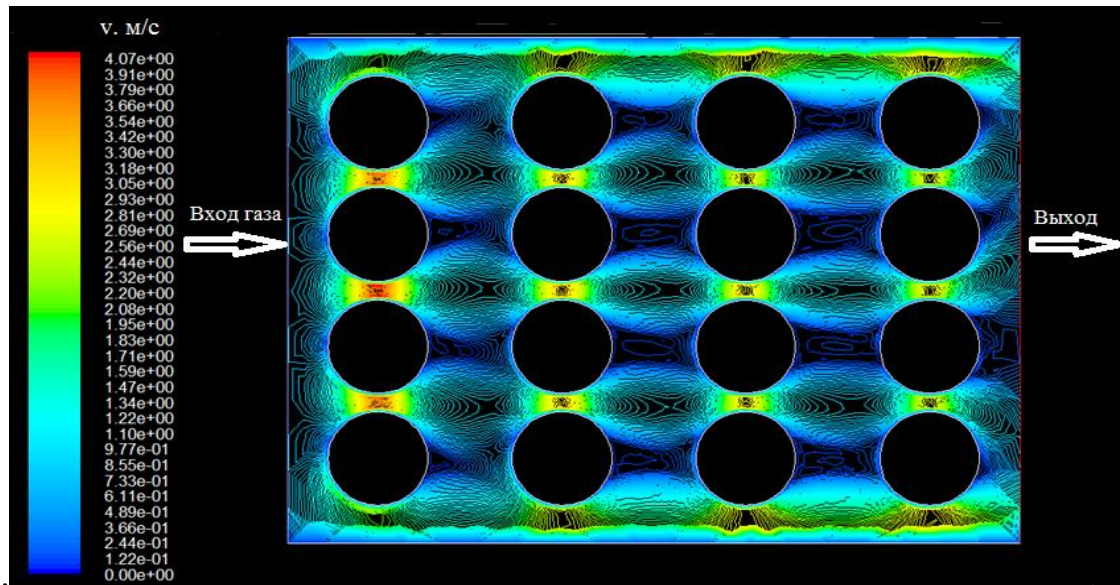


Рисунок 4.6. Распределение скорости в модуле КВОУ с циклонными элементами «циклон-фильтр»

Второй численный эксперимент, моделирующий расположение циклонных элементов непосредственно у стенок модуля КВОУ с циклонными элементами «циклон-фильтр» (рисунок. 4.7, 4.8), предоставил дополнительную информацию о распределении скорости и статического давления.

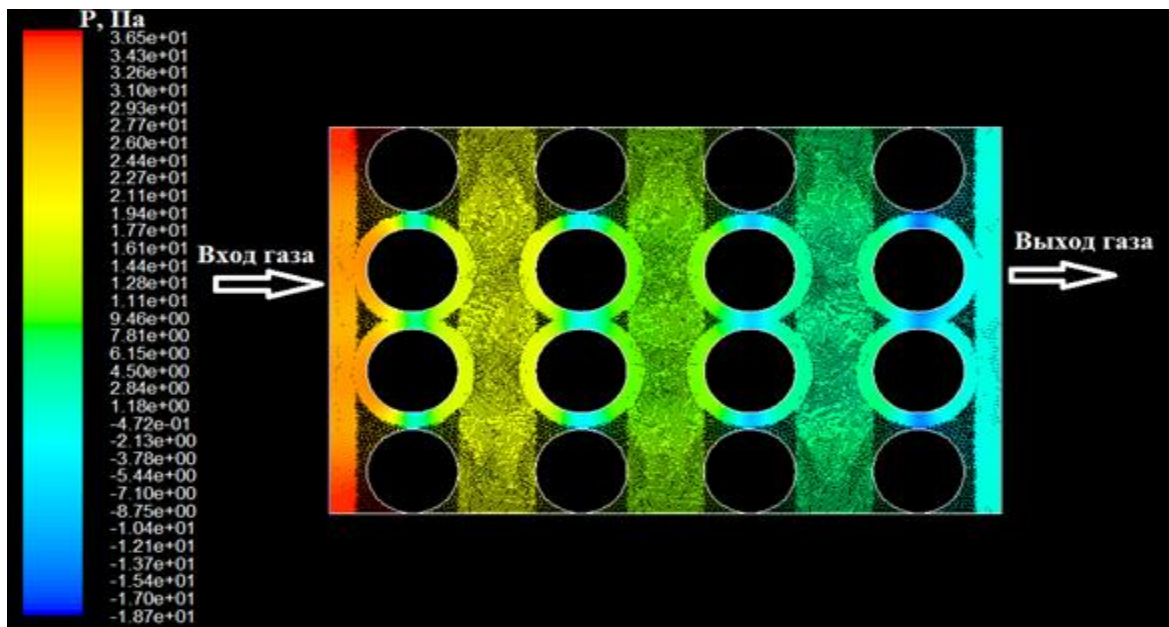


Рисунок 4.7. Распределение статического давления во второй модели модуле КВОУ с циклонными элементами «циклон-фильтр»

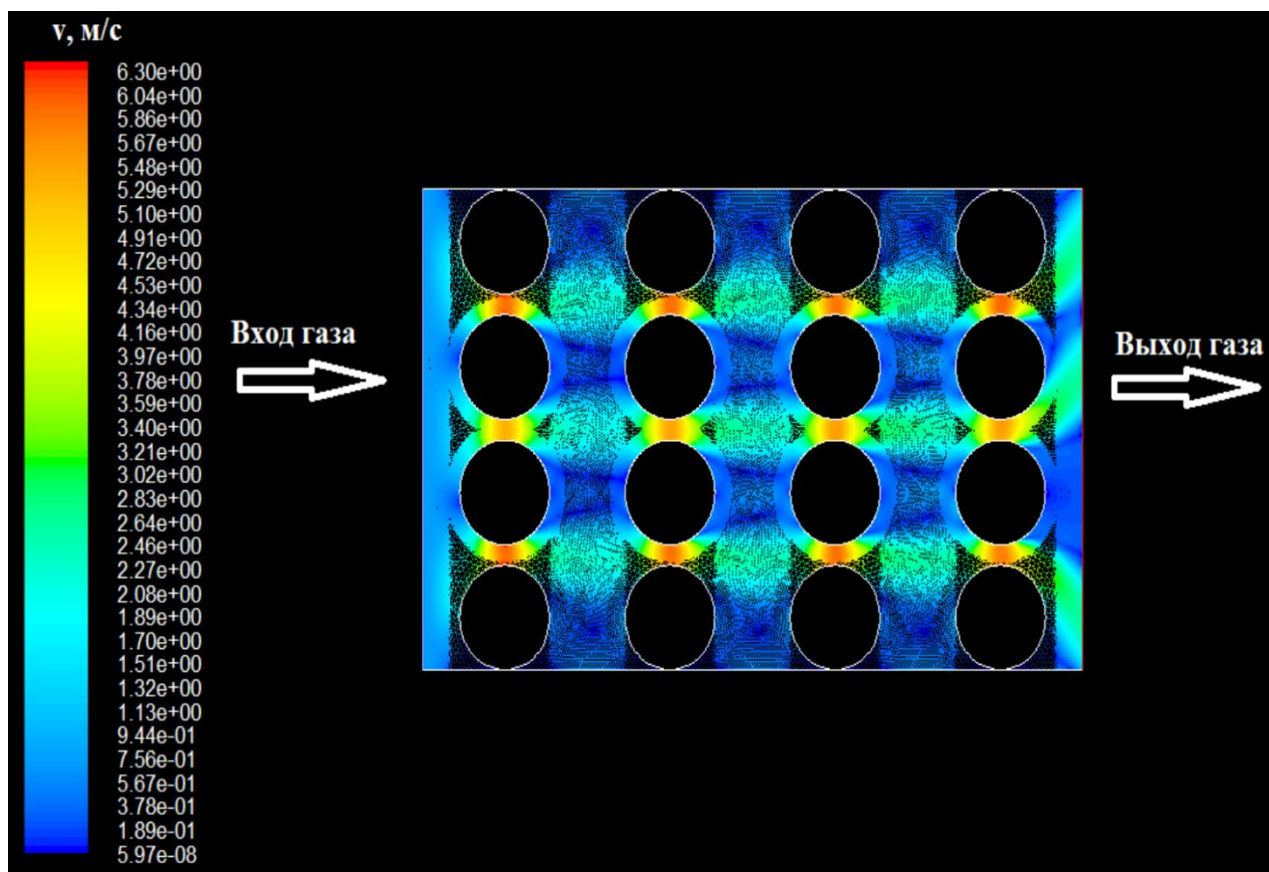


Рисунок 4.8. Эпюры скорости во второй модели модуле КВОУ с циклонными элементами «циклон-фильтр»

Результаты показали, что максимальные значения давления наблюдаются в лобовой части элементов во всех рядах. Это ключевой момент для оптимизации конструкции, поскольку позволяет более точно рассчитывать и контролировать аэродинамическое сопротивление, возникающее при движении потока через модуль КВОУ с циклонными элементами «циклон-фильтр».

Наибольшие значения скоростей наблюдаются между циклонными элементами, что объясняется сужением потока между ними. Локализация зон максимального давления также позволяет оптимизировать конструкцию полуулиточных входов в циклонные элементы. Правильное проектирование входа обеспечивает эффективное распределение потока, минимизируя потери энергии и улучшая эффективность пылеулавливания. Использование CFD моделирования позволяет детально изучить влияние различных параметров впускного отверстия, таких как угол наклона, форма и размер, на эффективность разделения потока. Сравнительный анализ двух моделей (рисунок 4.6 и рисунок 4.8) показал

существенные различия в распределении скорости и давления в рабочем пространстве. Несмотря на одинаковый расход на входе, модель на рисунке 4.8 демонстрирует более высокие значения как скорости, так и давления в межэлементных пространствах. Это объясняется тем, что во второй модели поток практически полностью концентрируется в этих зонах. В модели на рисунке 4.6 значительная часть потока проходит вдоль стенок корпуса модуля КВОУ с циклонными элементами «циклон-фильтр», что создает меньшее сопротивление по сравнению с областью между элементами. Данное явление подчеркивает важность учета влияния стенок корпуса на общее аэродинамическое сопротивление системы.

Более того, детальный анализ выявил, что зоны, расположенные у стенок корпуса и между циклонными элементами, представляют собой местные сопротивления, аналогичные одностороннему внезапному сужению и внезапному расширению потока. Эти явления приводят к значительным потерям энергии и могут негативно влиять на эффективность пылеулавливания. Понимание природы этих локальных сопротивлений позволяет оптимизировать геометрию модуля КВОУ с циклонными элементами «циклон-фильтр», минимизируя их влияние. В частности, можно изменять форму и расположение элементов, чтобы сгладить переходы и снизить интенсивность вихреобразования в этих критических зонах. Использование дополнительных ребер жесткости или изменение профиля стенок корпуса может существенно повлиять на характеристики потока. Разработанная численная модель модуля КВОУ с циклонными элементами «циклон-фильтр» позволила оценить влияние множества факторов на эффективность пылеулавливания. Помимо геометрии элементов и их расположения, модель учитывает такие параметры, как вязкость газа, плотность пыли, размер частиц пыли, а также скорость потока на входе. Разработанная методика оценки эффективности позволяет анализировать влияние каждого фактора в отдельности, что дает возможность оптимизировать конструкцию модуля КВОУ с циклонными элементами «циклон-фильтр» для конкретных условий эксплуатации.

Полученные результаты исследования позволили разработать методику

оптимизации расположения входов в циклонные элементы. Это включает в себя не только выбор оптимального угла наклона, но и определение оптимального расположения самих входов относительно друг друга и относительно стенок корпуса. Например, можно исследовать влияние расположения входов в шахматном порядке или по прямой линии. Использование различных типов входов также может значительно влиять на эффективность пылеулавливания. В свою очередь, оптимизированное расположение входов в сочетании с оптимизированной геометрией циклонных элементов и корпуса может значительно повысить эффективность всего устройства.

После определения наиболее больших значений давления на циклонных элементах в численных опытах 1 и 2, в соответствии с полученными результатами было решено установить полуулиточные входы циклонных элементов именно в тех частях циклонов, где наибольшие значения давления (рисунок 4.9).

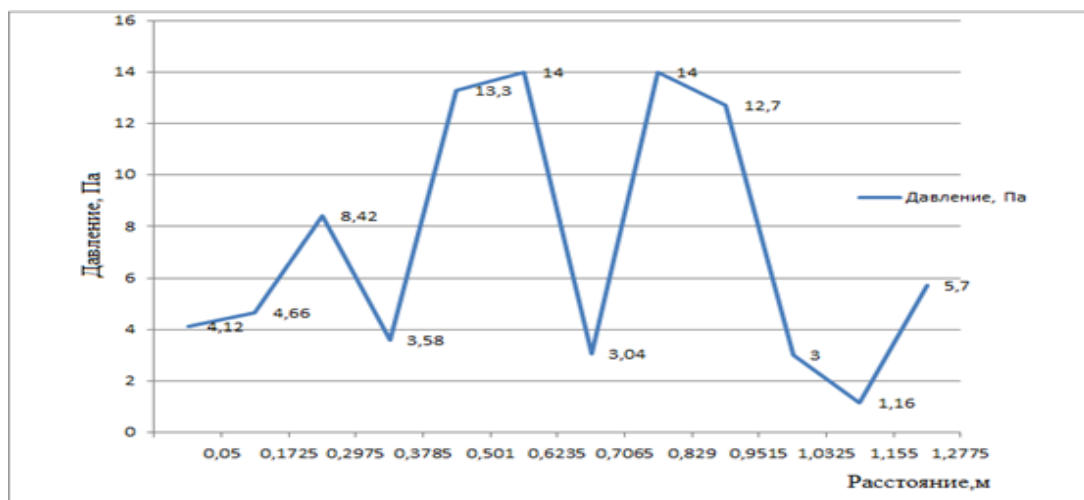


Рисунок 4.9. Изменение величины давления перед циклонными элементами первого ряда модуля ВОУ

Оптимизация конструкции модуля КВОУ с циклонными элементами «циклон-фильтр» – сложная задача, требующая учета множества факторов, влияющих на эффективность пылеулавливания. Исследование фокусировалось на определении оптимального расположения полуулиточных циклонных элементов внутри корпуса модуля КВОУ с циклонными элементами «циклон-фильтр». Эта

геометрическая конфигурация является ключевой для обеспечения равномерного распределения газового потока и эффективного разделения твердой и газовой фаз. Выбор именно полуулиточных элементов обусловлен их сравнительно высокой эффективностью при умеренных габаритных размерах, что особенно актуально для ограниченных пространств. Исследование проводилось в несколько этапов с использованием численного моделирования. Первый этап включал в себя аэродинамический анализ потока чистого воздуха (без твердых частиц) для оценки характера течения газа в различных конфигурациях при начальной скорости 4 м/с. Это позволило оценить распределение скорости и давления в корпусе модуля КВОУ с циклонными элементами «циклон-фильтр», выявить зоны завихрений и определить области потенциального повышения эффективности пылеулавливания.

Численные исследования аэродинамики модуля КВОУ с циклонными элементами «циклон-фильтр» демонстрируют распределение скоростей в горизонтальном сечении при использовании чистого воздуха. Эти эксперименты были направлены на изучение поведения потока как при прохождении через циклонные элементы, так и при их обтекании. Рисунок 4.10 иллюстрирует результаты опыта №3, в котором полуулиточные элементы были равномерно распределены внутри корпуса циклона. Анализ распределения скоростей показывает, что для поступающего дисперсного потока газа элементы модуля КВОУ с циклонными элементами «циклон-фильтр» выступают в роли массива препятствий, создающих местные сопротивления, аналогичные одностороннему внезапному сужению и расширению потока. Оценка потерь давления с использованием общепринятых эмпирических формул подтвердила физическую адекватность использованной аэродинамической модели.

Расчеты, выполненные на основе данных третьего опыта (рисунок 4.10), выявили максимальные скорости (17 м/с) в зонах между циклонными элементами. Заметное увеличение скорости (13 м/с) также наблюдалось вблизи стенок модуля КВОУ с циклонными элементами «циклон-фильтр».

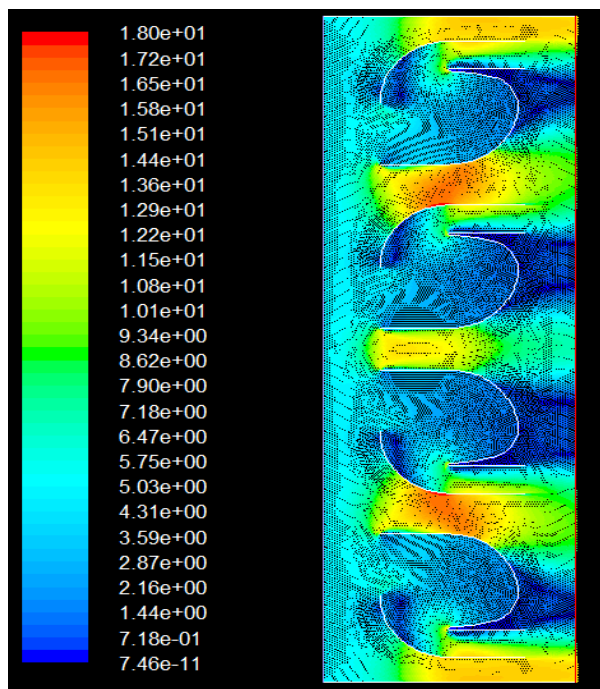


Рисунок 4.10. Распределение скорости воздуха в первом ряду модуля КВОУ с циклонными элементами «циклон-фильтр» в третьем опыте [46]

Это свидетельствует о том, что значительная часть потока проходит по периферии, используя пути с наименьшим сопротивлением – между элементами и у стенок корпуса. Максимумы давления, естественно, сосредоточены на лобовых поверхностях элементов, в то время как пиковые скорости наблюдаются в свободных промежутках между ними. Такое неравномерное распределение потока при равномерном расположении элементов указывает на непродуктивное распределение энергии: большая часть потока обходит элементы, затрачивая при этом значительную часть своей кинетической энергии. Это приводит к низкой эффективности разделения дисперсной фазы и снижению эффективности очистки газа.

На основе проведённых расчётов, учитывающих траектории движения твёрдых частиц различных размеров, были выбраны оптимальные варианты размещения фильтрующих циклонных элементов. Поскольку распределение потока в третьей модели по полуулиточным элементам оказалось неравномерным, была рассмотрена четвертая модель с зеркальным размещением пар циклонных элементов [139]. Данная конфигурация (рисунок 4.11) способствует более

равномерному распределению воздушного потока по полуулиточным циклонным элементам.

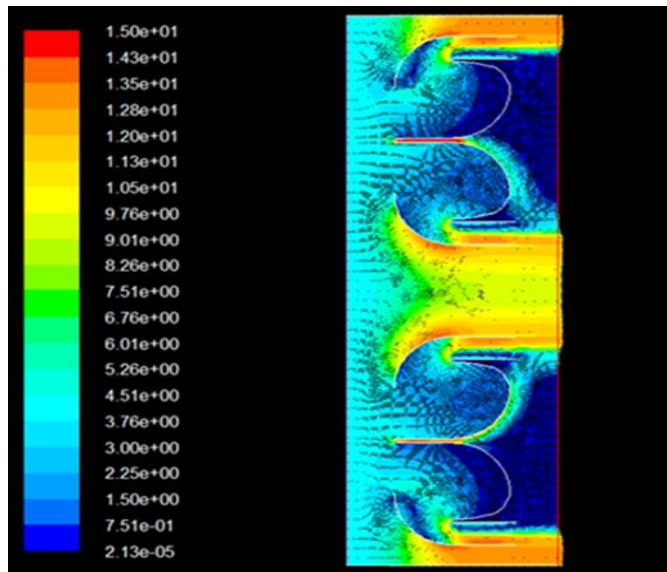


Рисунок 4.11. Распределение скорости воздуха в первом ряду модуля КВОУ с циклонными элементами «циклон-фильтр» в четвертом опыте [46]

Несмотря на то, что максимальные значения скорости (15 м/с) наблюдаются в зонах между циклонными элементами, отмечено также увеличение скорости (13 м/с) при выходе из циклонных элементов (рисунок 4.12).

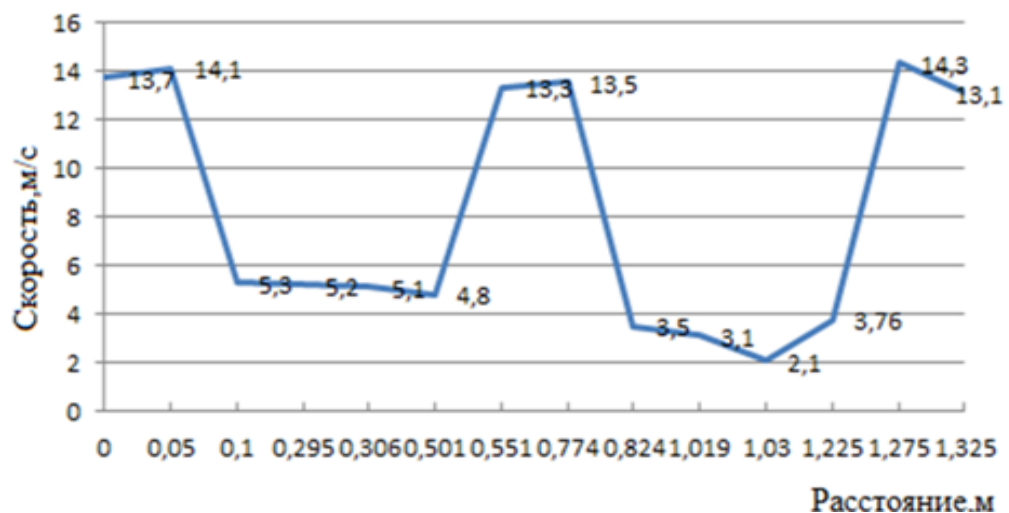


Рисунок 4.12. Изменение величины скорости на выходе из циклонных элементов первого ряда модуля ВОУ

Расположение циклонов первого ряда, полученное в ходе исследования, будет использовано для дальнейших расчетов.

В процессе исследования эффективности работы модуля КВОУ с циклонными элементами «циклон-фильтр», результаты предыдущих экспериментов с первым рядом циклонных элементов послужили основой для проведения пятого и шестых опытов, в котором была изменена расстановка циклонных элементов во втором ряду (рисунок 4.13 и рисунок 4.14). В данном эксперименте было решено установить крайние циклонные элементы второго ряда вплотную к стенкам корпуса устройства. Это решение было принято с целью оптимизации улавливания потока воздуха, который выходил из циклонных элементов первого ряда, при этом начальная скорость составляет 3 м/с. На рисунке 4.13 представлена схема, иллюстрирующая данную конфигурацию.

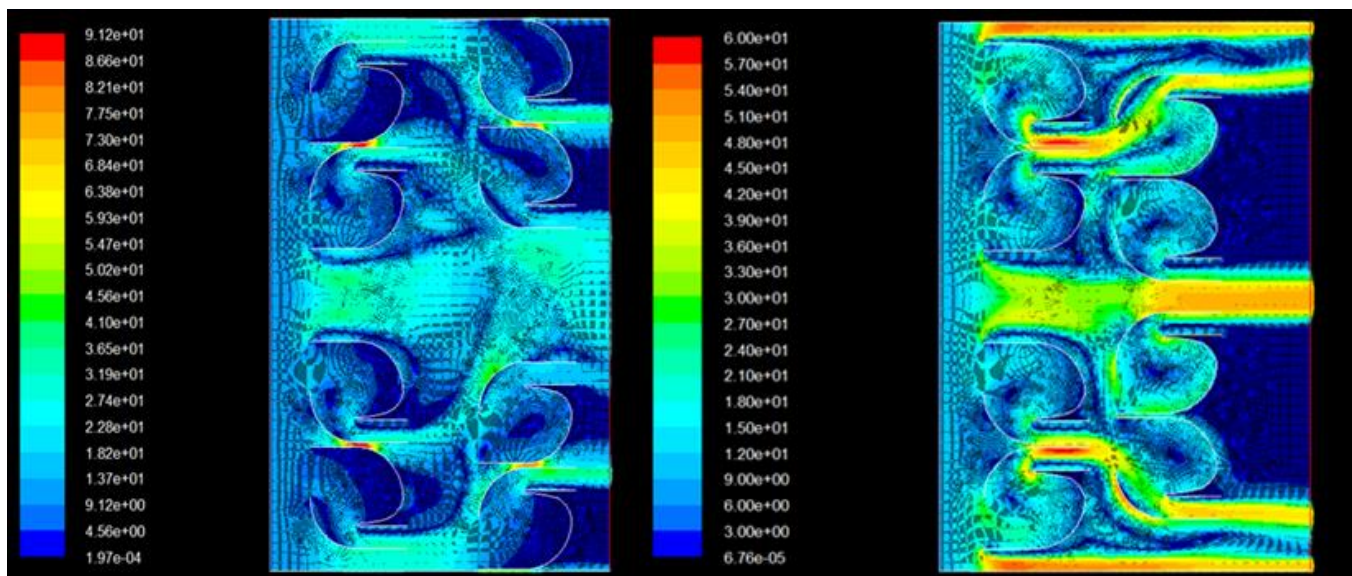


Рисунок 4.13 Распределение скорости воздуха в двух рядах мультициклона в пятом опыте [46]

Рисунок 4.14. Распределение скорости воздуха в двух рядах мультициклона в шестом опыте [46]

Перед запуском данного численного расчета были установлены те же граничные условия, что и в предыдущих испытаниях с первым рядом циклонов. В частности, начальная скорость потока воздуха была принята равной 3 м/с.

Результаты расчетов показали, что основной поток воздуха движется вдоль

стенок модуля КВОУ с циклонными элементами «циклон-фильтр», а также между вторым и третьим циклонными элементами первого ряда. Это указывает на то, что эффективность работы первого ряда циклонов существенно влияет на распределение потока во втором ряду. Наиболее высокие значения скорости потока (до 90 м/с) наблюдались именно между попарными циклонными элементами первого ряда, что подтверждает их активное участие в процессе разделения частиц. Поток воздуха в циклонные элементы второго ряда поступал не полностью, проходя между элементами. Это обстоятельство стало основанием для проведения седьмого эксперимента.

В седьмом опыте входы в циклонные элементы второго ряда были расположены максимально близко к выходам циклонных элементов первого ряда. Это изменение позволило значительно улучшить условия для поступления воздуха во второй ряд (рисунок 4.14).

Результаты расчетов показали, что максимумы скорости потока теперь наблюдаются не только около стенок корпуса, но и на выходных отверстиях циклонных элементов, где скорость достигает впечатляющих 60 м/с. Эти данные свидетельствуют о том, что поток воздуха в обоих рядах циклонов стал более равномерным и интенсивным. Дополнительно в самих циклонных элементах обоих рядов скорость потока варьировалась в пределах 15-24 м/с, что также является положительным результатом, указывающим на эффективность работы всей конструкции. Однако, несмотря на улучшения, расчеты выявили, что значительная часть потока воздуха со скоростью 42 м/с уходит через промежуток между вторым и третьим циклонными элементами обоих рядов модуля КВОУ с циклонными элементами «циклон-фильтр». Это подчеркивает необходимость дальнейшего анализа и оптимизации конфигурации циклонов для достижения максимальной эффективности улавливания, а проведенные эксперименты продемонстрировали, что правильная расстановка циклонных элементов и их взаимное расположение играют ключевую роль в оптимизации работы модуля КВОУ с циклонными элементами «циклон-фильтр». Далее проведены дополнительные эксперименты с различными конфигурациями и условиями,

чтобы еще больше повысить эффективность улавливания частиц и улучшить общую производительность устройства [140].

В седьмом эксперименте была использована новая геометрическая конфигурация для модуля КВОУ с циклонными элементами «циклон-фильтр», в которой элементы первого ряда с полуулиточной формой были заменены на сплошные элементы круглого сечения (рисунок 4.15).

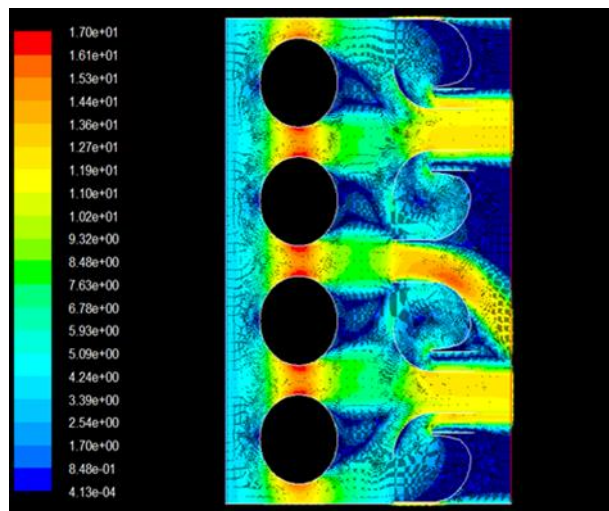


Рисунок 4.15. Распределение скорости воздуха в двух рядах модуля КВОУ с циклонными элементами «циклон-фильтр» в седьмом опыте [46]

Это решение было принято для того, чтобы обеспечить более эффективное движение потока воздуха, позволяя ему обтекать препятствия, не проникая внутрь них. Элементы круглого сечения были установлены на тех же координатах, что и полуулиточные элементы, сохраняя одинаковое расстояние между собой, что обеспечивало однородность и предсказуемость поведения потока (рисунок 4.15). Циклонные элементы второго ряда также были размещены на равных интервалах друг от друга, но с максимальным приближением крайних элементов к стенкам корпуса устройства. Это было сделано для того, чтобы минимизировать мертвые зоны и улучшить эффективность работы системы. Поток воздуха в системе двигался с постоянной скоростью 4 м/с. При этом наблюдались значительные колебания скорости: максимальные значения, достигающие 17 м/с,

фиксируются между циклонными элементами, в то время, как минимальные значения, равные 0,0004 м/с, наблюдались в теневых зонах, образованных самими циклонными элементами.

С учетом полученных аэродинамических характеристик и схемы движения потока был проведен восьмой эксперимент (рисунок 4.16).

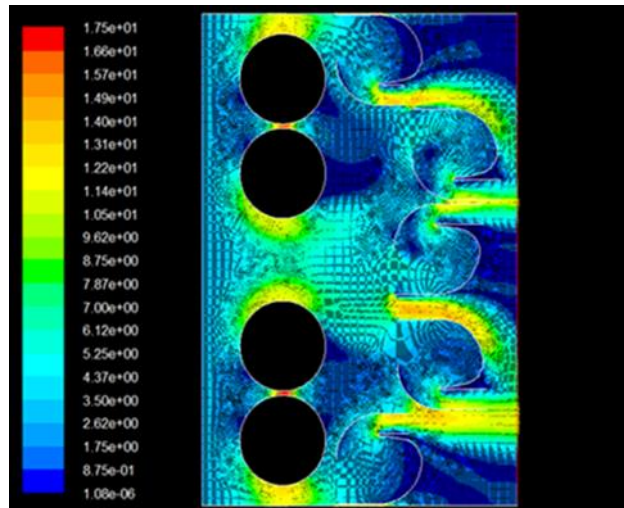


Рисунок 4.16. Распределение скорости воздуха в двух рядах модуля КВОУ с циклонными элементами «циклон-фильтр» в восьмом опыте [46]

В этом эксперименте в первом ряду средние циклонные элементы были максимально приближены к крайним, чтобы улучшить взаимодействие потоков. Во втором ряду расположены пять циклонных элементов для оптимального приема потока воздуха из первого ряда. Такой подход к проектированию и размещению элементов позволяет значительно повысить эффективность работы модуля КВОУ с циклонными элементами «циклон-фильтр», что особенно важно в промышленных системах очистки воздуха и пылеуловителей. Подобные эксперименты помогают лучше понять динамику потоков и оптимизировать конструкции для достижения максимальной производительности. Важно отметить, что каждый из этапов эксперимента требует тщательного анализа полученных данных, что позволяет делать выводы о целесообразности применяемых решений и вносить необходимые корректировки в будущем.

исследования. Таким образом, результаты восьмого эксперимента стали основой для дальнейших разработок и усовершенствований в области аэродинамики и систем фильтрации.

На рисунке 4.16 также видно, что минимальные значения скорости наблюдаются в теневых областях циклонных элементов. Это связано с тем, что в этих зонах поток воздуха ослабляется из-за особенностей конструкции и взаимодействия с элементами. Напротив, максимальная скорость потока достигает 17 м/с в промежутках между сплошными элементами круглого сечения в первом ряду (рисунок 4.17).

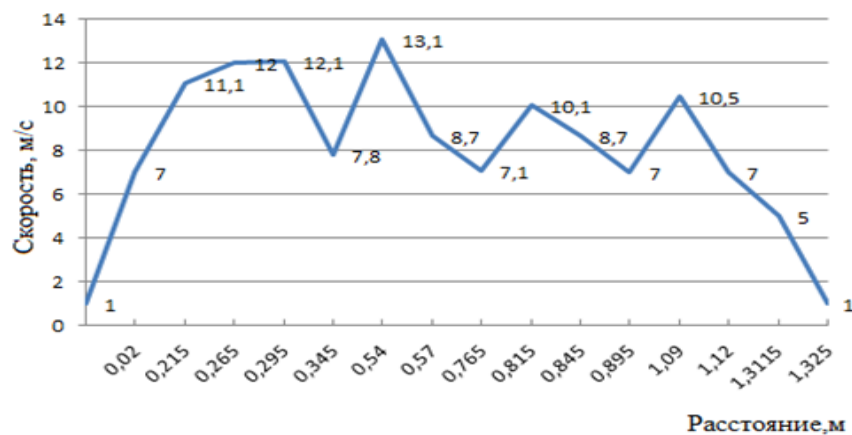


Рисунок 4.17. Изменение величины скорости на выходе из циклонных элементов второго ряда модуля ВОУ

Данные результаты подтверждают корректность применения метода замены предыдущего ряда сквозных полуулиточных элементов на сплошные круглые элементы с аналогичным диаметром. Это решение позволило оптимизировать поток и улучшить характеристики системы. На основании полученных данных был сделан вывод о том, что данная конфигурация расстановки циклонных элементов для двух рядов модуля КВОУ с циклонными элементами «циклон-фильтр» является наиболее эффективной и будет использоваться для дальнейших расчетов. Это подтверждает, что выбранный подход к исследованию влияет на эффективность работы системы в целом.

На рисунке 4.18 можно наблюдать следы частиц, проходящих через первый ряд элементов модуля КВОУ с циклонными элементами «циклон-фильтр», где расстановка соответствует эксперименту 3.

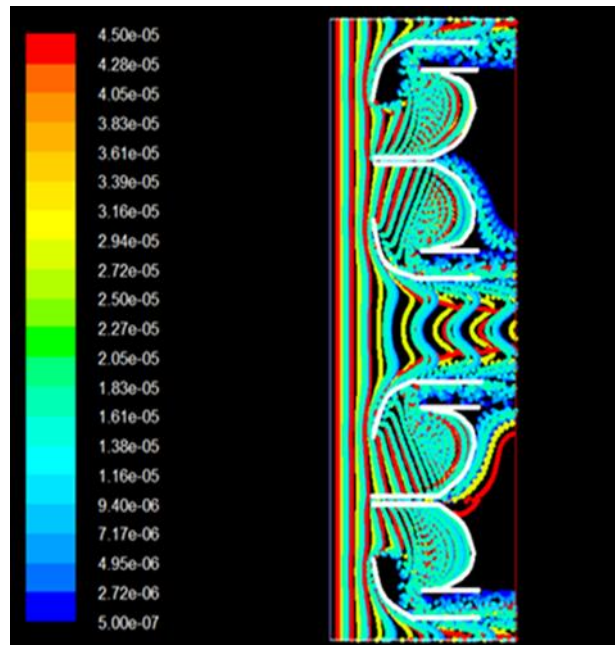


Рисунок 4.18. Следы частиц, окрашенных по диаметру частиц в первом ряду модуля КВОУ с циклонными элементами «циклон-фильтр» [46]

Важно отметить, что эффективность улавливания пыли в первом ряду обусловлена инерционным эффектом, который играет ключевую роль в процессе разделения частиц от потока воздуха. Этот эффект позволяет частицам, обладающим большей массой, отклоняться от основного потока и оседать на стенках циклонных элементов. Данные о количестве частиц, вышедших из канала, были получены в результате тщательного отслеживания и анализа. Отчет по процедуре отслеживания частиц предоставляет ценную информацию о том, насколько эффективно система справляется с задачей улавливания пыли. Важно отметить, что подобные исследования не только подтверждают теоретические предположения, но и открывают новые горизонты для дальнейших разработок в области очистки воздуха и улучшения экологической ситуации в промышленных зонах. Таким образом, результаты, полученные в ходе экспериментов,

подчеркивают значимость правильной расстановки элементов в системах модулей КВОУ с циклонными элементами «циклон-фильтр», а также необходимость дальнейших исследований для оптимизации процессов улавливания частиц и повышения общей эффективности систем очистки.

На рисунке 4.19 представлены следы частиц, образующихся в результате работы двухфазного потока, который проходит через второй ряд циклонных элементов. В ходе исследования было установлено количество пыли, уловленной благодаря инерционному эффекту, что также отражено в отчете о процедуре отслеживания частиц.

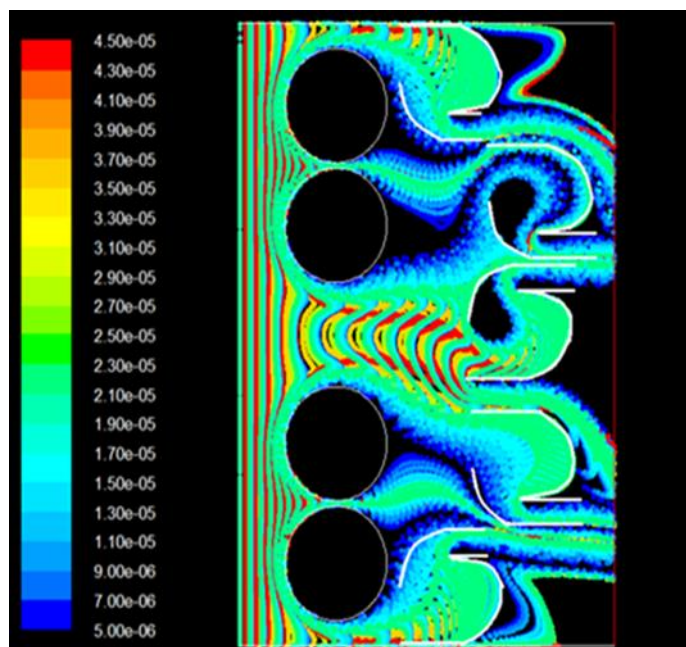


Рисунок 4.19. Следы частиц, окрашенных по диаметру частиц в первых двух рядах модуля КВОУ с циклонными элементами «циклон-фильтр» [46]

На рисунке 4.20 представлен третий ряд модуля КВОУ с циклонными элементами «циклон-фильтр». По результатам расчетов, полученных для первых двух рядов модуля, циклонные элементы второго ряда заменены на круглые элементы по аналогии с первым рядом. Кроме этого, для того чтобы уловить максимально поток после второго ряда расставлены максимально эффективно циклонные элементы третьего ряда.

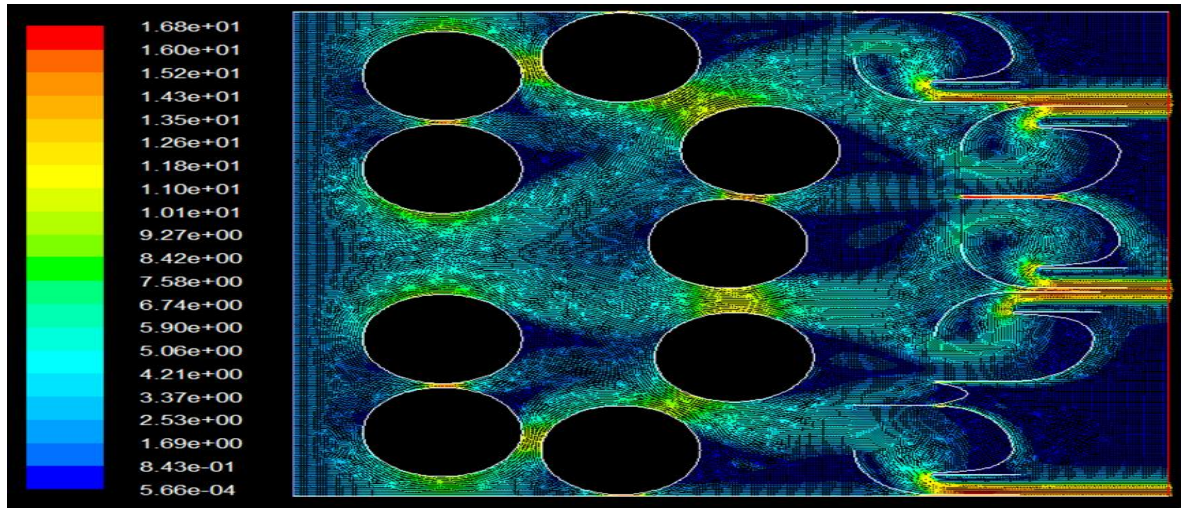


Рисунок 4.20. Распределение скорости воздуха в третьем ряду модуля КВОУ с циклонными элементами «циклон-фильтр» в девятом опыте

Необходимо отметить, что между четвертым и пятым циклонным элементом установлена перегородка, которая не дает потоку пройти мимо циклонных элементов, так как расстояние между всеми элементами принято примерно одинаковым. Начальная скорость для третьего ряда в эксперименте 9 принята 1,96 м/с.

Из рисунка 4.21 видно, что максимумы скорости воздуха 16,8 м/с, который проходит через полуулиточные элементы, приходится на выходные патрубки, что говорит об эффективном расположении циклонных элементов и позволяет принять данную расстановку элементов для четвертого ряда модуля.

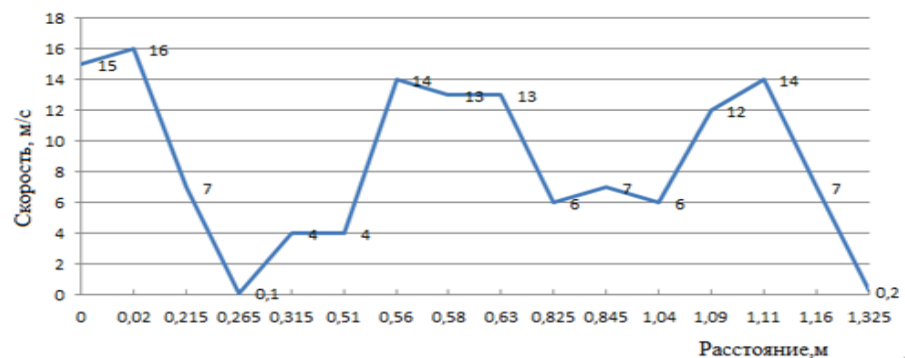


Рисунок 4.21. Изменение величины скорости на выходе из циклонных элементов третьего ряда модуля ВОУ

Результаты девятого эксперимента позволили оптимизировать расположение циклонных элементов в десятом эксперименте (рисунок 4.22). Было выявлено, что для максимальной эффективности улавливания воздушного потока с начальной скоростью 1 м/с достаточно трех элементов в четвертом ряду.

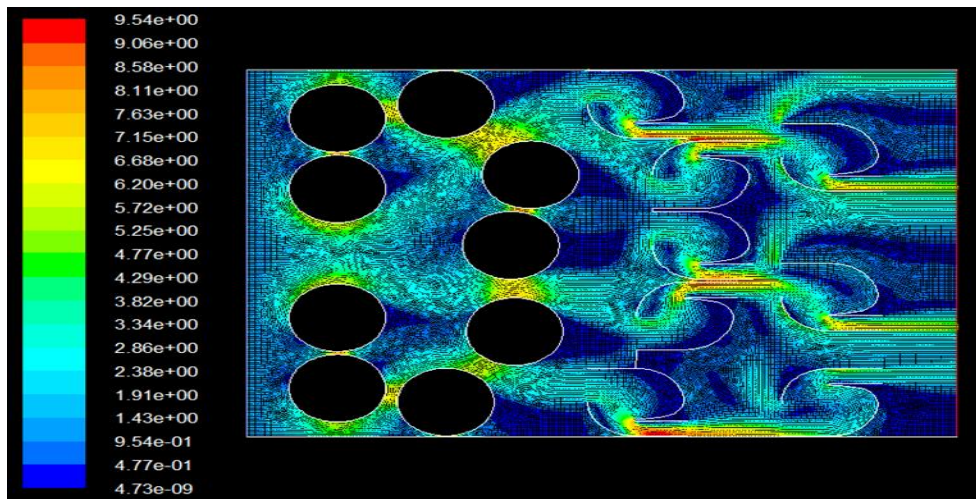


Рисунок 4.22. Распределение скорости воздуха в четырех рядах модуля КВОУ с циклонными элементами «циклон-фильтр» в десятом опыте

Анализ рисунка 4.23 показывает, что потоки замедляются в теневых зонах циклонных элементов.

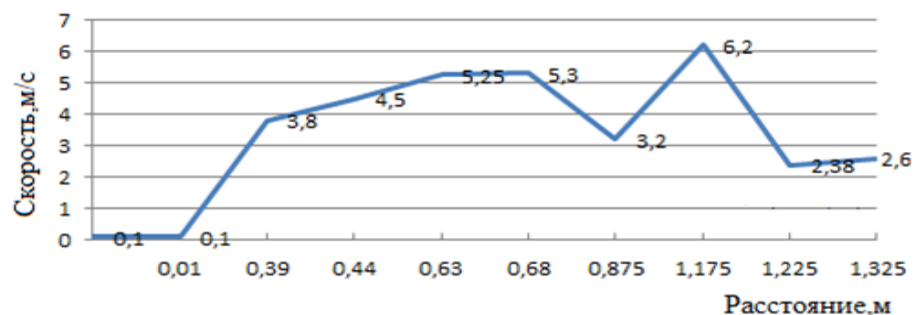


Рисунок 4.23 Изменение величины скорости на выходе из циклонных элементов четвертого ряда модуля ВОУ

В то же время, максимальная скорость потока, достигающая 9,5 м/с, проявляется в областях между сплошными круглыми элементами первого ряда.

На рисунке 4.24 представлены следы частиц, проходящих через четыре ряда модуля КВОУ с циклонными элементами «циклон-фильтр».

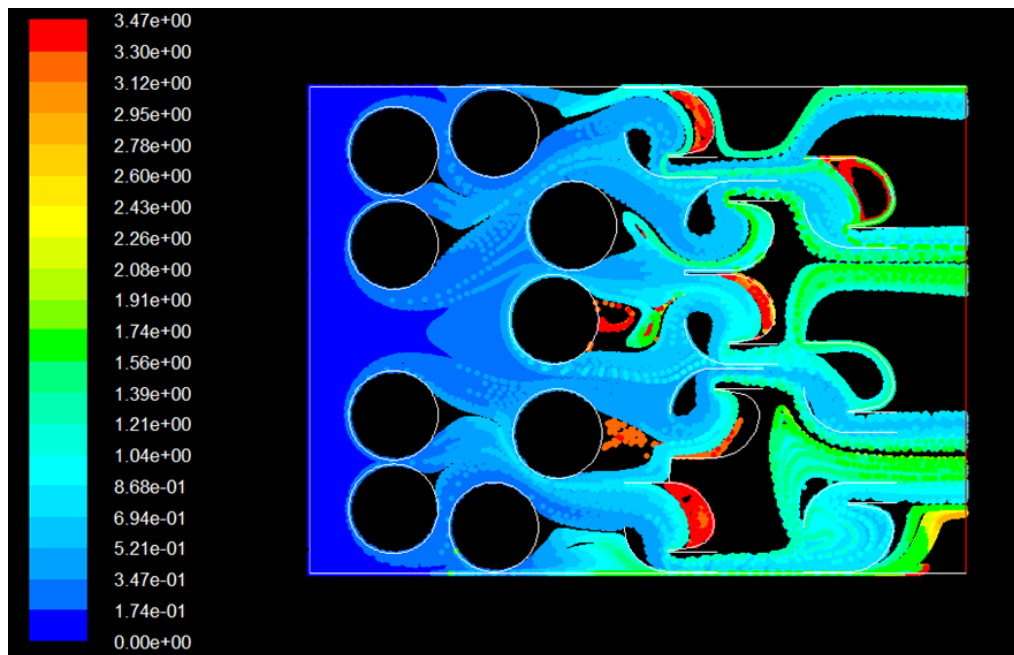


Рисунок 4.24. Следы частиц, окрашенных по диаметру частиц в четырех рядах модуля КВОУ с циклонными элементами «циклон-фильтр» [137]

Полученные результаты соответствуют предыдущим экспериментальным данным и подтверждают правильность метода, использованного в данной работе, который включал замену предыдущего ряда полуулиточных элементов на сплошные круглые элементы аналогичного диаметра. На основании полученных данных было принято решение о дальнейших расчетах с использованием данной конфигурации циклонных элементов для четырех рядов модуля КВОУ с циклонными элементами «циклон-фильтр». В ходе численных исследований были получены аэродинамические характеристики дисперсных течений внутри корпуса модуля КВОУ с циклонными элементами «циклон-фильтр», а также определена оптимальная схема размещения циклонических элементов и локализация их входов. Учитывая, что основной задачей данного исследования было улавливание частиц размером до 0,5 мкм, в последующих рядах модуля КВОУ с циклонными элементами «циклон-фильтр» планируется установка пористых фильтров внутри

полуулиточных циклонных элементов. Это дополнение позволит значительно повысить эффективность фильтрации и улавливания мелкодисперсных частиц, что является важным аспектом для улучшения качества очищаемого воздуха и снижения уровня загрязнения.

Вторым этапом метода на основании конструкции с наилучшей локацией элементов в циклонном модуле проведены испытания циклонно-фильтрующих элементов. Для продолжения исследования в приложении ANSYS SpaceClaim Direct Modeler (SCDM) была создана 3d-геометрия циклонного элемента мультициклона с полуулиточным вводом и диаметром корпуса 245 мм, который был оснащен пористым фильтром. Геометрическая модель фильтра на 20 мм меньше диаметра корпуса, и эта модель имеет форму цилиндра – рисунок 4.25.

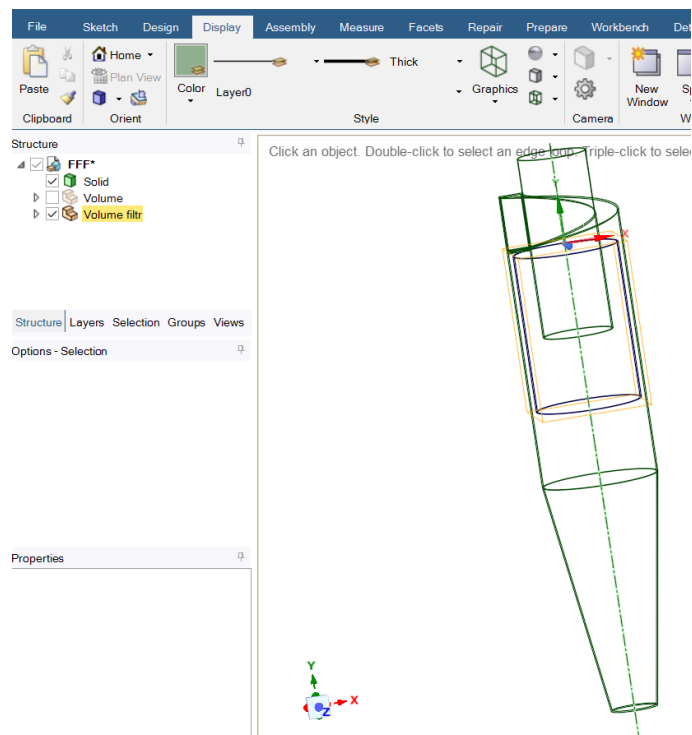


Рисунок 4.25. Создание геометрической модели фильтра и его вставка в циклонный элемент [140]

На рисунках 4.26, 4.27 представлены поля скоростей и давлений в продольном и поперечном сечениях циклонного элемента с фильтрующей вставкой, полученные в результате расчетов созданной численной модели.

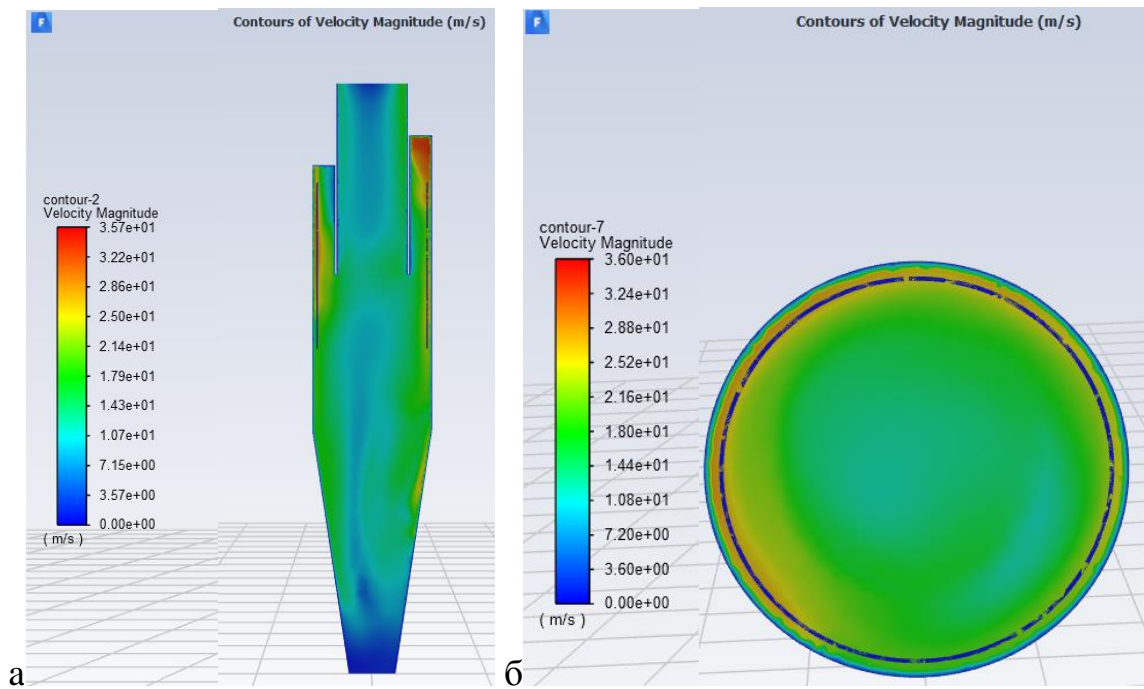


Рисунок 4.26. Поля скоростей в продольном (а) и поперечном (б) сечениях циклонного элемента с фильтрующей вставкой [140]

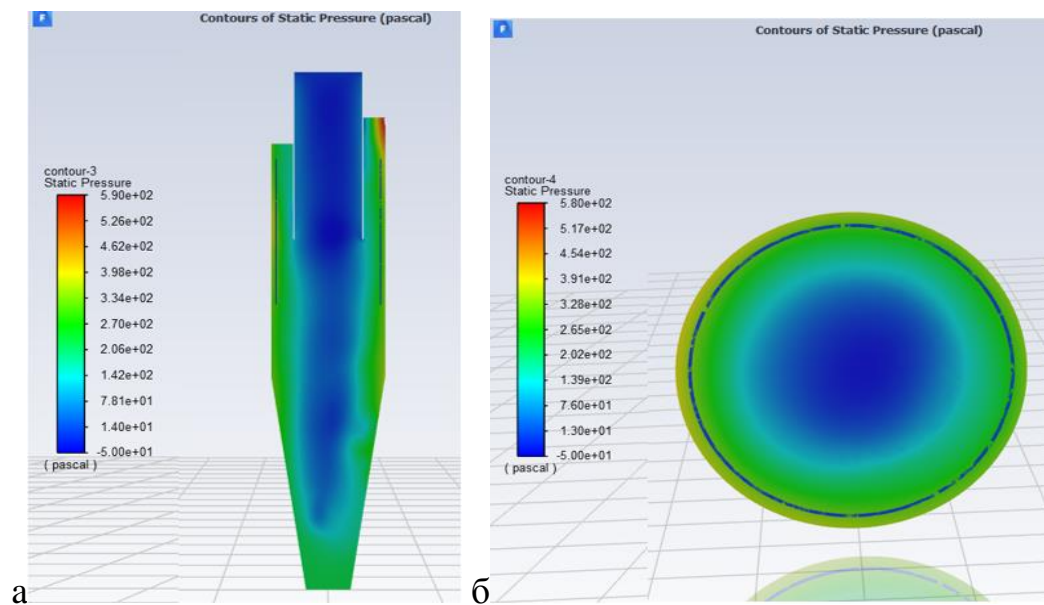


Рисунок 4.27. Поля давлений в продольном (а) и поперечном (б) сечениях циклонного элемента с фильтрующей вставкой [140]

Несмотря на наличие фильтрующей вставки, структура потока остается неизменной, сохраняя даже такую деталь, как прецессия восходящего потока

внутри корпуса. Максимальная скорость потока составила 32 м/с, перепад давления на элементе 440 Па, что подтверждает физическую адекватность результатов численных исследований. Они показали требуемое для класса F7 фракционное осаждение частиц диаметром 0,4 мкм на 85% при полном коэффициенте очистки 99,29%. Полученные результаты показывают возможность объединения грубой и финишной ступеней очистки в одном аппарате и существенно уменьшить габариты и материалоемкость очистного модуля в целом.

В целом, проведенное исследование подтвердило высокую эффективность работы мультициклонной ячейки с полуулиточными патрубками. В соответствии с этим разработаны рекомендации и алгоритм выполнения комбинированных 2d- и 3d- исследований для рационализации численных исследований с целью совершенствования существующих и конструирования новых аппаратов типа ВОУ с большим числом очистных элементов.

Полученные результаты открывают новые перспективы для дальнейших исследований и разработки более совершенных систем очистки воздуха. Важно отметить, что использование циклонных элементов в сочетании с пористыми фильтрами может значительно улучшить процесс осаждения частиц и повысить общую эффективность системы. Это может быть особенно актуально для промышленных процессов, где требуется высокая степень очистки и минимизация выбросов вредных веществ в атмосферу. Таким образом, результаты данного исследования могут быть полезны не только для теоретических изысканий, но и для практических приложений в области экологии и охраны окружающей среды, а также в промышленности, где необходимо обеспечить высокие стандарты качества воздуха.

#### **4.8. Постпроцессинг. Обработка результатов численных исследований**

В процессе исследования было установлено, что количество выброшенных частиц, обозначенное как  $G_{out}$ , составляет 0,019 кг. Это значение является важным показателем для оценки эффективности системы улавливания пыли. Для более

полного понимания ситуации необходимо рассмотреть входящий поток пыли, который подается в канал. В данном случае количество пыли, подаваемой в канал  $G_{\text{вх}}=0,002$  кг/с. Подача пыли продолжалась на протяжении времени  $t=15$  секунд, что позволяет нам рассчитать общий объем подаваемой пыли, обозначенный как  $G_{\text{in}}$  по формуле 4.9.

$$G_{\text{in}} = G_{\text{вх}} \cdot t, \quad (4.9)$$

Таким образом, количество пыли, которое было подано в систему за указанный период времени, составляет  $G_{\text{in}} = 0,002$  кг/с  $\cdot$  15 с = 0,03 кг. Следующий шаг заключается в определении количества пыли, которое было успешно уловлено в канале. Для этого рассчитываем  $G_{\text{ул}}$ , используя формулу 4.10:

$$G_{\text{ул}} = G_{\text{in}} - G_{\text{out}}, \quad (4.10)$$

Подставляя известные значения, получаем  $G_{\text{ул}} = 0,03$  кг – 0,019 кг = 0,011 кг. Это означает, что в результате работы системы улавливания пыли было успешно зафиксировано 0,011 кг пыли, что составляет 36,67% от общего объема подаваемой пыли для первого ряда. Эти результаты важны для оценки эффективности работы системы улавливания пыли, так как они показывают, насколько хорошо система справляется с задачей удаления частиц из воздуха. Важно отметить, что эффективность улавливания пыли может зависеть от различных факторов, таких как скорость потока воздуха, размер частиц и особенности конструкции улавливающего устройства. В дальнейшем, для улучшения этих показателей, можно рассмотреть возможность оптимизации параметров работы системы, таких как увеличение времени подачи или изменение скорости потока, что может привести к более высокому уровню улавливания частиц. Результаты расчетов сведены в таблицу 4.1, где представлены все ключевые параметры и их значения для наглядности и дальнейшего анализа и приведены на рисунке 4.28. В результате проведенных численных исследований была изучена геометрия элементов четырех рядов модуля КВОУ с циклонными элементами «циклон-фильтр», что позволило достичь впечатляющей степени инерционного осаждения взвеси, достигающей 99,29%, что свидетельствует о высокой эффективности процесса осаждения

частиц.

Таблица 4.1. – Результаты расчетов

Количество рядов	Общий расход $G_{in}$ , кг	Выброшенный расход $G_{out}$ , кг	Уловленный расход $G_{ул}$ , кг	Эффективность инерционного осаждения частиц, %
1	0,030	0,019	0,011	36,67
2	0,058	0,028	0,030	51,72
3	0,087	0,020	0,067	77,01
4	0,1417	0,001	0,1407	99,29

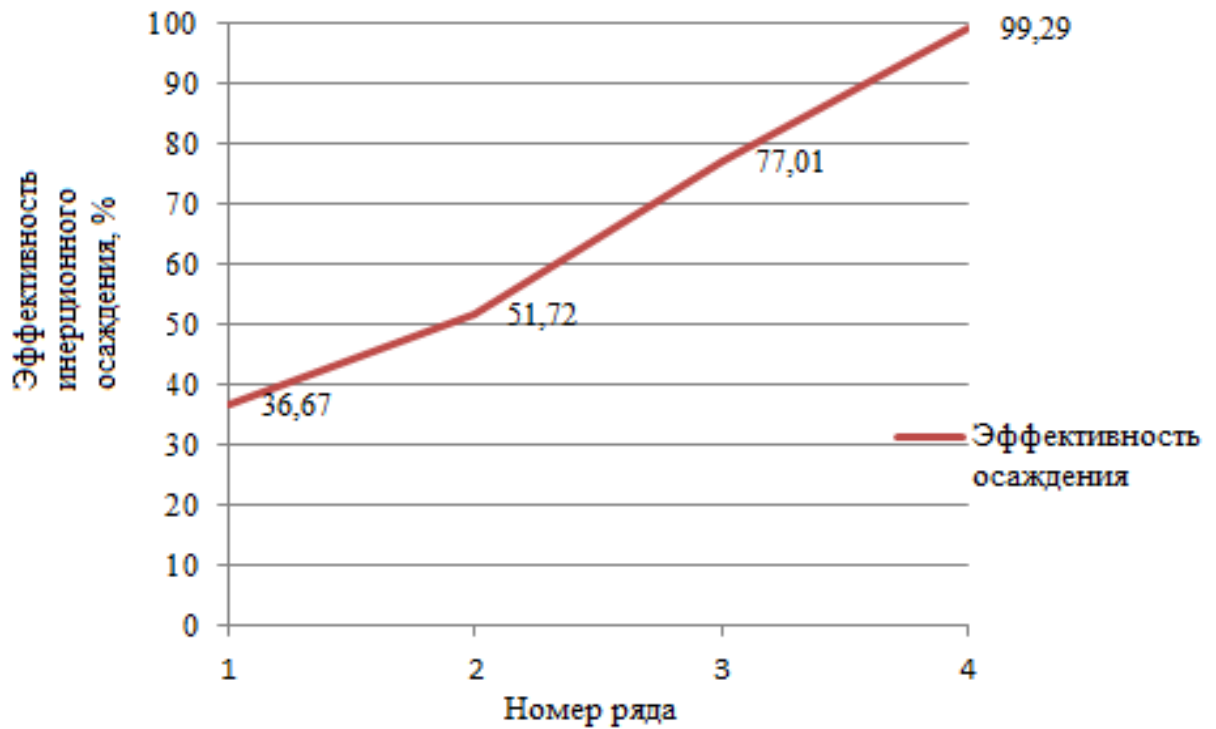


Рисунок 4.28. Эффективность инерционного осаждения в четырех рядах модуля КВОУ

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

Полученные результаты численных исследований позволили разработать рекомендации (Приложение В.1) и алгоритм по выполнению комбинированных 2d- и 3d-исследований для совершенствования компоновок очистных элементов в модулях ВОУ (Приложение В.2).

#### **ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4**

1. Разработана и применена комбинированная 2d – 3d методика численного исследования в модуле с циклонными элементами «циклон-фильтр», упрощающая и снижающая ресурсозатратность вычислений.
2. В рамках исследования была разработана трёхмерная геометрическая модель модуля с циклонными элементами «циклон-фильтр» с использованием программного обеспечения ANSYS FLUENT.
3. Разработаны рекомендации и алгоритм выполнения комбинированных 2d- и 3d-исследований для рационализации численных исследований с целью совершенствования существующих и конструирования новых аппаратов типа ВОУ с большим числом очистных элементов.
4. Полученные результаты моделирования позволили визуализировать и количественно оценить распределение скоростей и давлений в различных зонах модуля с циклонными элементами «циклон-фильтр», что крайне важно для анализа эффективности сепарации твердых частиц от газового потока.

## ГЛАВА 5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЦИКЛОННОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ДЛЯ ВАЛИДАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ЧИСЛЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

### 5.1. Построение модели натуральных исследований, описание экспериментальной установки

Для сопоставления данных с результатами численного моделирования были проведены лабораторные испытания циклонной фильтрации, результаты которых приводятся ниже.

Были проведены экспериментальные исследования циклонного фильтра диаметром 100 мм, созданного на базе циклона ЦН-11. В ходе экспериментов измерялись потери давления и скорости воздушных потоков при изменяющемся объеме воздуха через циклон.

Экспериментальная установка представлена на рисунке 5.1.

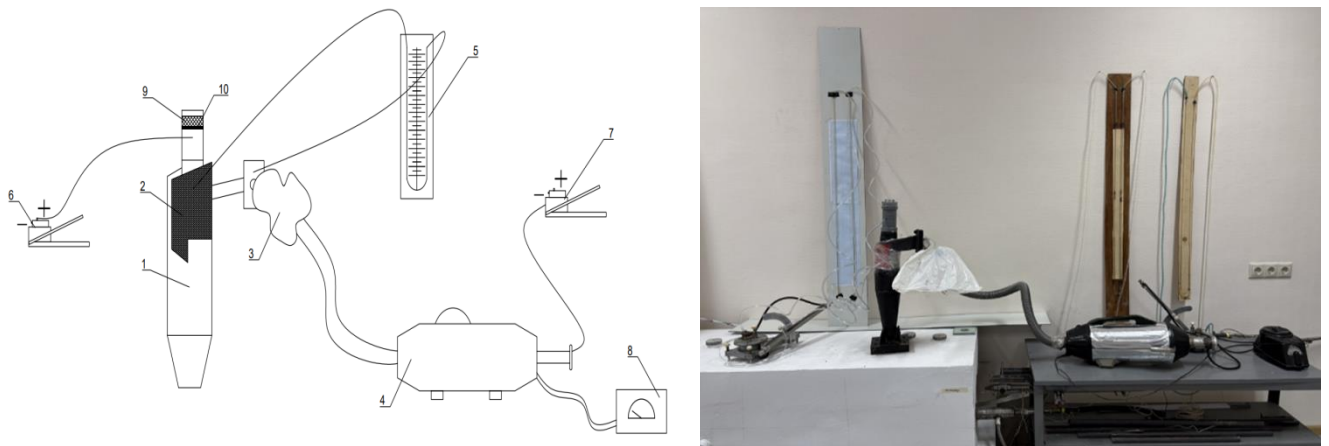


Рисунок 5.1. Схема экспериментальной установки для испытания циклонного фильтра диаметром 100 мм с базовой конструкцией циклона типа ЦН-11 [141]:

- 1 – циклон; 2 – лавсановый фильтр; 3 – контейнер с пылью; 4 – нагнетатель;
- 5 – U-образный манометр; 6 – микроманометр ММН-240; 7 – коллектор плавного входа с микроманометром ММН-240; 8 – регулятор напряжения;
- 9, 10 – выхлопной патрон с сеткой и фильтровальной тканью Петрянова

Она содержит циклон, U-образный манометр, микроманометры ММН-240 (2 шт.), нагнетатель и контейнер с пылью. Сопротивление циклона рассчитывалось от перепада давления, замеряемого микроманометрами на входе и на выходе из циклона. Нагнетатель 4 (рисунок 5.1) обеспечивал подачу воздуха в контейнер с пылью 3. Для оценки эффективности улавливания мелких частиц ( $PM_{10}$  и менее), критически важных для промышленных процессов очистки воздуха, в качестве тестовой пыли был использован тальк (размер до 63 мкм, медианный диаметр 10 мкм, дисперсия 3,5). Управление подачей воздуха в циклон осуществлялось через нагнетатель, который соединен с регулятором напряжения 8. Исследования проводились при четырех заданных входных скоростях.

Для очистки входящего потока воздуха использовался лавсановый тканевый фильтр, который монтировался на входном патрубке вдоль движения потока (рисунок 5.2).



Рисунок 5.2. Тканевый фильтр, расположенный по ходу движения потока

Крепление данного лавсанового фильтра к входному патрубку осуществлялось по спирали с учетом направления движения потока. На

выходном патрубке циклона установлен патрон, оснащенный фильтровальной тканью на основе полиамидных или полиэфирных волокон (ткань Петрянова или лавсан, соответственно), а также удерживающей ее сеткой из металла.

## 5.2. Проведение натурного эксперимента

После подготовки установки к работе включается нагнетатель 4. Запыленный воздух через вход циклона 1 попадает в образованное корпусом и выхлопной трубой кольцевое пространство, в котором располагается входной фильтр 2 [141]. В циклоне 1 крупные частицы отделяются от потока. Из-за инерции они не успевают изменить направление движения на участках с радиусом кривизны менее 100 мм и, двигаясь по прямой, попадают на стенку. Там, под действием силы тяжести, они направляются в конусную часть аппарата. Из-за своего небольшого размера и, следовательно, низкой инерции, частицы пыли не отклоняются от вращательной траектории потока и продолжают движение по ней. Процесс фильтрации воздуха в элементе 2 включает два этапа. На начальном этапе частицы улавливаются ввиду эффекта касания. После формирования автослоя на поверхности фильтра, оставшиеся частицы задерживаются благодаря ситовому эффекту.

Воздушный поток, имеющий винтовое движение, последовательно проходит кольцевое и цилиндрическое пространства корпуса. В конусной секции происходит изменение вектора скорости на восходящий, и поток поднимается по спирали в центральной части корпуса (внутри нисходящего периферийного потока) до выходного патрубка, через который обычно осуществляется выброс с прецессией по спирали.

В эксперименте на U-образном манометре 5 отмечен перепад давления в циклоне  $\Delta P_{cycl}$ . Для определения расхода воздуха через систему использовались коллектор плавного входа 7 и микроманометр ММН-240 с коэффициентом угла наклона шкалы  $k = 0,3$  [141]. Давление и скорость воздуха внутри циклона определялись по показаниям трубки Пито, оттарированной при помощи термоанемометра Testo 425 (Приложение Г). Скорость потока воздуха из циклона

(после фильтра АФА) измерялась (рисунок 5.3) термоанемометром в разных точках (рисунок 5.4).

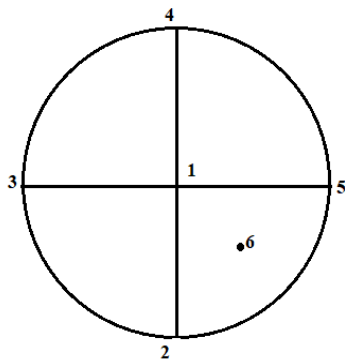


Рисунок 5.3. Расположение мест замера скорости в циклоне



Рисунок 5.4 Измерение скоростей потока в циклоне при помощи термоанемометра *Testo 425*

В целях обработки экспериментальных данных определена неопределенность измерений в соответствии с ГОСТ 34100.3-2017 [142]. В качестве определяющего значения выбрана точка, где поток является неустойчивым, так как происходит смена нисходящего потока на восходящий поток. Было проведено по 7 измерений разности статического и полного давлений в трех сериях исследований в данной точке. Далее приведены усредненные по 7 измерениям значения давления в 6 точке  $\bar{P}_1 \dots \bar{P}_7$ , определяемые по формуле (5.1):

$$\bar{P} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n P_k, \quad (5.1)$$

где  $n$ - количество наблюдений;  $P_k$  - разность давлений в каждом исследовании.

Таблица 5.1 – Значения разности давлений в точке замера для трех серий исследований при расходе 0,002 м<sup>3</sup>/с

№ измерения	№ серии		
	1	2	3
1	9,12	8,21	8,51
2	8,61	9,69	8,91
3	9,06	8,42	9,51
4	10,01	9,45	8,99
5	10,45	9,56	9,61
6	7,14	9,36	9,86
7	9,45	9,15	8,45
среднее	9,12		

Таблица 5.2 – Усреднённые значения разности давлений в точке замера для трех серий исследований при расходе 0,004 м<sup>3</sup>/с

№ измерения	№ серии		
	1	2	3
1	12,56	13,61	13,01
2	13	13,21	12,45
3	13,01	12,36	12,5
4	13,64	11,91	14,45
5	14,85	13,21	12,03
6	11,2	14,48	14,15
7	14,49	13,97	14,16
среднее	13,25		

Таблица 5.3 – Усреднённые значения разности давлений в точке замера для трех серий исследований при расходе 0,005 м<sup>3</sup>/с

№ измерения	№ серии		
	1	2	3
1	19,73	19,46	19,58
2	19,46	19,58	19,97
3	19,91	19,39	19,46
4	19,36	19,97	19,45
5	19,54	19,81	19,81
6	19,88	19,51	19,38
7	19,46	19,62	19,69
среднее	19,62		

Таблица 5.4 – Усреднённые значения разности давлений в точке замера для трех серий исследований при расходе 0,007 м<sup>3</sup>/с

№ измерения	№ серии		
	1	2	3
1	24,41	25,84	23,85
2	24,34	24,82	24,16
3	24,22	24,36	24,01
4	23,71	24,58	24,89
5	24,85	24,13	24,83
6	24,49	24,05	24,61
7	24,99	23,23	24,66
среднее	24,43		

Таблица 5.5 – Усреднённые значения разности давлений в точке замера для трех серий исследований при расходе 0,010 м<sup>3</sup>/с

№ измерения	№ серии		
	1	2	3
1	25,12	25,31	24,76
2	25,86	25,78	24,16
3	26,19	26,43	25,56
4	26,32	25,13	26,17
5	25,42	25,22	25,74
6	24,91	25,34	26,82
7	24,75	25,36	25,36
среднее	25,51		

Таблица 5. 6 – Усреднённые значения разности давлений в точке замера для трех серий исследований при расходе 0,011 м<sup>3</sup>/с

№ измерения	№ серии		
	1	2	3
1	27,99	28,31	28,79
2	27,65	28,36	27,12
3	27,49	26,46	27,95
4	28,91	28,85	27,43
5	28,87	27,96	27,53
6	27,45	28,64	27,64
7	27,01	26,79	28,91
среднее	27,91		

Таблица 5.7 – Усреднённые значения разности давлений в точке замера для трех серий исследований при расходе 0,014 м<sup>3</sup>/с

№ измерения	№ серии		
	1	2	3
1	32,85	32,86	32,96
2	32,17	32,15	32,13
3	33,01	33,16	32,79
4	31,79	32,93	32,46
5	32,94	31,21	31,84
6	32,1	31,86	32,75
7	32,15	32,84	32,08
среднее	32,43		

В таблицах 5.8 – 5.14 показаны абсолютные отклонения результатов измерений давлений  $P$  от среднего значения. Эти отклонения были рассчитаны для точки б в сечении циклона в каждой серии исследований по формуле (5.2).

$$\Delta P_i = | P - P_i |, \quad (5.2)$$

Таблица 5.8 – Абсолютные ошибки измерений давлений в б точке замера для трех серий исследований при расходе 0,002 м<sup>3</sup>/с

№ измерения	№ серии		
	1	2	3
1	0,00	0,91	0,61
2	0,51	0,57	0,21
3	0,06	0,70	0,39
4	0,89	0,33	0,13
5	1,33	0,44	0,49
6	1,98	0,24	0,74
7	0,33	0,03	0,67

Таблица 5.9 – Абсолютные ошибки измерений давлений в б точке замера для трех серий исследований при расходе 0,004 м<sup>3</sup>/с

№ измерения	№ серии		
	1	2	3
1	0,69	0,36	0,24
2	0,25	0,04	0,8
3	0,24	0,89	0,75
4	0,39	1,34	1,2
5	1,6	0,04	1,22
6	2,05	1,23	0,9
7	1,24	0,72	0,91

Таблица 5.10 – Абсолютные ошибки измерений давлений в 6 точке замера для трех серий исследований при расходе 0,005 м<sup>3</sup>/с

№ измерения	№ серии		
	1	2	3
1	0,11	0,16	0,04
2	0,16	0,04	0,35
3	0,29	0,23	0,16
4	0,26	0,35	0,17
5	0,08	0,19	0,19
6	0,26	0,11	0,24
7	0,16	0,00	0,07

Таблица 5.11 – Абсолютные ошибки измерений давлений в 6 точке замера для трех серий исследований при расходе 0,007 м<sup>3</sup>/с

№ измерения	№ серии		
	1	2	3
1	0,02	1,41	0,58
2	0,09	0,39	0,27
3	0,21	0,07	0,42
4	0,72	0,15	0,46
5	0,42	0,3	0,4
6	0,06	0,38	0,18
7	0,56	1,2	0,23

Таблица 5.12 – Абсолютные ошибки измерений давлений в 6 точке замера для трех серий исследований при расходе 0,010 м<sup>3</sup>/с

№ измерения	№ серии		
	1	2	3
1	0,39	0,2	0,75
2	0,35	0,27	1,35
3	0,68	0,92	0,05
4	0,81	0,38	0,66
5	0,09	0,29	0,23
6	0,6	0,17	1,31
7	0,76	0,15	0,15

Таблица 5.13 – Абсолютные ошибки измерений давлений в 6 точке замера для трех серий исследований при расходе 0,011 м<sup>3</sup>/с

№ измерения	№ серии		
	1	2	3
1	0,08	0,4	0,88
2	0,26	0,45	0,79
3	0,42	1,45	0,04
4	1	0,94	0,48
5	0,96	0,05	0,38
6	0,46	0,73	0,27
7	0,9	1,12	1

Таблица 5.14 – Абсолютные ошибки измерений давлений в 6 точке замера для трех серий исследований при расходе 0,014 м<sup>3</sup>/с

№ измерения	№ серии		
	1	2	3
1	0,42	0,43	0,53
2	0,26	0,28	0,3
3	0,58	0,73	0,36
4	0,64	0,5	0,03
5	0,51	1,22	0,59
6	0,33	0,57	0,32
7	0,28	0,41	0,35

В таблице 5.15 приведены построчные дисперсии, которые демонстрируют воспроизводимость. Эти показатели были получены путем проведения  $n=3$  трех серий экспериментов, в ходе которых были выполнены измерения давлений  $\Delta P_i$  в шести точках сечения циклона и которые определяются по формуле (5.3).

$$S_{\gamma}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta P_i)^2, \quad (5.3)$$

Таблица 5.15 – Построчные дисперсии в точке 6 для трех серий исследований

№ серии	№ измерения						
	1	2	3	4	5	6	7
1	0,43	0,69	0,29	0,72	0,23	0,28	0,15
2	0,17	0,35	0,19	0,25	0,94	0,44	0,29
3	0,17	0,6	0,25	0,23	0,34	0,25	0,11

Результаты расчета по формуле (5.4) сумм построчных  $S_\gamma$  дисперсий для четырех серий измерений приведены в таблице 5.16.

$$S_\Sigma^2 = \sum_{\gamma=1}^4 S_\gamma^2, \quad (5.4)$$

Таблица 5.16 – Сумма построчных дисперсий в 6 точках замера для трех серий измерений

Построчные дисперсии	№ измерения						
	1	2	3	4	5	6	7
$S_\Sigma^2$	0,77	1,64	0,73	1,2	1,51	0,97	0,55
$S_\Sigma$	0,87	1,28	0,85	1,01	1,23	0,98	0,74

При объеме выборки  $n=7$  (что соответствует 6 степеням свободы) и доверительной вероятности 95%, критическое значение t-критерия Стьюдента равно 2,36 [143]. Это позволило рассчитать неопределенность измерений скорости в шестой точке замера циклона (таблица 5.17).

Таблица 5.17 – Неопределенность измерений в 6 точке замера

	№ измерения						
	1	2	3	4	5	6	7
Расход, м <sup>3</sup> /с	0,002	0,004	0,005	0,007	0,010	0,011	0,014
Средние значения разности полного и статического давлений, Па	9,12	13,25	19,62	24,43	25,51	27,91	32,43
Среднеквадратическое отклонение измерений, Па	±2,05	±3,02	±2,2	±2,78	±2,90	±2,91	±2,74
Неопределенность измерений разности полного и статического давлений, Па	9,12± 2,05	13,25±3,02	19,62±2	24,43±2,38	25,51±2,9	27,91±2,31	32,43±2,74
Точность измерений	22%	24%	20%	19%	21%	18%	18%

В таблице 5.18 приведены характеристики потока в циклоне при проведении лабораторных изменений.

Таблица 5.18 – Характеристики потока в циклоне

№ измерения	Давление на коллекторе $P_{coll}$ , Па	Скорость на входе в коллектор, м/с	Расход на коллекторе, $\text{м}^3/\text{с}$	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	$9,12 \pm 2,05$	$4,03 \pm 2,05$	981
2	39,24	8,97	0,004	8,61	$13,25 \pm 3,02$	$4,86 \pm 3,02$	2150
3	58,86	10,65	0,005	10,45	$19,62 \pm 2,2$	$5,92 \pm 2,2$	3720
4	137,34	16,10	0,007	15,87	$24,43 \pm 2,78$	$6,6 \pm 2,78$	4930
5	235,44	20,90	0,010	20,74	$25,51 \pm 2,90$	$6,75 \pm 2,90$	5610
6	255,06	21,84	0,011	21,61	$27,91 \pm 2,91$	$7,06 \pm 2,91$	6750
7	458,06	30,06	0,014	28,62	$32,43 \pm 2,74$	$7,61 \pm 2,74$	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/с на входе в циклон (рисунок 5.5). 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 ( $6,6 \pm 2,78$ ,  $4,86 \pm 3,02$ , 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.

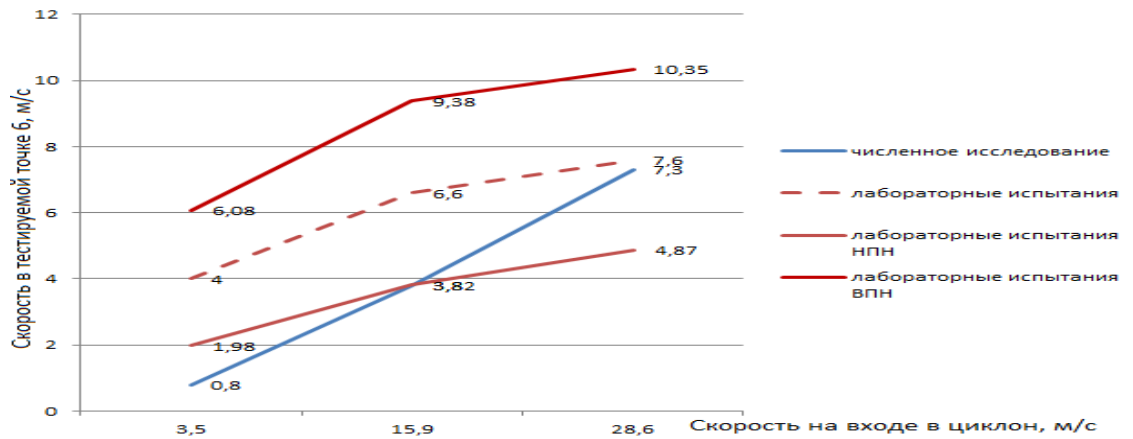


Рисунок 5.5. Скорости в тестируемой точке б в численном исследовании и лабораторных испытаниях

Изучение запыленной фильтровальной ткани с помощью микроскопа МИН-8 при 400-кратном увеличении, как на входе, так и на выходе циклона, позволило получить предварительные сведения о структуре и дисперсном составе осадка. Фотография на рисунке 5.6 наглядно показывает спиральный след выходящего потока, что подтверждает сохранение его прецессии в выхлопной трубе. Данное явление является маркером стабильной работы обычных циклонов без фильтрующих элементов. Следовательно, применение фильтрующей вставки, как показано на рисунке 5.1, не оказывает негативного влияния на штатный аэродинамический режим работы циклона.

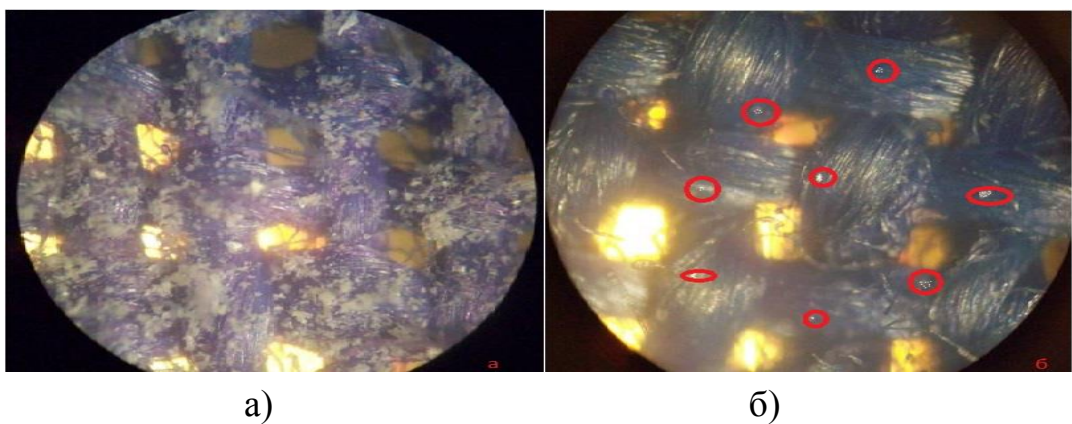


Рисунок 5.6. Частицы пыли, осевшие на фильтрующих вставках: а – на спиральной лавсановой ткани на входе в циклон, б – на фильтровальной ткани, установленной в выхлопном патроне

### 5.3. Определение степени соответствия расчетной модели модулю ВОУ с элементами, реализующими принципы циклонной фильтрации

С помощью ANSYS SpaceClaim Direct Modeler (SCDM) была разработана трехмерная модель элемента, оснащенного полуулиточным вводом и имеющего корпус диаметром 100 мм [141].

Для моделирования осаждения частиц в циклоне использовалась неструктурированная тетраэдрическая сетка (более 900 000 ячеек) и RANS модель турбулентности (k-ε стандартная с пристенными функциями и SST k-ω модель Ментора) для газовой фазы [141]. Расчеты проводились неявной схемой для нестационарной задачи с граничными условиями Velocity Inlet/Pressure Outlet (вход/выход) и Wall (стенки). Параметры воздуха:  $t = 24^{\circ}\text{C}$ ,  $p = 101325 \text{ Па}$ ,  $\rho = 1,204 \text{ кг/м}^3$ ,  $\eta = 15,1 \cdot 10^{-6} \text{ Па}\cdot\text{с}$ .

Для моделирования дискретной фазы была выбрана промышленная пыль, максимально соответствующая параметрам, полученным в лабораторных условиях. Использовался антрацит с плотностью  $2000 \text{ кг/м}^3$ . Распределение размеров частиц соответствовало логарифмическому распределению Розина-Раммлера с медианным диаметром 10 мкм и дисперсией 3,5. Инжекция частиц осуществлялась со скоростью 0,01 м/с и общим расходом 0,002 кг/с. При моделировании движения пыли (DPM) применен метод Лагранжа, который позволяет отследить траекторию частиц в воздушном потоке и учитывать их взаимное влияние на динамику потока и частиц.

Цилиндрическая форма геометрической модели пористой среды, имеющая диаметр на 20 мм меньше диаметра корпуса (рисунок 5.7а), после усиановки в корпус циклона (рисунок 5.7б) была переведена из состояния "твердое тело" в состояние "Fluid" (текучая среда). На этом этапе были заданы начальные параметры вязкостного и инерциального сопротивления, что позволило сформировать требуемые значения коэффициентов местного сопротивления для пористых зон.

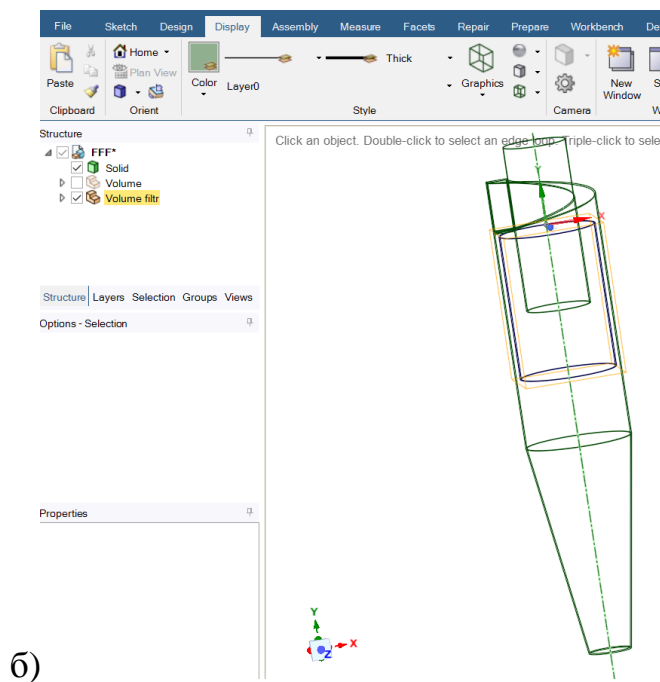
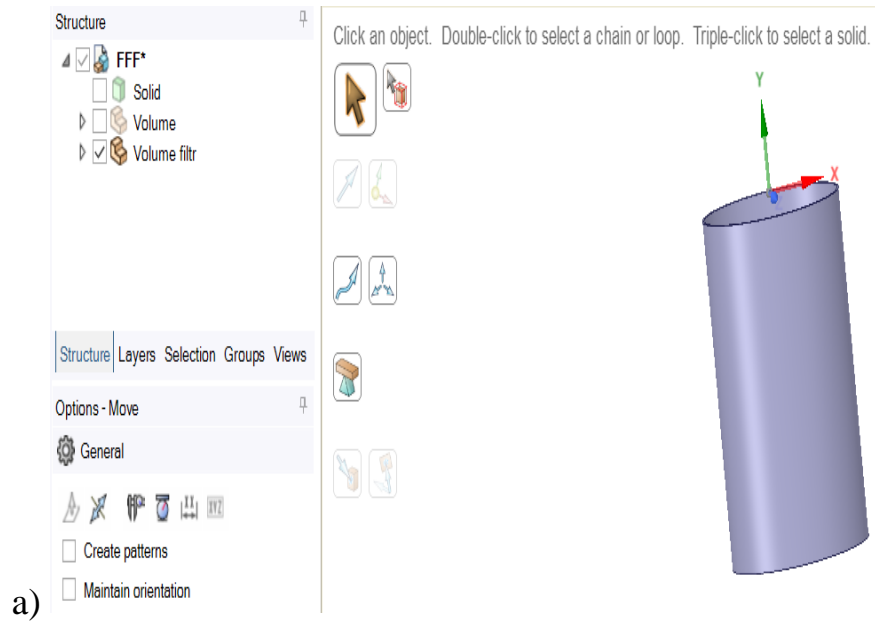


Рисунок 5.7. Создание геометрической модели фильтра (а) и его вставка в циклонный элемент (б)

Для расчетов были приняты изотропные сопротивления в зонах (одинаковые во всех направлениях). Исходные значения коэффициентов вязкостного ( $80000 \text{ м}^{-2}$ ) и инерционного ( $50000 \text{ м}^{-1}$ ) сопротивлений были

определены методом обратного расчета на основе экспериментальных данных по сопротивлению тканевого фильтра в аналогичном циклонном аппарате.

Результаты расчетов численной модели, представленные на рисунке 5.8, демонстрируют поля давлений в продольном и поперечном сечениях циклонного элемента с фильтрующей вставкой.

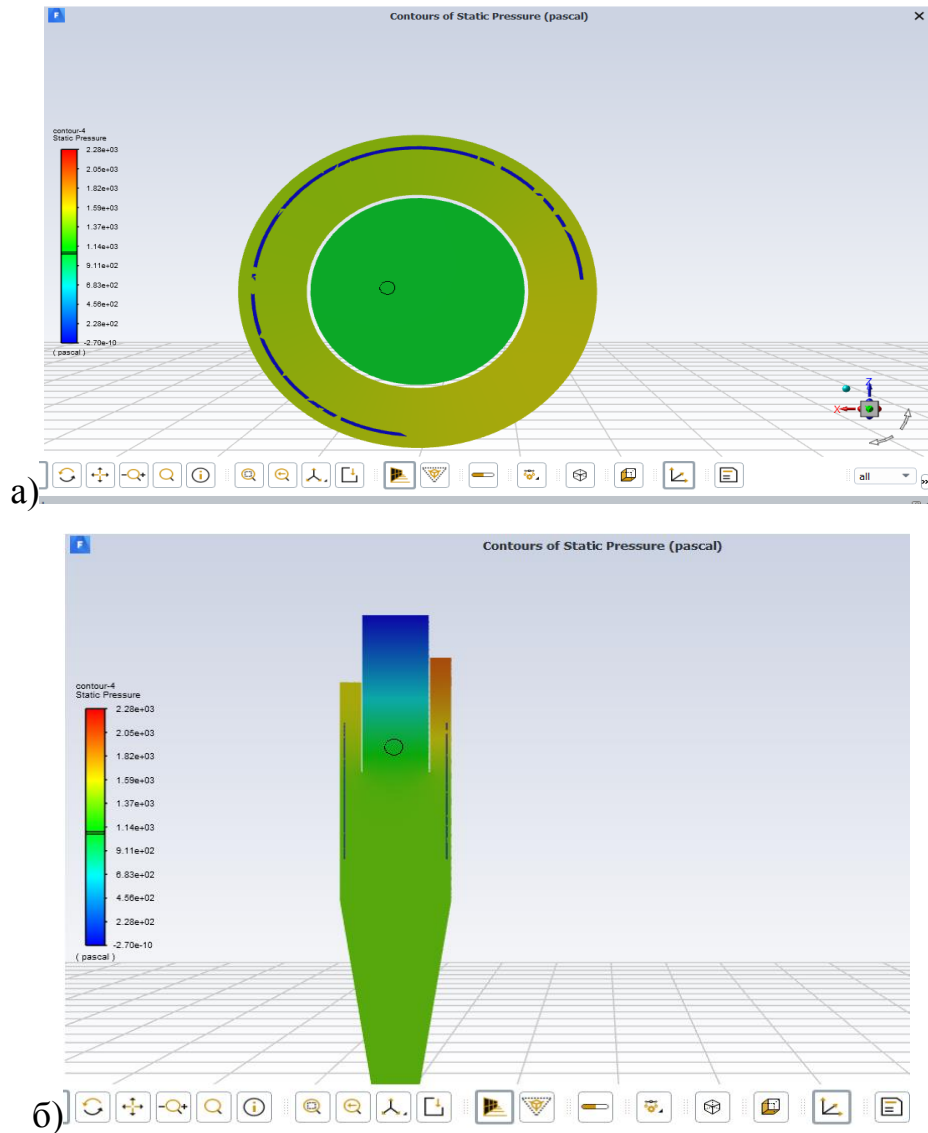


Рисунок 5.8. Распределение давления двухфазного потока в циклонах ЦН-11 *а* – в поперечных сечениях на уровне низа выхлопной трубы; *б* – в вертикальных сечениях

Результаты измерений параметров потока с пылью, полученные в ходе испытаний полномасштабной модели циклона-фильтра (разработанного на основе

ЦН-11 диаметром 100 мм) [141], приведены далее. Значения разрежения на коллекторе  $P_{coll}$ , подсчитанные по показаниям микроманометра 7 (рисунок 5.1) с коэффициентом угла наклона шкалы  $k = 0,3$  [141], приведены в таблице 5.18.

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.

## **ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 5**

1. При проведении лабораторных испытаний определено какое давление, скорость и расход воздуха были при разной мощности вытяжного вентилятора.

2. Точность моделирования циклонного элемента ВОУ диаметром 100 мм была подтверждена путем валидации натурной модели, показавшей неопределенность на уровне 7%. Среднее расхождение численного и лабораторного экспериментов составило 14,5%.

## ГЛАВА 6 ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАЗРАБОТАННОГО КОМПЛЕКСНОГО ВОЗДУХООЧИСТИТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА НА ПРЕДПРИЯТИЯХ РЕСПУБЛИКИ ТАТАРСТАН

Для оценки целесообразности внедрения разработанного КВОУ используется метод срока окупаемости инвестиций. Он позволяет определить, достаточно ли быстро проект начнет приносить доход, чтобы оправдать вложенные средства, и является важным фактором при принятии инвестиционных решений [144]. Срок окупаемости инвестиций определяется уравнением (6.1):

$$T_{ок} = \frac{K}{\Pi_q + A}, \quad (6.1)$$

где  $K$ - полная сумма затрат на реализацию инвестиционного проекта, руб.

$\Pi_q$ - ежегодная чистая прибыль от реализации инвестиционного проекта при равномерном ее поступлении за весь срок окупаемости, руб/год;

$A$ - ежегодные амортизационные отчисления на полное восстановление основных средств, руб/год.

Чистая прибыль определяется как разница между балансовой прибылью и суммой налога на прибыль, начисленного за соответствующий период и вычисляется по формуле (6.2):

$$\Pi_q = \Pi_{\sigma} (1 - n_n), \quad (6.2)$$

где  $n_n$  - ставка налога на прибыль в относительных единицах.

Когда доходы инвестиционного проекта меняются от года к году в период его окупаемости, условие, при котором инвестиция считается целесообразной, выглядит так по формуле (6.3):

$$\sum_{t=1}^{T_{ок}} (\Pi_t + A_t) - K \geq 0, \quad (6.3)$$

где  $\Pi_t$  - чистая прибыль в  $t$ -м году, руб.;

$A_t$  - амортизационные отчисления на полное восстановление в  $t$ -м году, руб.

Формула 6.3 в интерполированном виде для года  $t$ , внутри которого наступил срок окупаемости при накопленном чистом доходе  $НД_{ч(t-1)}$  в  $(t-1)$ -м году будет в виде формулы (6.4):

$$T_{ок} = ((t-1) - НД_{ч(t-1)}) / D_{ч}, \quad (6.4)$$

где  $D_{ч}$  - чистый доход  $t$ -го года, руб.

Для оценки работоспособности и эффективности предложенных решений, проработан вопрос внедрения на КС Арская ООО «Газпром трансгаз Казань». Организация известна своими высокими стандартами в области производства и экологии, и внедрение новых технологий стало важным шагом в их стремлении к улучшению производственных процессов. Экономический эффект от внедрения был определен за счет экономии топливного газа при сокращении потерь в воздухоподготовительном тракте ГПА-16мж. Реализация проекта принесла положительные результаты, доказав оправданность использования новых систем.

В приложении А.1 приведен акт внедрения предложений, направленных на повышение эффективности осаждения мелкодисперсных частиц  $PM_{10}$ ,  $PM_{2,5}$  в КВОУ КС ООО «Газпром трансгаз Казань».

Расчет экономии топливного газа проведен в соответствии с СТО Газпром 2-1.20-601-2011 [145]. Усовершенствованное воздухоочистительное устройство позволяет сократить сопротивление на входе в воздушный тракт на  $dP=5$  мм вод.ст. (0,1%).

Номинальная мощность агрегата: 16 МВт

Количество агрегатов: 6

Коэффициент загрузки ГПА: 0,85 (9 месяцев)

Низшая теплота сгорания топливного газа: 8020 ккал/м<sup>3</sup>

КПД ГТУ: 0,26

Низшая теплота сгорания,  $Q_n$ : 35,5 МВт/нм<sup>3</sup>

Стоимость газа за 1000 куб.м.: 6140 руб.

Мощность агрегата при сокращении сопротивления на входе:  $dN = (16 \cdot 0,1) / 100 = 0,016$  МВт

Теплота сгорания  $dQ = dN \cdot КПД = 0,016 \cdot 0,26 = 0,00416$  МВт.

Экономия:  $\mathcal{E} = dQ / Q_H = 0,00416 / 35,5 = 0,000117$  м<sup>3</sup>/с = 26959 · 6,14 = 165529 руб.

Экономия 6 ГПА в одном цехе в год с учетом загрузки составляет:

$\mathcal{E} = 165529 \cdot 6 = 993171$  руб.

Модернизация системы очистки компрессорной станции путем интеграции усовершенствованного КВОУ может быть ключевым фактором повышения производительности КС.

Внедрение новых технологий на АО «Эссен Продакшн АГ», включая усовершенствованный КВОУ, позволит значительно снизить негативное воздействие на окружающую среду и повысить экономическую эффективность предприятия. Тщательный расчёт показал снижение вредных выбросов при опорожнении оборудования, а оптимизация процессов управления привела к увеличению производительности и сокращению эксплуатационных затрат. Улучшение контроля за технологическими процессами и качества очистки воздуха сыграли ключевую роль в достижении этих результатов. Акт внедрения приведен в приложении А.2, рассчитан экономический эффект от снижения вредных выбросов при обслуживании оборудования. Расчеты основаны на следующих данных: непрерывная работа, две остановки в год, расход очищаемого воздуха (технологических газов) 400 м<sup>3</sup>/час.

Действующая система очистки воздуха (технологических газов) представляет собой двухлинейную конструкцию, в которую входят фильтр-сепаратор-коалесцер газовый ФСГ-ФК-80-16-2-И-УХЛ1 и фильтровальные картриджи для средних температур Р-DS МТ. Требования к системе очистки воздуха (технологических газов) довольно высоки: она должна обеспечивать эффективность очистки не менее 100% для частиц размером 30 мкм и более. Характеристика улавливаемой пыли такова, что фракционный состав менее 35 мкм составляет 50%, а более 35 мкм также 50%. Плотность частиц материала равна 2,43 г/см<sup>3</sup>, что также важно учитывать при анализе эффективности очистки.

Расходы на ремонт узлов составляют в среднем: для фильтра-сепаратора коалесцера газового ФСГ-ФК-80-16-2-И-УХЛ1 — около 12300 руб., а для фильтровального картриджа для средних температур P-DS MT — около 30300 рублей. Таким образом, общая стоимость ремонта блока очистки составляет:

$$S = 12300 + 30300 = 42600 \text{ рублей.}$$

Учитывая, что капитальный ремонт блока очистки планируется два раза в год, общие расходы составят:  $S' = 42600 \cdot 2 = 85200$  рублей.

Благодаря новой технологии, замена фильтра потребуется всего раз в год, во время планового капитального ремонта, что упрощает график и снижает затраты. Стоимость однократного капитального ремонта блока очистки составит 42600 рублей. Усовершенствованное КВОУ не только снижает затраты на обслуживание и ремонт, но и упрощает эксплуатацию за счет объединения ступеней очистки и сокращения количества компонентов.

В итоге экономический эффект за год при внедрении на объекты АО «Эссен продакшн АГ» и в блок очистки КС Арская по Татарстану составит:

$$\mathcal{E} = 42600 + 993171 = 1035771 \text{ руб.}$$

Нормативный срок окупаемости составляет 7-8 лет, расчетный срок окупаемости от внедрения усовершенствованного устройства в соответствии с формулами 6.1-6.2 составляет 3-4 года. Стратегия, направленная на оптимизацию расходов на обслуживание и ремонт оборудования, а также на минимизацию негативного влияния на окружающую среду, будет и далее реализовываться.

## **ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 6**

1. Модернизированный КВОУ, объединяющий первую и вторую ступени очистки, значительно упрощает эксплуатацию очистных блоков на котельных и других объектах. Сокращение количества оборудования и элементов обвязки (запорная арматура, КИП, автоматика) снижает сложность системы и затраты на обслуживание.

2. Модернизация блока очистки на КС "Арская" с помощью усовершенствованного КВОУ позволит добиться значительных экономических улучшений. Современные технологии могут обеспечить экономию топливного газа. Это приведет к упрощению эксплуатации, снижению затрат на обслуживание и экономии 993171 руб.

3. Современные усовершенствованные ВОУ представляют собой важный элемент в системе очистки воздуха на предприятии АО «Эссен продакшн АГ». Их применение не только повышает качество очистки воздуха, но и способствует значительному снижению затрат на обслуживание и ремонт оборудования. В частности, расходы на эти мероприятия могут достигать 42600 руб.

4. Нормативный срок окупаемости составляет 7-8 лет, 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 воздухообеспечения 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 не крупными вычислительными центрами является использование комбинированного 2d-, 3d-моделирования методами CFD.

2. Проведено расчетное определение осаждения мелкодисперсных частиц классов  $PM_{2,5}$  и  $PM_{10}$  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.

Важным аспектом анализа эффективности систем очистки воздуха является выделение энергетических затрат, которые непосредственно связаны с процессом улавливания взвешенных частиц. Потери энергии, возникающие из-за сопротивления воздуха, когда запыленный поток входит в воздухоочистительное устройство, а также на его пути через соединительные элементы до циклонных модулей, не относятся к процессам улавливания частиц, но могут значительно влиять на общую эффективность устройства и его эксплуатационные характеристики. В связи с этим необходимы исследования по оптимизации конфигураций входных и выходных элементов ВОУ и их внутренних проходов для движения загрязненного и очищенного воздуха.

Для повышения эффективности на основе моделирования течений методами вычислительной гидродинамики можно получить рекомендации по оптимизации конструкции каналов, в частности, по снижению сопротивления в каналах с боковыми отверстиями. Это позволяет не только уменьшить потери энергии, но и улучшить общую производительность системы.

Кроме того, необходимо изучить способы использования фильтровальных материалов, которые могут уменьшить их расход, повысить эффективность улавливания частиц, а также снизить сопротивление потоку воздуха, например, многослойных фильтров или фильтров с изменяемой пористостью, оптимизировать их расположение в циклоне. Таким образом, для достижения максимальной эффективности в очистке воздуха необходимо учитывать не только процессы улавливания частиц, но и все сопутствующие факторы, влияющие на энергетические затраты.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 54403-2011 Установки газотурбинные для привода турбогенераторов. Общие технические условия. – М. : Стандартинформ, 2012. – 18 с.
2. Кривошеев, И.А., Ахмедзянов, Д.А., Годованюк, А.Г. Стенды полунатурного моделирования ГТД и их САУ /И.А. Кривошеев, Д.А. Ахмедзянов, А.Г. Годованюк// Молодой ученый. – 2011. – № 3(26) Том I. – С. 39-41.
3. Верхованцев, А.А., Злобин, В.Г. Газотурбинные установки. Часть 2: Конструкция ГТУ и их элементов. /А. А. Верхованцев, В. Г. Злобин. – СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2021. – 53 с.
4. Белоусов В.Н., Смородин С.Н., Лакомкин В.Ю. Энергосбережение и выбросы парниковых газов (CO<sub>2</sub>) / В.Н. Белоусов., С.Н. Смородин., В.Ю. Лакомкин. –СПб.: СПбГТУРП, 2014. – 52 с.
5. Зиганшин, М.Г., Колесник А.А., Зиганшин А.М. Проектирование аппаратов пылегазоочистки: – 2-е изд. перераб. и доп./ М.Г. Зиганшин, А.А. Колесник, А.М. Зиганшин. – Спб: Лань, 2021. – 511с.
6. Беляева, Г.И., Зиганшин, М.Г. Численные исследования аэродинамики потоков в мультициклонах в составе комплексного воздухоочистительного устройства/ Г.И. Беляева, М.Г. Зиганшин // Устойчивое развитие энергетики Республики Беларусь: состояние и перспективы. Сборник докладов II Международной научной конференции (Минск, 3-6 октября 2022г).– 2023.– С. 199-203.
7. Анализ климатических инициатив России в БРИКС [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://russiancouncil.ru/analytics-and-comments/analytics/analiz-klimaticheskikh-initsiativ-rossii-v-briks/>.
8. Минэкономразвития разработало четыре сценария стратегии низкоуглеродного развития России [Электронный ресурс]. – Режим доступа:

<https://xn--80aapampemcchfmo7a3c9ehj.xn--p1ai/news/minekonomrazvitiya-razrabotalo-chetyre-stsenariya-strategii-nizkouglerodnogo-razvitiya-rossii/> .

9. Правительство намерено снизить энергоемкость российской экономики на 35% к 2035 году [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.economy.gov.ru/material/news/pravitelstvo\\_namereno\\_snizit\\_energoemko\\_st\\_rossiyskoy\\_ekonomiki\\_na\\_35\\_k\\_2035\\_godu.html](https://www.economy.gov.ru/material/news/pravitelstvo_namereno_snizit_energoemko_st_rossiyskoy_ekonomiki_na_35_k_2035_godu.html) .

10. Эффективные технологии для тепловой энергетики [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://issek.hse.ru/trendletter/news/141133080.html> .

11. Указ Президента Российской Федерации от 04 ноября 2020 г. № 666 «О сокращении выбросов парниковых газов».

12. Указ Президента Российской Федерации от 13 мая 2019 г. № 216 «Об утверждении Доктрины энергетической безопасности Российской Федерации».

13. Постановление Правительства РФ от 21 сентября 2019 г. № 1228 «О принятии Парижского соглашения».

14. Постановление Правительства Российской Федерации от 9 сентября 2023 г. № 1473 «Об утверждении комплексной государственной программы Российской Федерации "Энергосбережение и повышение энергетической эффективности"».

15. Постановление Правительства РФ от 24.03.2022 № 449 "Об утверждении правил оценки достижения целевых показателей сокращения выбросов парниковых газов и о внесении изменения в подпункт "а" подпункта 9 пункта 5 положения о правительственной комиссии по экономическому развитию и интеграции"».

16. Постановление Правительства РФ от 20 апреля 2022 г. № 707 «Об утверждении правил представления и проверки отчетов о выбросах парниковых газов, формы отчета о выбросах парниковых газов, правил создания и ведения реестра выбросов парниковых газов и о внесении изменений в некоторые акты правительства РФ».

17. Логачев, И.Н., Логачев К.И. Аэродинамические основы аспирации: Монография / И.Н.Логачев, К.И. Логачев. – Санкт-Петербург: Химиздат, 2005. – 659 с.
18. Циклоны и мультициклоны [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://oil-filters.ru/cyclones/> .
19. Конструкция и принцип работы циклонного аппарата [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://helpiks.org/1-107204.html> .
20. Различные типы циклонов и их применение в разных отраслях промышленности [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://vrvent.ru/info/articles/tsiklony-pyleuloviteli/razlichnye-tipy-tsiklonov/> .
21. Батарейные циклоны [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.kvr.su/cyclone.html> .
22. Батарейные циклоны [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://studopedia.info/4-12858.html> .
23. Зиганшин, М. Г. Теоретические основы пылегазоочистки / М. Г. Зиганшин. – Казань: Изд. КГАСУ, 2005. – 262 с.
24. Батарейные циклоны (мультициклоны) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://studfile.net/preview/8881519/page:9/> .
25. Коузов, П. А. Сравнительная оценка циклонов различных типов / П. А. Коузов /Обеспыливание в металлургии: сборник под ред. Я. А. Штромберга. – М., 1971. – 351 с.
26. Лазарев, В. А. Циклоны и вихревые пылеуловители: справ. / В.А.Лазарев. – 2-е изд., перераб. и доп. – Н. Новгород: ОЗОН-НН, 2006. – 320 с.
27. Мисюля, Д. И., Кузьмин, В. В., Марков, В. А. Применение лопастного раскручивателя в циклонных пылеуловителях /Д. И. Мисюля, В. В. Кузьмин, В. А. Марков // Труды БГТУ. – 2011. – № 3. – С. 162–169.
28. Мисюля, Д. И., Кузьмин, В. В., Марков, В. А. Новая конструкция лопастного раскручивателя циклонного аппарата / Д. И. Мисюля, В. В. Кузьмин, В. А. Марков // Энергетика – Изв. Высш. Учеб.заведений и энерг.Объединений СНГ. – 2010. – № 5. – С. 57–60.

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

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

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

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

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

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

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

36. Батарейные циклоны [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://cyklon-cn.ru/batareynye-cyclones.html> .

37. Циклон батарейный ЦБ-16 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ds22.su/ciklon-cb-16/> .

38. Файл:Dust Control 2012+.pdf [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A4%D0%B0%D0%B9%D0%BB:Dust\\_Control\\_2012%2B.pdf?page=35](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A4%D0%B0%D0%B9%D0%BB:Dust_Control_2012%2B.pdf?page=35) .
39. Cyclone dust collector / mechanical shaker cleaning - RITM Industry [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ritmindustry.com/catalog/cyclone-dust-collectors/cyclone-dust-collector-mechanical-shaker-cleaning/> .
40. Разделение газовой смеси. Очистка газа Аппараты сухой и мокрой очистки газа [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://oil-filters.ru/wet\\_and\\_dry\\_gas\\_cleaning\\_devices/](https://oil-filters.ru/wet_and_dry_gas_cleaning_devices/) .
41. Устройства для очистки воздуха [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://kampm.ru/articles/111/114/827/> .
42. Методические указания по наладке батарейных циклонов МУ 34-70-048-83 (РД 34.27.404). – СПО Союзтехэнерго. – М.,1983. –24 с.
43. Батарейный циклон БЦ, промышленные двойные и групповые циклонные фильтры и предфильтры, принцип работы, устройство, характеристики и внедрение мультициклонов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://gas-cleaning.ru/article/multicyclonic-filters> .
44. Справочник химика 21 ХИМИЯ И ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://chem21.info/info/152556/> .
45. Балабанов, В.И., Журавлева, Л.А., Мартынова, Н.Б. Инженерная защита окружающей среды. Учебник для обучающихся по направлению подготовки 20.03.01 Техносферная безопасность / В.И. Балабанов, Л.А. Журавлева, Н.Б. Мартынова. – Москва, 2022. –233 с.
46. 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.

47. Использование газовых турбин для комбинированного производства энергии [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.c-o-k.ru/articles/ispolzovanie-gazovyh-turbin-dlya-kombinirovannogo-proizvodstva-energii>.

48. Блинова, В. Л., Зубкова, И. С., Богданца, С. В., Комарова, О. В., Дерябина, Г. А. Исследования эрозионного износа лопаточного аппарата осевых турбокомпрессоров (обзор). – паротурбинные, газотурбинные, парогазовые установки и их вспомогательное оборудование / В. Л. Блинова, И. С. Зубкова, С. В. Богданца, , О. В. Комарова, Г. А. Дерябина//ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА. – 2023. – № 6. – С. 41–55.

49. Назначение КВОУ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://dm.energy/gazovye-turbiny/komponenty-gtu/komplektuyushhie/filtry/filtry-kvou-dlya-gtu> .

50. Фильтры КВОУ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://dmliefer.ru/katalog/filtry-kvou> .

51. Галанцев, Н.К. Комплексные воздухоочистительные устройства (КВОУ) для газоперекачивающих агрегатов/ Н.К. Галанцев// Сборник докладов и каталог 5-й Нефтегазовой конференции «Экобезопасность – 2014». – 2014. – Москва. – С. 11–15.

52. ГОСТ Р ЕН 779-2014. Фильтры очистки воздуха общего назначения. Определение технических характеристик. Издание официальное. – М.:, Стандартинформ,2014.– 64 с.

53. Конструктивное исполнение современных комплексных воздухоочистительных устройств (КВОУ) для газоперекачивающих агрегатов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.sovmash.com/node/92> .

54. Комплексные воздухоочистительные установки [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://panor.ru/articles/kompleksnye-vozdukhoochistitelnye-ustanovki/97773.html#> .

55. Галанцев, Н. К. Комплексные воздухоочистительные устройства для газоперекачивающих агрегатов / Н. К. Галанцев // Вентиляция. Отопление. Кондиционирование: АВОК. – 2014. – № 7. – С. 66-70.

56. Галанцев, Н. К. Разработка комплексных воздухоочистительных устройств для морского применения на основе воздушных фильтров и технологий AAF International / Н. К. Галанцев // Труды 11-й Международной конференции и выставки по освоению ресурсов нефти и газа Российской Арктики и континентального шельфа стран СНГ (RAO / CIS Offshore 2013). С.-Петербург. – 2013. – С. 172–175.

57. Современные конструкции КВОУ для газотурбинных установок [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.turbine-diesel.ru/rus/node/3345> .

58. Комплексные воздухоочистительные устройства [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://samara-aviagas.ru/produkcziya/oborudovanie-dlya-gazoperekachivayushhix-agregatov-i-gazoturbinnyx-elektrostantsij/kompleksnyie-vozduxoochistitelnyie-ustrojstva> .

59. Что такое HEPA-фильтр и его эффективность для очистки воздуха [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://atmeex.ru/blog/chto-takoe-hepa-filtr-i-ego-ehffektivnost-dlya-ochistki-vozduha> .

60. Будыка, А. К., Борисов, Н. Б. Волокнистые фильтры для контроля загрязнения воздушной среды / А. К. Будыка, Н. Б. Борисов. — Москва: ИздАТ, 2008. —359 с.

61. Сергина, Н. М. Теоретическое и экспериментальное обоснование использования систем обеспыливания выбросов с вихревыми инерционными аппаратами для обеспечения экологической безопасности в производстве строительных материалов: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук: 2.1.10/ Сергина Наталия Михайловна. – Волгоград, 2021. – 302 с.

62. Зиганшин, М.Г. Разработка системы комплексных критериальных оценок эффективности и способов усовершенствования пылегазоочистных агрегатов ТЭС : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук: 05.14.14/ Зиганшин Малик Гарифович. – Казань, 2014. – 32 с.

63. Зиганшин, М.Г., Колесник, А.А., Зиганшин, А.А. Проектирование аппаратов пылегазоочистки/ М. Г. Зиганшин, А. А. Колесник, А. М. Зиганшин. – 2-е изд., перераб. и доп. – Спб.: Издательство Лань, 2014. –544 с.
64. Белоусов, В.В. Теоретические основы процессов газоочистки/ В.В. Белоусов. – М.: Metallurgiya, 1988. – 256 с.
65. Ватавак, В.М. и др. Защита атмосферы от промышленных загрязнений/ В.М. Ватавак; под ред. Калверта С. Инглунда Г.М. – М.: Metallurgiya, 1988.-760 с.
66. Страус, В. Промышленная очистка газов / В. Страус. пер. с англ. М.: Химия, 1981. – 681 с.
67. Zick A.A., Homsy G.M. // J. Fluid Mech. 1982. V. 115. P. 13.
68. Ишанходжаева, М.М. Физическая химия. Часть 1. Диффузия в системах с твердой фазой/М.М. Ишанходжаева. – Спб.:СпбГТУРП, 2012. – 35 с.
69. Фильтрующие пылеуловители. 8.1 Фильтры [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://studfile.net/preview/5700706/page:11/> .
70. Рукавные фильтры - принцип работы, схема и устройство [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://sibelkon.ru/base/rukavnye-filtry/> .
71. Фильтры в работе насосных станций пластинчатые, пористые [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.ugm74.com/stati/filters-nasosnyx-stancii-follow/> .
72. Пористые фильтры [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://studwood.net/1548833/matematika\\_himiya\\_fizika/poristye\\_filtry](https://studwood.net/1548833/matematika_himiya_fizika/poristye_filtry) .
73. Ужов, В.Н., Мягков, Б.И.. Очистка промышленных газов фильтрами/ В.Н. Ужов, Б.И. Мягков. – М.: Химия, 1970. – 320 с.
74. Биргер, М.И., Вальдберг, А.Ю., Мягков Б.И. и др. Справочник по пыле- и золоулавливанию / М.И. Биргер [и др.]//Под общ.ред. А.А.Русанова. 2 -е изд. перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 312 с.
75. Посохин, В.Н. Расчет местных отсосов от тепло- и газовыделяющего оборудования / В.Н. Посохин. – М.: Машиностроение, 1984. – 160с.

76. Посохин, В.Н. Применение метода изображений для расчета скорости подтекания к всасывающим щелевидным отверстиям / В.Н. Посохин // Известия вузов. Строительство и архитектура. – 1988. – №2. – С.100-102.

77. Posokhin, V.N. On calculating separated flows near sinks / V.N. Posokhin, I.L. Gurevich // Russian Aeronautics. Allerton Press Inc./ New York. – 1995. – V.38, No.4. – P. 74-77.

78. Посохин, В.Н., Салимов, Н.Б., Лабуткин, А.Г., Катков, М.В. К расчету очертаний вихревых зон на входе во всасывающие отверстия / В.Н. Посохин, Н.Б. Салимов, А.Г. Лабуткин, М.В. Катков // Известия вузов. Строительство. – 1999. – №2-3. – С. 98-101.

79. Маклаков, Д.В., Посохин, В.Н. О форме свободной линии тока на входе в щелевидный сток / Д.В. Маклаков, В.Н. Посохин // Известия вузов. Строительство. – 2004. – №2. – С. 74-78.

80. Логачев, И.Н. Потенциальное движение воздуха у всасывающей щели/ И.Н. Логачев // Вентиляция и очистка воздуха. –1969. – С. 143-150.

81. Логачев, К.И., Пузанок, А.И., Зоря, В.Ю. Компьютерное моделирование пылегазовых потоков в пульсирующих аэродинамических полях/ К.И. Логачев, А.И. Пузанок, В.Ю. Зоря // Вычислительные методы и программирование. –2006. – 7, № 2. – С. 65-71.

82. Аверкова, О.А., Зоря, В.Ю., Логачев, И.Н., Логачев, К.И. К вопросу о моделировании пылегазовых потоков в аспирационном укрытии / О.А. Аверкова, В.Ю. Зоря, И.Н. Логачев, К.И. Логачев // Вычислительные методы и программирование. – 2009. – 10, № 2. – С. 185-190.

83. Логачев, К.И., Пузанок, А.И., Посохин, В.Н. Расчет течений на входе в отсосы-раструбы методом дискретных вихрей/ К.И. Логачев, А.И. Пузанок, В.Н. Посохин // Известия вузов. Проблемы энергетики. – 2004. – №7–8. – С. 61–69.

84. Логачев, К.И., Посохин, В.Н. Расчет течения вблизи круглого всасывающего патрубка / К.И. Логачев, В.Н. Посохин // Изв. вузов. Авиационная техника. – 2004. – №1. – С. 29–32.

85. Логачев, И.Н., Логачев, К.И. Аэродинамические основы аспирации/ И.Н. Логачев, К.И. Логачев. – Санкт-Петербург: Химиздат, 2005. – 659 с.
86. Кареева, Ю. Р., Зиганшин, А. М., Чухлова, М. Б. Влияние геометрии узла «вытяжное отверстие-колесо» на характеристики течения / Ю. Р. Кареева, А. М. Зиганшин, М. Б. Чухлова // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2024. – № 4(70). – С. 254-264.
87. Зиганшин, А.М., Беяева, Е.Э., Соколов, В.А. Снижение потерь давления при профилировании острого отвода и отвода с нишей / А.М. Зиганшин, Е.Э. Беяева, В.А. Соколов // Известия ВУЗов. Строительство. – 2017. – т. 697, № 1. – С. 108-116.
88. Kareeva, J., Chukhlova, M., Ziganshin, A., Logachev, K., Tussupova, K. Numerical model of the flow in the exhaust unit “opening – elbow”/ J. Kareeva, M.Chukhlova, A. Ziganshin, K. Logachev, K. Tussupova// Construction of Unique Buildings and Structures. –2023. – 109 Article No 10926. doi: 10.4123/CUBS.109.26.
89. Еремкин, А.И., Зиганшин, А.М., Зиганшин, М.Г. Уточнение эффективной высоты выброса и определение санитарно – гигиенической, экологической и технической эффективности его очистки / А.И. Еремкин, А.М. Зиганшин, М.Г. Зиганшин // Журнал экологии и промышленной безопасности. – 2007. – № 5(35). – С. 65-68.
90. Еремкин, А.И., Зиганшин, М.Г., Зиганшин, А.М. Эффективная высота неизотермического выброса при поперечном обдувании источника / А.И. Еремкин, М.Г. Зиганшин, А.М. Зиганшин // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. – 2008. – №1 (49). – С. 53-56.
91. Еремкин, А.И., Зиганшин, А.М., Зиганшин, М.Г. Трансформация параметров многокомпонентного неизотермического выброса в атмосфере / А.И. Еремкин, М.Г. Зиганшин, А.М. Зиганшин // Региональная архитектура и строительство. – 2009. – №2 (7). – С. 74-78.
92. Якупов, Р. Р., Мустафин, Т. Н., Хисамеев, И. Г. Расчёт геометрических критериев оценки профиля роторов винтового компрессора / Р. Р. Якупов, Т. Н.

Мустафин, И. Г. Хисамеев // Компрессорная техника и пневматика. – 2023. – № 1. – С. 13-15.

93. Чичканов, С.М., Галимзянов, А.А., Хадиев, М.Б., Сабиров, Р.Ф. Способ моделирования системы утилизации энергии выхлопных газов газоперекачивающих агрегатов / С.М. Чичканов, А.А. Галимзянов, М.Б. Хадиев, Р.Ф. Сабиров // Компрессорная техника и пневматика. – 2024. – № 1. – С. 33-36.

94. Поташев, А.В., Поташева, Е.В., Хисамеев, И.Г., Шарафеев, Р.Ф. О развитии квазитрехмерной модели течения в проточной части турбомашин за счет решения третьей двумерной задачи/ А.В. Поташев, Е.В. Поташева, И.Г. Хисамеев, Р.Ф. Шарафеев // Компрессорная техника и пневматика. – 2022. – № 1. – С. 17-21.

95. Парамонов, А. М. Вариативные граничные условия для решения задачи движения запыленного потока в инерционно-вакуумном золоуловителе / А. М. Парамонов, Л. В. Мостовенко // Градостроительство и архитектура. – 2019. – Т. 9, № 4(37). – С. 163-169. – DOI 10.17673/Vestnik.2019.04.23.

96. Amit Kumar Singh Parihar, Chandrashekhar Joshi, G Sri-dhar The performance of cyclones in producer gas cleaning: experimental and modeling studies / Amit Kumar Singh Parihar, Chandrashekhar Joshi, G Sri-dhar // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy. 2012. Vol. 226. № 6. P. 776-793.

97. Burton, T.M., Eaton, J.K. Fully resolved simulations of particle-turbulence interaction//Stanford University, Stanford, USA, Report No.TSD-151, 2003, 187p.

98. Зиганшин, М. Г. Системы очистки выбросов ТЭС. Часть 2. Оценки эффективности, теоретические основы и критерии оценки. Монография/ М.Г. Зиганшин. – Казань: Изд. КГЭУ, 2013. – 252 с.

99. Tomohiko, T., Eaton, J. K . Classification of turbulence modification by dispersed spheres using a novel dimensionless number// Selected for a viewpoint in physics PHYSICAL REVIEW LETTERS. PRL 101, 114502 (2008).

100. Еремкин, А.И. Оптимизация конструкций циклонных и вихревых сепараторов по расчетному параметру эффективности отделения взвешенных частиц // Высшее строительное образование и современное строительство в

России и зарубежных странах: Сб.статей по материалам 3-го технического семинара в г. Пектне и г. Шанхае/А.И. Еремкин, М.Г. Зиганшин, А.Н. Кошев.– Самарск. Гос. Арх.-строитун-т. – Мов-Самара-Пекин-Шанхай,2008. – С.73-80.(2008).

101. Пат. 2251445 Российская Федерация МПК7В 01 D 46/26, В 04 С 9/00. Фильтр-циклон для очистки газов / С.Ю.Панов, С.В.Этин, Н.М.Анжеуров и др. (РФ): ВГТА (РФ). - №2003122539/15; Заявлено 18.07.2003; Опубл. 10.05.2005, Бюл. №19.

102. Пат. RU 56221 U1 МПК В04С 9/00(2006.01). ФИЛЬТР-ЦИКЛОН ДЛЯ ОЧИСТКИ ГАЗОВ / Катин В.Д., Долгов Р.В., Ахтямов М.Х., Агошков А.И.; патентообладатель ГОУ ВПО "Дальневосточный государственный университет путей сообщения" (ДВГУПС) (RU); подача заявки: 2006.05.19; публикация патента: 2006.09.10. – 12 с.: ил.

103. Пат. RU 100737 U1 МПК В04С 9/00(2006.01). ЦИКЛОН-ФИЛЬТР/Долгов Р.В., Ахтямов М.Х.; патентообладатель ГОУ ВПО "Дальневосточный государственный университет путей сообщения" (ДВГУПС) (RU); подача заявки: 2010.07.28; публикация патента: 2010.12.27. – 12 с.: ил.

104. Пат. RU 2 068 303 С1 МПК В04С 9/00(2006.01). ЦИКЛОННЫЙ ФИЛЬТР/ Черныш Н.К., Шевченко В.С., Симанович Л.П., Автушко С.В.; патентообладатель Институт надежности машин АН Беларуси (BY); подача заявки: 1988.11.09; публикация патента: 1996.10.27. – 3 с.: ил.

105. Пат. 2361678 Российская Федерация МПК В04С9/00, В01D50/00. Циклон-фильтр / Зиганшин М. Г.; патентообладатель Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Казанский государственный архитектурно-строительный университет ФГОУ ВПО КазГАСУ (RU); подача заявки: 2008-03-14; публикация патента: 20.07.2009. – 5 с.: ил.

106. Пат. 2 366 516 С1 Российская Федерация В04С 5/24(2006.01), В04С 7/00(2006.01). Батарейный циклон/ Василевский М.В., Зыков Е. Г., Логинов В.С., Разва А.С., Некрасова К.В.; патентообладатель Государственное

образовательное учреждение высшего профессионального образования Томский политехнический университет (RU); подача заявки: 2008.04.11; публикация патента: 2009.09.10. – 13 с.: ил.

107. Катин, В. Д., Ахтямов, М. Х., Долгов, Р. В., Кулябина, Н. В. Модернизация и разработка высокоэффективных устройств циклонного типа для очистки выбросов от золы и пыли // В. Д. Катин, М. Х. Ахтямов, Р. В. Долгов, Н. В. Кулябина // Экология промышленного производства. – 2016. – № 4(96). – С. 35-38. – EDN XEMACD.

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

109. Замалиева, А.Т. Усовершенствование газоочистных циклонно-фильтрующих элементов топливно-энергетической инфраструктуры городских энергетических систем: диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук: 05.14.01/ Замалиева Альбина Таврисовна. — Казань, 2020. — 170 с.

110. Зиганшин, М.Г., Колесник, А.А., Посохин, В.Н. Проектирование аппаратов пылегазоочистки/ М.Г. Зиганшин, А.А. Колесник, В.Н. Посохин. – М.: Экопресс-ЗМ, 1998. – 505с.

111. Дейч, М.Е. Газодинамика решеток турбомашин / М.Е. Дейч; Под ред. чл.-корр. РАН Г.А. Филиппова. — М. : Энергоатомиздат, 1996. — 528 с.

112. Литвинова, Н. А. Исследование параметров веерных струй в помещениях от приточных устройств с очисткой воздуха зданий / Н. А. Литвинова, В. Н. Азаров, А. Ф. Шаповал, О. А. Степанов // Вестник евразийской науки. — 2024. — Т. 16. — № 4. — URL: <https://esj.today/PDF/37SAVN424.pdf> .

113. ГОСТ Р 51568-99 (ИСО 3310-1-90) Сита лабораторные из металлической проволочной сетки. Технические условия. Издание официальное. – М.: Госстандарт России, 1999. – 11с.

114. ANSI/ASHRAE Addendum b to ANSI/ASHRAE Standard 52.2-2007 Method of Testing General Ventilation Air-Cleaning Devices for Removal Efficiency by Particle Size. – 16 p.

115. ISO 12103-1:2024. Road vehicles Test contaminants for filter evaluation Part 1: Arizona test dust. 43.060.20; 43.060.40. TC 22/SC 34.– 22 p.
116. ГОСТ 31831-2012. Пылеуловители центробежные. Требования безопасности и методы испытаний. Издание официальное. – М.: Стандартинформ, 2013. – 11 с.
- 117 Немного о турбулентности [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://flowvision.ru/ru/support-menu-header-ru/blog-ru/turbulence> .
118. Shur M.L., Spalart P.R., Strelets M.K. Jet noise computation based on enhanced DES formulations accelerating the RANS-to-LES transition in free shear layers // International Journal of Aeroacoustics. – Vol. 15, no. 6/7.– 2006.– P. 595–613.
119. Багаев, Д.В., Сыралева, М.Н. Численное моделирование свободно-конвективного течения около вертикальной поверхности нагрева / Д.В. Багаев, М.Н. Сыралева // Труды Крыловского государственного научного центра. – 2008. – Т. 2. – С. 93–98.
120. Смирнов, С.И., Смирнов, Е.М. Опыт применения полуэмпирических дифференциальных моделей турбулентности для расчета конвекции жидкого металла в подогреваемом снизу цилиндре / С.И. Смирнов, Е.М. Смирнов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. – 2022. – Т. 15, № 3. – С. 43–60.
121. Hoffmann, A. and Stein, L. Gas Cyclones and Swirl Tubes, - Berlin, Heidelberg: N.Y., Springer. – 2002. – P. 422.
122. Blackburn, H. and Schmidt, S. Spectral element filtering techniques for large eddy simulation with dynamic estimation, J. Comput. Phys.– 186. –2003. – P. 610-629.
123. Lilly, D. A proposed modification of the Germano subgrid-scale closure method, Phys. Fluids. – A4. – 1992. –P.633-635.
124. Волков, П.М. Моделирование запыленных потоков и его практическое применение. Теория подобия и моделирования/ П.М. Волков. – М.: Изд. АН СССР, 1987. – 256 с.

125. Simulation of mass-loading effects in gas–solid cyclone separators / J.J. Derksen, S. Sundaresan, H.E.A. van den Akker // Powder Technology. – Vol. 163. № 1-2. –2006. – P. 59-68.

126. Large eddy simulation of the vortex end in re-verse-flow centrifugal separators /G. I. Pisarev, A. C. Hoffmann, W. Peng [et al.] // Numerical analysis and applied mathematics. – 2009. – Vol. 1168, Iss. 2. – P. 641–644.

127. Liu, W. K., Li, S., Park, H. S. Eighty Years of the Finite Element Method: Birth, Evolution, and Future // Archives of Computational Methods in Engineering. – 2022. – Vol. 29, No. 6. – P. 4431-4453. – DOI: 10.1007/s11831-022-09740-9. – ISSN 1134-3060. – S2CID 235794921.

128. Mofakham, A. A., Ahmadi, G. On random walk models for simulation of particle-laden turbulent flows // International Journal of Multiphase Flow. – 2020. – Vol. 122. – ISSN 0301-9322. – DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2019.103157.

129. Versteeg, H.K., Malalasekera, W. An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method. Pearson Education, 2007. –P.503. ISBN 0131274988, 9780131274983.

130. L. Cambier and J. P. VEUILLOT. Status of the elsA CFD Software for Flow Simulation and Multidisciplinary Applications, 2008.

131. Cao S., Fan J. T. Numerical model for penetration process of a deformable projectile into ductile metallic target plate considering the interaction of projectile and target // International Journal of Impact Engineering. 2025. Vol. 195. p. 105107.

132. Tang J., Fan J., Chen S. A numerical model for calculating the impact-induced depression // International Journal of Impact Engineering. 2024. Vol. 183. p. 104792.

133. Sen S., Shaw A., Nayak S. A mathematical model for perforation of metal plates through adiabatic shear plugging // International Journal of Impact Engineering. 2022. Vol. 163. p. 104175.

134. Borvik T., Hopperstad O., Berstad T., Langseth M. A computational model of viscoplasticity and ductile damage for impact and penetration // European Journal of Mechanics, A/Solids. 2001. Vol. 20. No. 5. pp. 685-712.

135. ANSYS Fluent, 23 R1. User's and Theory Guide. – Canonsburg, Pennsylvania, USA: ANSYS, Inc., 2023. – 500 p.

136. Батури́н, О.В. Построение расчетных моделей в препроцессоре Gambit универсального программного комплекса Fluent: учеб. пособие/ О.В. Батури́н, Н.В. Батури́н, В.Н. Матвеев. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2009.- 172 с.

137. Зиганшин, А.М. Вычислительная гидродинамика. Постановка и решение задач в процессоре Fluent/ А.М. Зиганшин. – Казань: КГАСУ, 2011. – 81 с.

138. 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. – 2019. – Vol. 288. – P. 012077.

139. Belyaeva, G. I., Ziganshin, M. G. Numerical studies of the aerodynamics of dispersed flows in multicyclones / G. I. Belyaeva, M. G. Ziganshin // Тинчуринские чтения - 2023 "Энергетика и цифровая трансформация" : Материалы Международной молодежной научной конференции. В 3-х томах, Казань, 26–28 апреля 2023 года / Под общей редакцией Э.Ю. Абдуллазянова. – 2023. – Vol. 2. – P. 22-24.

140. Бе́ляева, Г.И., Горбунов, С.В., Зиганшин, М.Г. Комбинированное (2d - 3d) численное исследование эффективности воздухоочистительного устройства/ Г.И. Бе́ляева, С.В. Горбунов, М.Г. Зиганшин//Надежность и безопасность энергетики.– 2024. – Т. 17.– № 4. – С. 299-305.

141. Бе́ляева, Г.И., Зиганшин, М.Г. Численное моделирование двухфазных потоков в конструктивно сложных аппаратах очистки воздуха/ Г.И. Бе́ляева, М.Г. Зиганшин//Надежность и безопасность энергетики.– 2025. – Т.18.– №2. – С. 53-58.

142. ГОСТ 34100.3-2017 ГОСТ (ISO/IEC Guide 98-3:2008). Неопределенность измерения. Руководство по выражению неопределенности

измерения. Часть 3. (ISO/IEC Guide 98-3:2008, ЮТ). Издание официальное. – М.: Сандартинформ, 2018. – 112 с.

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

144. Пакшин, А.В. Основы инженерного проектирования теплоэнергетических систем: Учебное пособие/ А.В. Пакшин, Е.А. Блинов.– СПб: СЗТУ, 2004.-142 с.

145. СТО Газпром 2-1.20-601-2011. Методика расчета эффекта энергосбережения топливно-энергетических ресурсов, расходуемых на собственные технологические нужды магистрального транспорта газа. Издание официальное. – М.: Открытое акционерное Общество «ГАЗПРОМ» Общество с ограниченной ответственностью «Научно-исследовательский институт природных газов и газовых технологий – Газпром ВНИИГАЗ» Общество с ограниченной ответственностью «Газпром экспо», 2012. – 171 с.

**Приложение А.1 Акт внедрения предложений по повышению эффективности осаждения мелкодисперсных частиц  $PM_{10}$ ,  $PM_{2,5}$  в КВОУ КС ООО «Газпром трансгаз Казань»**

УТВЕРЖДАЮ  
Заместитель генерального  
директора по производству  
ООО «Газпром трансгаз Казань»  
Р.Х. Салихов



**АКТ**  
внедрения предложений по повышению эффективности осаждения  
мелкодисперсных частиц классов  $PM_{10}$ ,  $PM_{2,5}$  в комплексных  
воздухоочистительных устройствах компрессорных станций (КВОУ КС)

Комиссия в составе: председатель – Салихов Р.Х., члены комиссии – начальник ПОЭКС Шакиров И.А., начальник ИТЦ Тахавиев М.С., рассмотрев предложения по повышению эффективности очистки воздуха от мелкодисперсных частиц при его подготовке в КВОУ КС (приложение к настоящему акту на 7 листах), подтверждает, что полученные в диссертационных работах Беляевой Г.И., Горбунова С.В. 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%, представляют практический интерес и будут использованы при ремонтных работах и модернизации КВОУ компрессорной станции «Арская».

Председатель комиссии

Члены комиссии



Р.Х. Салихов

И.А. Шакиров

М.С. Тахавиев

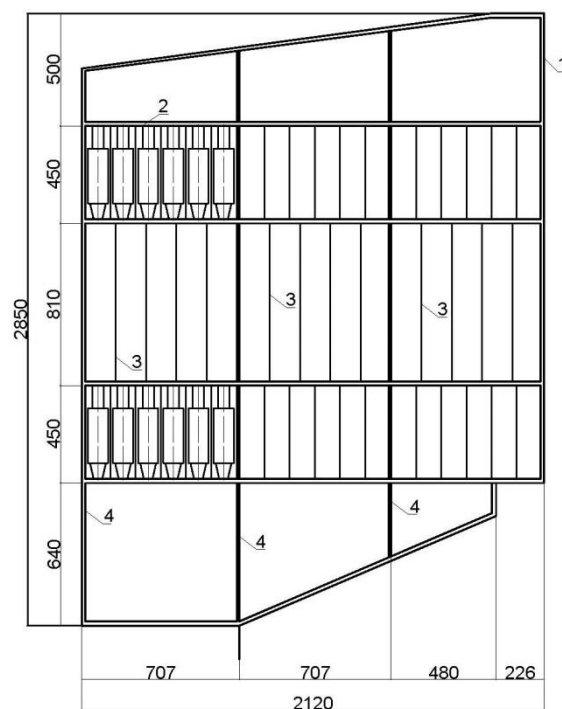
**ПРЕДЛОЖЕНИЕ**

по повышению эффективности осаждения мелкодисперсных частиц классов  $PM_{10}$ ,  $PM_{2,5}$  в комплексных воздухоочистительных устройствах компрессорных станций (КБОУ КС)

Предлагается на основе численных исследований с опытной валидацией результатов применить вставки пористых фильтров в элементы циклонных модулей при ремонтных работах и модернизации КБОУ на КС «Арская» ООО «Газпром трансгаз Казань», что позволит, кроме повышения эффективности осаждения мелкодисперсных частиц классов  $PM_{10}$ ,  $PM_{2,5}$ , повысить энергоэффективность работы КБОУ, уменьшить его габариты и снизить расход фильтрующего материала типа НЕРА. Данное предложение отвечает утвержденной постановлением Правления ПАО «Газпром» от 11.10.2018 г. № 39 и обязательной для исполнения всеми работниками ПАО «Газпром» и его производственных дочерних обществ Политике ПАО «Газпром» в области энергоэффективности и энергосбережения, в части максимально эффективного использования природных энергетических ресурсов и потенциала энергосбережения, а именно: постоянного повышения энергетической эффективности ПАО «Газпром» и его дочерних обществ на основе эффективного управления технологическими процессами и применения инновационных технологий и оборудования, а также постоянного снижения уровня удельных затрат за счет нормирования, рационального использования и экономии энергетических ресурсов при осуществлении производственной деятельности. Техническим основанием внедрения являются положения СТО Газпром 2-2.3-684-2012 «Компрессорные станции. Технологические установки. Порядок проведения технического обслуживания и ремонта». Методическим основанием для внедрения предложения служит методика комбинированного 2d-3d- численного исследования модулей циклонных элементов, представленная ниже в пояснительной записке к предложению.

## ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА К ПРЕДЛОЖЕНИЮ

Актуальна разработка энерго- и материалоэффективных систем теплоснабжения, обработки воздуха, газотранспортных и производственных объектов. Для повышения давления газов в компрессорных установках, используемых в газораспределении (например, для газовых турбин), необходима тщательная очистка газовой среды от взвесей (PM10, PM2,5). Эти частицы соизмеримы с точностью обработки поверхностей компрессоров и турбин, что влияет на их энергоэффективность и безаварийность. Современные комплексные воздухоочистительные устройства (КВОУ) на компрессорных станциях (КС) газотранспортных систем громоздки и тяжелы. Схематичное расположение основных элементов КВОУ представлено на рисунке 1.



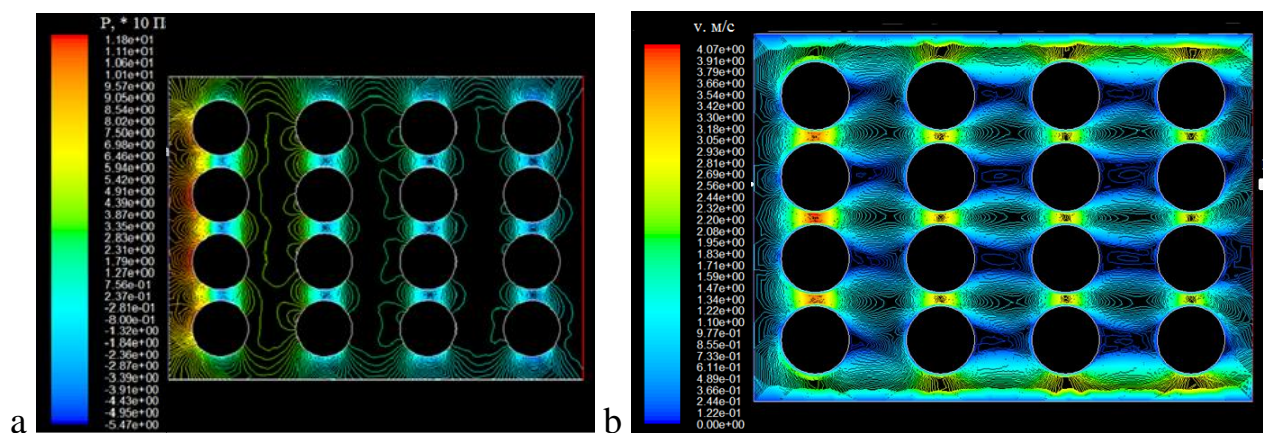
**Рисунок 1.** Схема расположения основных элементов КВОУ газоконпрессорной станции. 1- корпус КВОУ, 2 – секции циклонирования, 3 – секции тонкой очистки, 4 – секции шумоглушителей

На КС "Арская" в КВОУ воздух очищается в две ступени (грубая и тонкая очистка). Существуют два типа КВОУ: с циклонными элементами и кассетными фильтрами, либо с рукавными фильтрами. Замена или модернизация КВОУ

затруднена. Современные КВОУ используют высокоэффективные пористые фильтры (типа НЕРА) на обеих ступенях. Циклонная очистка, ранее считавшаяся устаревшей, вновь актуальна из-за проблем с зарубежными НЕРА-фильтрами. НЕРА-фильтры не подлежат легкой регенерации и утилизации из-за сложности удаления частиц и короткого срока службы (до двух лет), образуя много отходов. Циклонные элементы, напротив, служат десятилетиями, легко утилизируются и поэтому вызывают растущий интерес за рубежом.

Создание численных моделей КВОУ сложно, а численные эксперименты требуют много времени и ресурсов. В диссертационной работе Беляевой Г.И. «Комбинированное численное исследование совершенствования воздухоочистительных устройств газотранспортных, энергетических, промышленных компрессорных станций» разработан комбинированный 2D/3D метод исследования модулей КВОУ: 2D-модели определили оптимальные локации циклонных элементов для 99% осаждения взвеси, а 3D-модели проверили их работу с фильтрующими вставками.

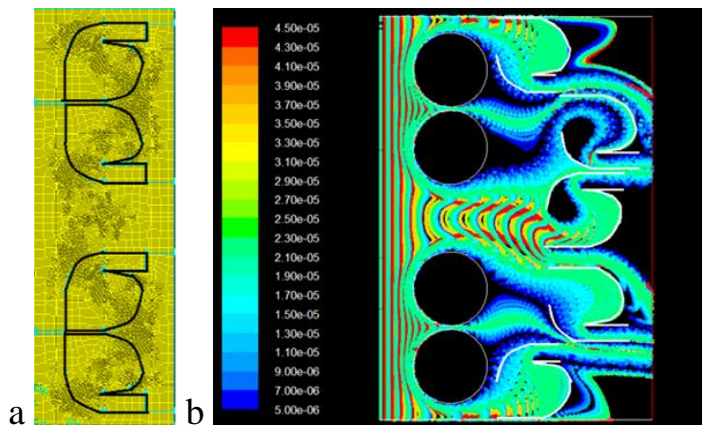
С целью оптимизации размещения циклонных элементов в блоке, было выполнено 9 численных экспериментов. Исследования проводились на 2D-модели, где 16 элементов расположены в коридорном порядке (типа ЦБ). Результаты анализа полей давления и скорости позволили определить оптимальное расположение входов (рисунок 2).



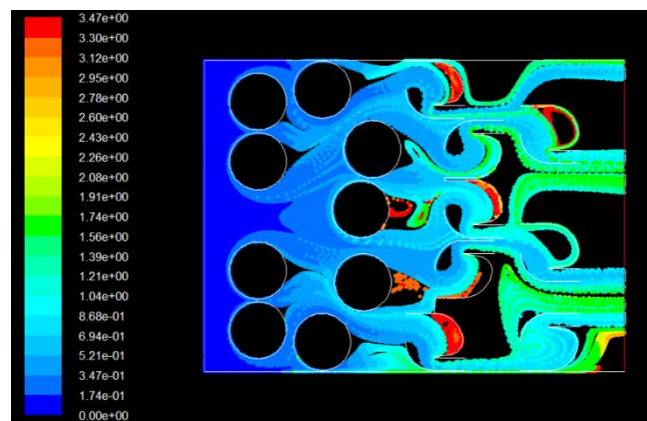
**Рисунок 2.** Поля статического давления (а) и скорости (б) в 2d-модели батарейного циклона типа ЦБ-16

Процесс определения координат наилучшего расположения элементов и их

входов осуществлялся последовательно по рядам. Точность локализации обеспечивалась построением геометрии модели в программе Design Modeler (рисунок 3).



**Рисунок 3.** Геометрическое моделирование элементов первого (а) и второго (b) рядов мультициклона

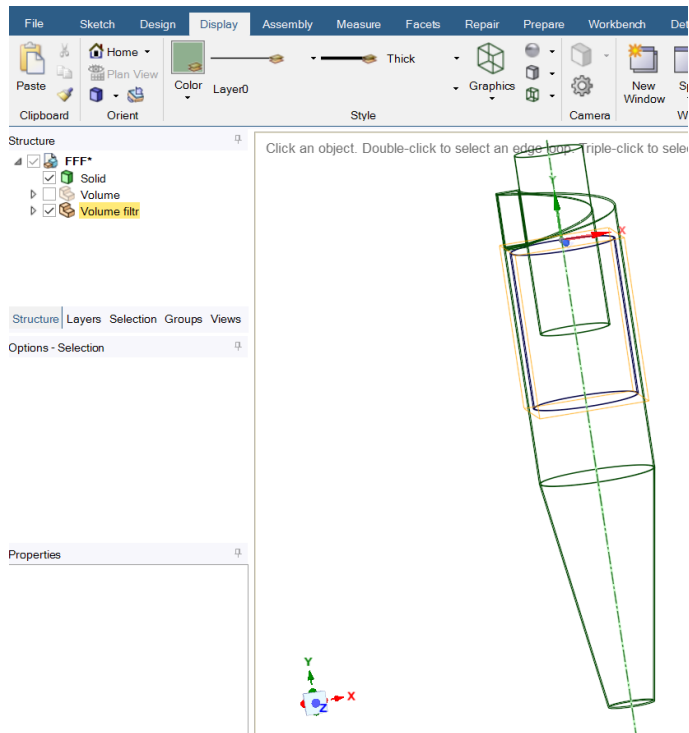


**Рисунок 4.** Распределение размеров частиц, мкм, в следах (траекториях) прохождения четырех рядов циклонных элементов

После определения оптимальной локации элементов четвертого ряда (рисунок 4), численные эксперименты показали полный коэффициент осаждения взвешенных частиц в 99,25% после 4 рядов циклонов.

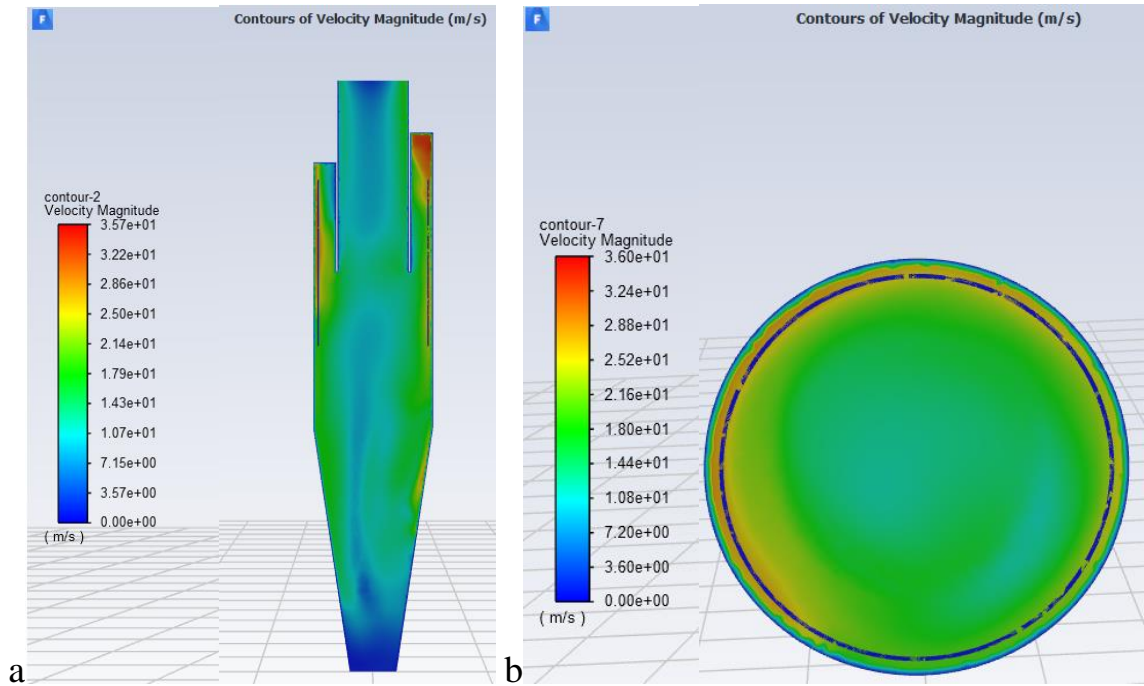
В диссертационной работе Горбунова С.В. «Численные исследования снижения энергозатрат при перемещении газовых потоков в каналах сложной геометрии» проведены испытания циклонно-фильтрующих элементов на основе

оптимальной конструкции. В ANSYS SpaceClaim Direct Modeler (SCDM) создана 3D-модель циклонного элемента мультициклона (диаметр корпуса 245 мм, полуулиточный ввод) с пористым фильтром. Геометрия фильтра – цилиндра на 20 мм меньше корпуса (рисунок 5).

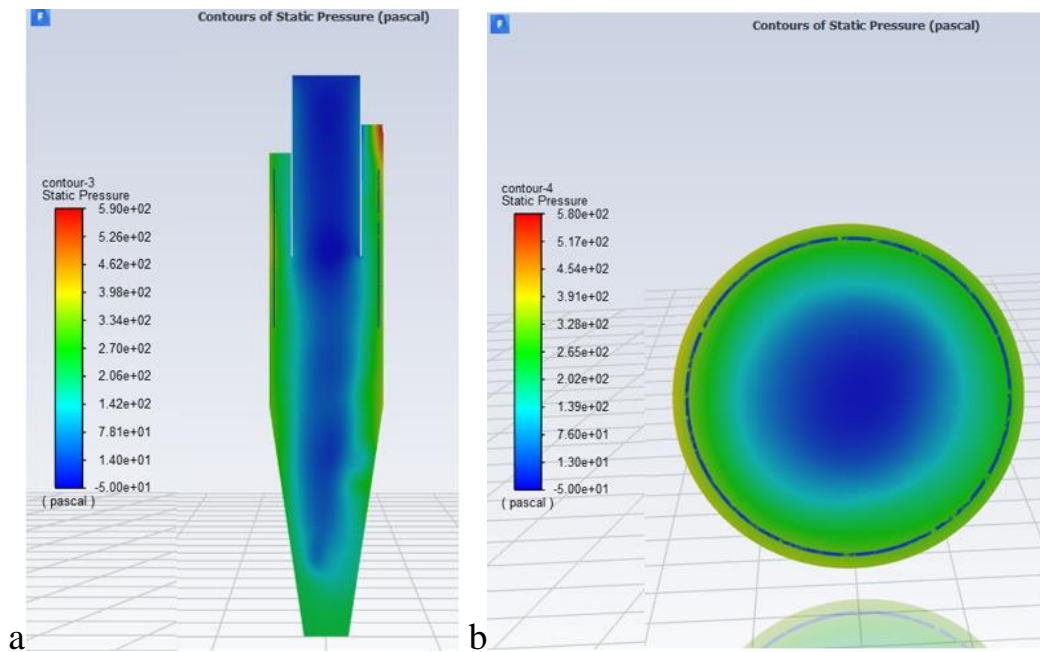


**Рисунок 5.** Создание геометрической модели фильтра и его вставка в циклонный элемент

Рисунки 6 и 7 демонстрируют поля скоростей и давлений в циклонном элементе с фильтрующей вставкой, рассчитанные с помощью численной модели.



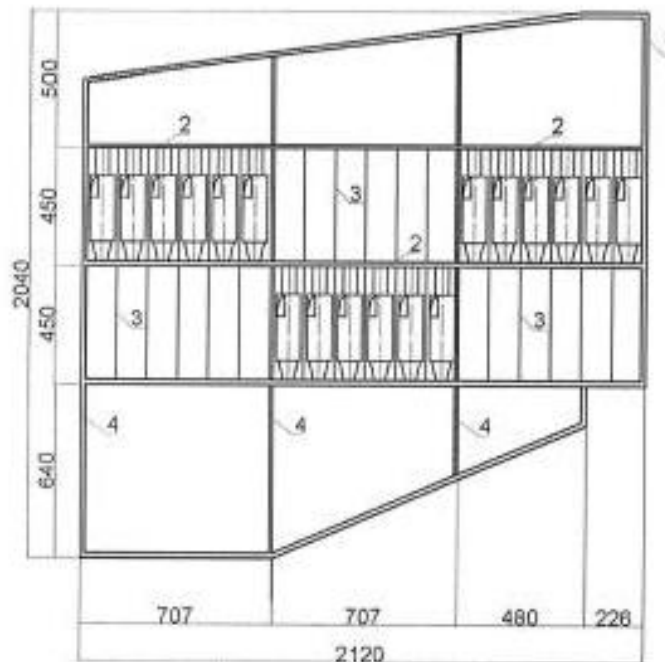
**Рисунок 6.** Поля скоростей в продольном (а) и поперечном (б) сечениях циклонного элемента с фильтрующей вставкой



**Рисунок 7.** Поля давлений в продольном (а) и поперечном (б) сечениях циклонного элемента с фильтрующей вставкой

Можно видеть, что структура потока при наличии фильтрующей вставки качественно остается такой же, как и без фильтра, вплоть до

сохранения прецессии восходящего потока внутри корпуса. Максимальная скорость потока составила 32 м/с, перепад давления на элементе 440 Па, что подтверждает физическую адекватность результатов численных исследований. Они показали требуемое для класса Е7 фракционное осаждение частиц диаметром 0,4 мкм на 85% при полном коэффициенте очистки 99,2%.



**Рисунок 8.** Схема расположения основных элементов усовершенствованной ВОУ. 1- корпус ВОУ, 2 – секции циклонно-фильтрующих элементов, 3 – секции пылеудаления, 4 – секции шумоглушителей

Это позволяет объединить грубую и финишную ступени очистки в одном аппарате и существенно уменьшить габариты и материалоемкость ВОУ (рисунок 8).

Составители:

Ведущий инженер ОСНКР МТР ИТЦ  
ООО «Газпром трансгаз Казань»

Беляева Г.И.

Инженер, монтажник СС ПТО  
ООО «Инфоматика»

Горбунов С.В.

**Приложение А.2 Акт**

**внедрения предложений по повышению эффективности очистки газов на технологическом оборудовании АО «Эссен Продакшн АГ» от мелкодисперсных частиц классов PM10, PM2,5**

Утверждаю

Главный инженер АО «Эссен Продакшн АГ»

Идрисов

« 15 » \_\_\_\_\_ 2024 г.



**АКТ**

**внедрения предложений по повышению эффективности очистки воздуха на технологическом оборудовании АО «Эссен Продакшн АГ» от мелкодисперсных частиц классов PM10, PM2,5**

В АО «Эссен Продакшн АГ» принято к внедрению предложение по повышению эффективности очистки воздуха от мелкодисперсных частиц классов PM10, PM2,5 с минимальными энергетическими и материальными затратами в системе воздухораспределительного оборудования, с целью повышения эффективности систем воздухоочистки и надежности работы дорогостоящего компрессорного оборудования за счет снижения износа рабочих поверхностей.

Представленное предложение получено в результате компьютерного моделирования конструкций и элементов сепарационного оборудования на основе методов вычислительной гидродинамики (CFD) с верификацией данных по результатам опытных исследований, что показало целесообразность конструктивного дополнения элементов комплексного воздухоочистительного устройства фильтрующими вставками.

Техническим результатом является повышение эффективности очистки воздуха (технических газов) от мелкодисперсных частиц классов PM10, PM2,5 с уменьшением абразивного износа поверхностей на исполнительных механизмах компрессорного оборудования при установке дополнительных фильтрующих элементов в комплексном воздухоочистительном устройстве в качестве второй ступени очистки.

Основанием для внедрения КВОУ служат:

1. Соответствие указанного предложения требованиям, обязательным для эксплуатации узла очистки воздуха согласно действующих нормативных документов пищевых и промышленных производств (СП 2.1.3678-20, ТРТС 021/2011) АО «Эссен Продакшн АГ» и его филиалов;
2. Соответствие требованиям ГОСТ 17433-80, согласно которым концентрация примесей твёрдых частиц размером 10 мкм не должна превышать 0,3 мг/кг. Разработка позволяет достичь увеличения пропускной способности очистных аппаратов при повышении качества очистки воздуха перед компримированием, которое выражается в уменьшении размера частиц, улавливаемых на 50% (диаметра отсекаания), со средних для мультициклонов значений 10 мкм до 1,6 мкм.

Главный энергетик  
АО «Эссен Продакшн АГ»

Д.А. Ефремов

## Приложение А.3 Акт внедрения результатов исследования, использованных в учебном процессе студентов ФГБОУ ВО «КГЭУ»

УТВЕРЖДАЮ

Первый проректор – проректор по учебной работе ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»

А.В. Леонтьев

«27» 05 2025 г.

АКТ

внедрения результатов исследования, использованных в учебном процессе по дисциплине «Обеспечение экологической безопасности энергоснабжающих предприятий ЖКХ» для студентов ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»

Настоящим актом подтверждается, что в процессе обучения студентов направления подготовки 13.04.01 Теплоэнергетика и теплотехника (магистратура) в 2023/2024, 2024/2025 учебных годах использованы результаты численных исследований авторов по повышению эффективности пылегазоочистных аппаратов циклонного типа.

Указанные результаты получены при выполнении на кафедре «Атомные и тепловые электрические станции» (АТЭС) диссертационной работы на соискание ученой степени кандидата технических наук соискателем кафедры АТЭС Беляевой Г.И., и магистерской диссертационной работы магистрантом кафедры АТЭС Горбуновым С.В. (научный руководитель – профессор кафедры АТЭС д.т.н., доцент Зиганшин М.Г.)

Внедрение результатов исследований способствует повышению эффективности обучения обучающимися компетенций при освоении дисциплины «Обеспечение экологической безопасности энергоснабжающих предприятий ЖКХ» вследствие обретения навыков конструирования и расчетов новых типов газоочистных устройств, обеспечивающих высокий класс очистки (не ниже Е7) от мелкодисперсных взвесей классов РМ<sub>10</sub>, РМ<sub>2.5</sub>.

Акт составлен на кафедре АТЭС, институт атомной и тепловой энергетики (ИАТЭ) ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»

Директор ИАТЭ  
к.т.н., доцент

Заведующий кафедрой АТЭС  
д.х.н., профессор

С.О. Гапоненко

Н.Д. Чичирова

Специалист С.В. Чичирова Н.Д.  
С.В. Чичирова Н.Д.  
С.В. Чичирова Н.Д.

Приложение Б.1 Патент на полезную модель № 190593 «Батарейный циклон с циклонными элементами «циклон-фильтр»



## Приложение Б.2 Патент на полезную модель № 199050 «Циклон-фильтр»



## Приложение В.1 Рекомендации по выполнению комбинированных 2d- и 3d-исследований для рационализации численных исследований с целью совершенствования существующих и конструирования новых аппаратов типа ВОУ с большим числом очистных элементов

Предложен способ оптимизации численного моделирования работы и размещения циклонных элементов в воздухоочистных модулях, позволяющий достичь эффективности осаждения частиц размером от 0,5 мкм на уровне 99% и выше. Метод основан на комбинированном использовании 2d- и 3d-моделирования. Сначала проводится 2d-анализ потоков и процессов в модуле для определения оптимального расположения циклонных элементов. Затем выполняется 3d-моделирование одиночного циклонного элемента, результаты которого используются для масштабирования и размещения подобных элементов в позициях, определенных на этапе 2d-моделирования. Такой подход позволяет решить сложную задачу с минимальными вычислительными затратами. Далее, на примере оптимизации расположения циклонных элементов в серийном мультициклоне типа ЦБ (рисунок 1), демонстрируется практическое применение этой техники комбинированного 2d- и 3d-моделирования.

Оптимальное расположение циклонных элементов в модуле было определено путем проведения 9 численных исследований. Модель мультициклона включала 16 возвратно-поточных элементов, расположенных в коридорной конфигурации. На основе анализа полей статического давления и скорости были установлены оптимальные позиции для входов циклонных элементов. Созданная численная модель позволила не только оценить влияние характеристик дисперсного потока на эффективность улавливания пыли, но и разработать методику оценки эффективности расположения циклонных элементов и входных патрубков с учетом их гидравлического сопротивления. В итоге, входные патрубки полуулиточных входов циклонных элементов были размещены в зоне с максимальным гидравлическим сопротивлением, что является ключевым фактором для достижения высокой эффективности.

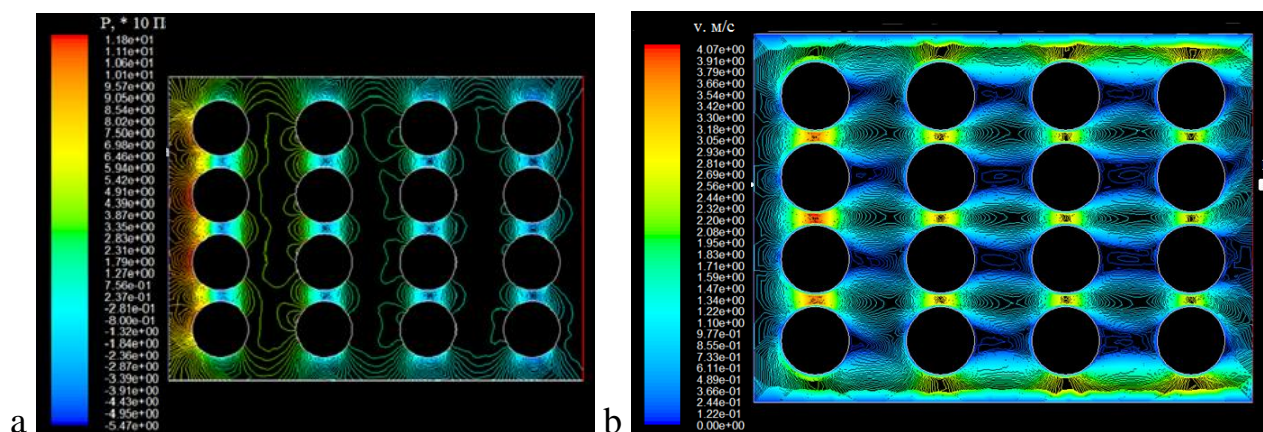


Рисунок 1. Поля статического давления (а) и скорости (б) в 2d-модели батарейного циклона типа ЦБ-16

Оптимальные координаты полуулиточных входов, заменяющих круглые препятствия, определялись по полям давления и скорости. Затем последовательно уточнялись координаты элементов и их входов. Для точности вычислений геометрия модели выполнена в Design Modeler (рисунок 2).

В эксперименте полуулиточные элементы первого ряда заменены на круглые, сохранив их расположение, чтобы входящий поток обтекал препятствия по прежним траекториям. Второй ряд остался с полуулиточными элементами.

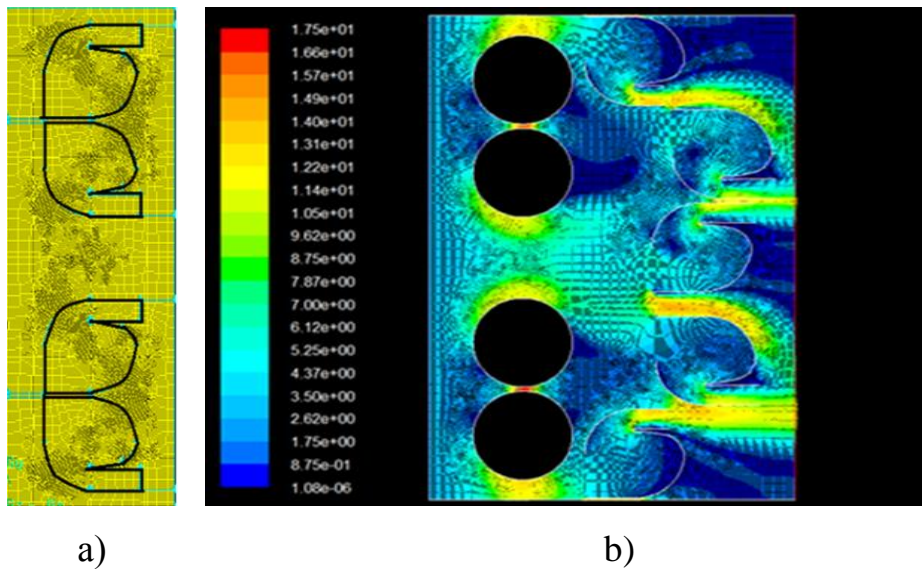


Рисунок 2. Геометрическое моделирование элементов первого (а) и второго (б) рядов модуля КВОУ

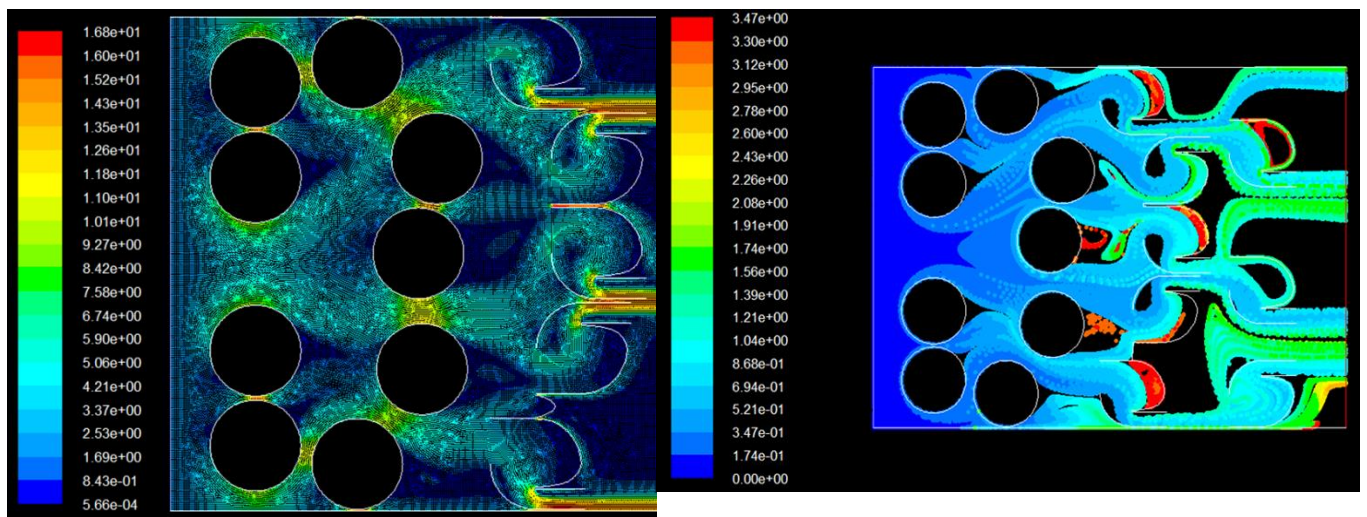


Рисунок 3. Геометрическое моделирование элементов третьего ряда модуля КВОУ

Рисунок 4. Распределение размеров частиц, мкм, в следах (траекториях) прохождения четырех рядов циклонных элементов модуля КВОУ

После оптимизации расположения полуулиточных элементов во втором ряду, их заменили на круглые элементы. Затем, путем моделирования, определили оптимальное количество и расположение полуулиточных элементов в третьем

ряду. Аналогично оптимизировали четвертый ряд. Общая эффективность улавливания частиц после всех четырех рядов достигла 99,25%.

Вторым этапом метода на основании конструкции с наилучшей локацией элементов в циклонном модуле проведены испытания циклонно-фильтрующих элементов. Для продолжения исследования в приложении ANSYS SpaceClaim Direct Modeler (SCDM) была создана 3d-геометрия циклонного элемента мультициклона с полуулиточным вводом и диаметром корпуса 245 мм, который был оснащен пористым фильтром. Геометрическая модель фильтровальной ткани имеет диаметр на 20 мм меньше, чем у корпуса (рисунок 5).

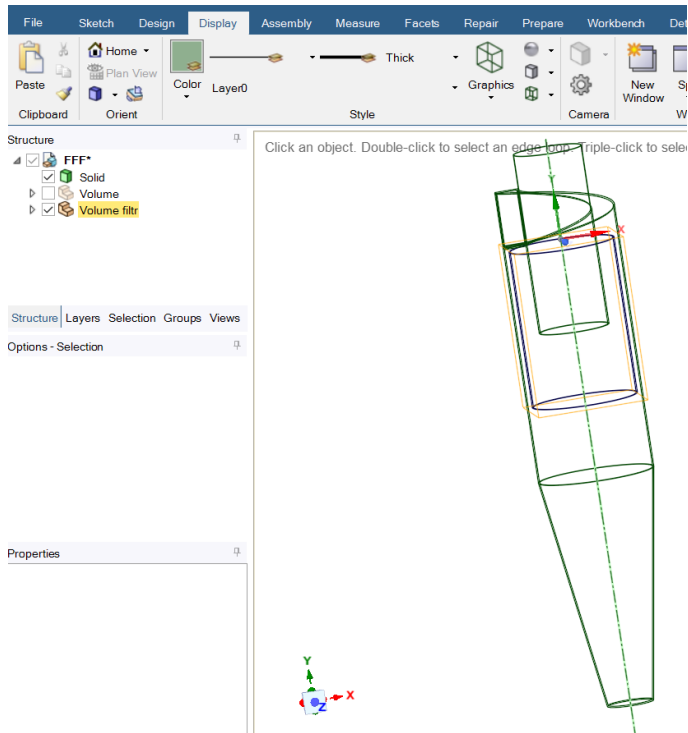


Рисунок 5. Создание геометрической модели фильтра и его вставка в циклонный элемент

На рисунках 6 и 7 представлены результаты расчетов: распределение давлений и скоростей в поперечном и продольном сечениях циклонного элемента с фильтрующей вставкой.

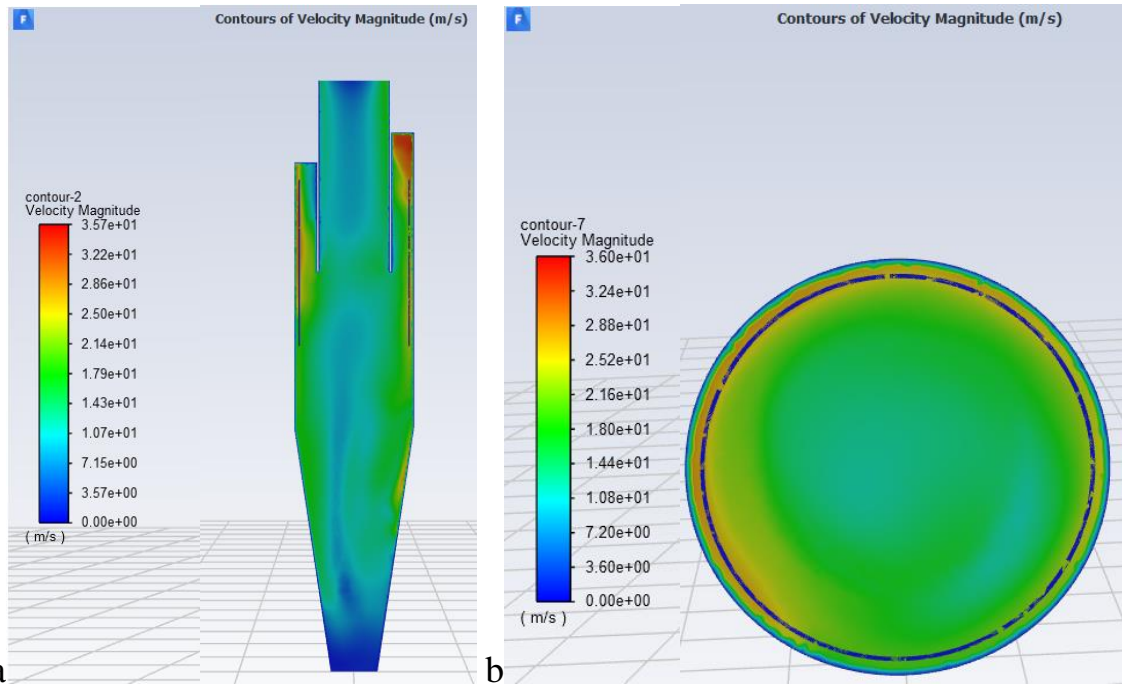


Рисунок 6. Поля скоростей в продольном (а) и поперечном (б) сечениях циклонного элемента с фильтрующей вставкой

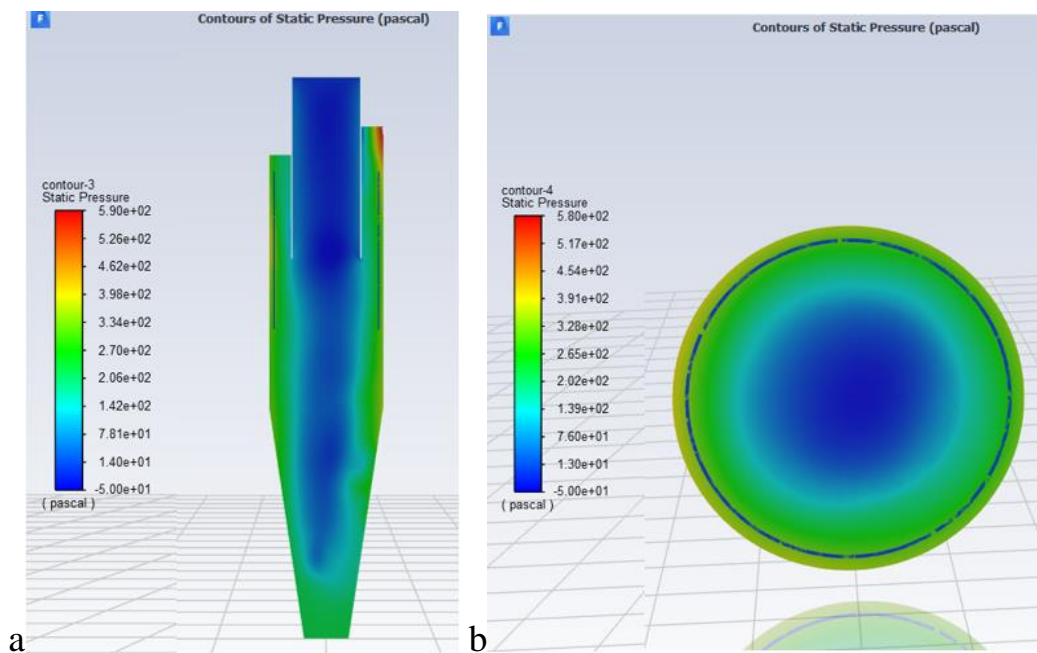


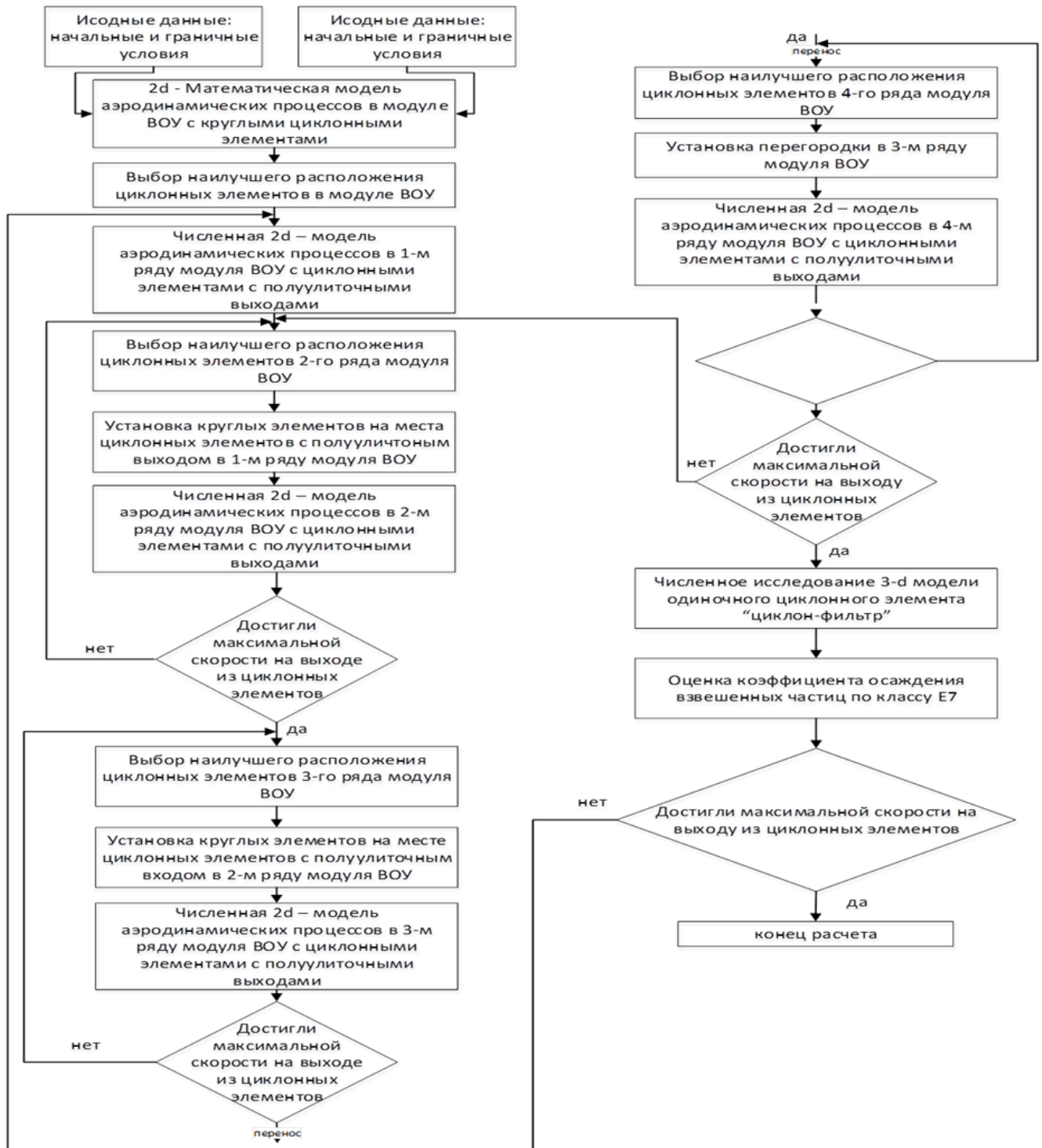
Рисунок 7. Поля давлений в продольном (а) и поперечном (б) сечениях циклонного элемента с фильтрующей вставкой

Исследование подтвердило, что фильтрующая вставка не влияет на структуру потока и восходящую прецессию. Максимальная скорость потока (32 м/с) и перепад давления (440 Па) соответствуют численным расчетам. Эффективность очистки составила 85% для частиц 0,4 мкм (класс F7) и 99,25% в целом. Это позволяет объединить грубую и финишную очистку в одном устройстве, сокращая размеры и расход материалов.

Исследование проводилось в два этапа: 2d-моделирование для определения оптимальных мест циклонных элементов (99% осаждения) и 3d-моделирование одного элемента с фильтром. Такой подход, с максимальным числом ячеек 900 000, упрощает задачу в 67 раз по сравнению с полным 3d-моделированием (около 60 млн ячеек для корпуса ЦБ 16 с 17 элементами), что значительно снижает требования к вычислительным ресурсам.

Предлагаемый метод сокращает вычислительные ресурсы и время исследования в 7,4 раза. Например, 9 экспериментов в 2d- и 1 в 3d- потребовали 8,1 млн ячеек, тогда как аналогичные 3d-эксперименты заняли бы 60,3 млн ячеек.

**Приложение В.2 Алгоритм по выполнению комбинированных 2d- и 3d-исследований для рационализации численных исследований с целью совершенствования существующих и конструирования новых аппаратов типа ВОУ с большим числом очистных элементов**



## Приложение Г. Тарировка трубки Пито по показаниям термоанемометра Testo 425

Проведена тарировка пневмометрической трубки Пито относительно средней скорости, полученной по термоанемометру Testo 425. Размеры трубки (рисунок Г1) приняты в соответствии с рекомендациями [Биргер, М.И., Вальдберг, А.Ю., Мягков Б.И. и др. Справочник по пыле- и золоулавливанию / М.И. Биргер (и др.)//Под общ.ред. А.А.Русанова. 2 -е изд. перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 312 с.]

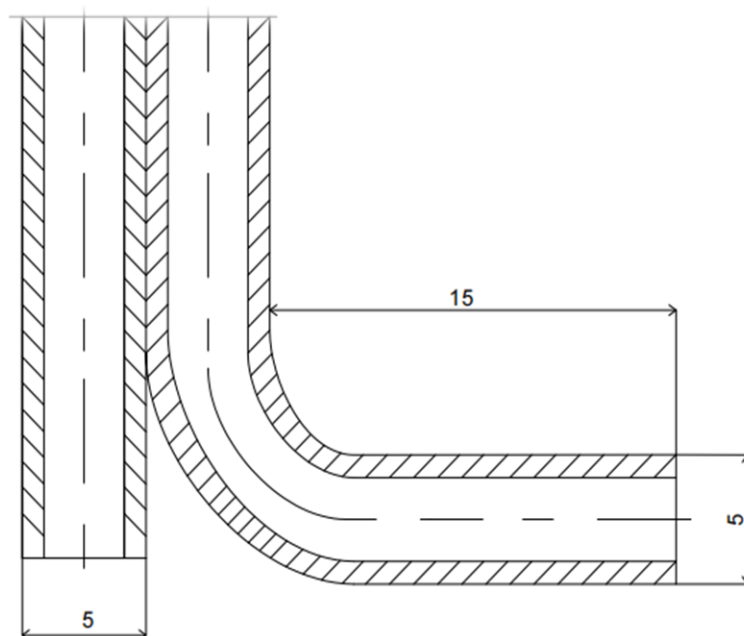


Рисунок Г1. Размеры рабочей части каналов пневмометрической трубки Пито, мм

В качестве тестовой выбрана точка 7 на входе в циклон (рисунок Г2).



Рисунок Г 2. Схема лабораторной установки для тарировки трубки Пито относительно средней скорости, полученной по термоанемометру Testo 425: 1 – регулятор напряжения; 2 – U-образный манометр для замера статического давления на коллекторе плавного входа (КПВ); 3 – нагнетатель с КПВ; 4 – патрубок для подачи воздуха на вход в циклон; 5 – термоанемометр Testo 425; 6 – микроманометр ММН-2400 для замера разности полного и статического давления на трубке Пито; 7 – тестовая точка в потоке перед входом в циклон

Было проведено по 7 измерений разности статического и полного давлений в трех сериях исследований в данной точке. Тарировка проведена по аналогии с методикой тарировки, приведенной в главе 5.2. Построчные дисперсии приведены в таблице Г.1.

Таблица Г.1– Сумма построчных дисперсий в точке замера для трех серий измерений

Построчные дисперсии	№ измерения						
	1	2	3	4	5	6	7
$S_{\Sigma}^2$	0,69	2,15	0,59	0,98	1,13	0,75	0,46
$S_{\Sigma}$	0,83	1,46	0,77	0,99	1,06	0,86	0,68

При объеме выборки  $n=7$  (что соответствует 6 степеням свободы) и доверительной вероятности 95%, критическое значение t-критерия Стьюдента равно 2,36 [139]. Это позволило рассчитать неопределенность измерений скорости на входе в циклон (таблица Г.2).

Таблица Г.2 – Неопределенность измерений в точке замера

	№ измерения						
	1	2	3	4	5	6	7
Средние значения разности полного и статического давлений, Па	6,46	7,81	9,13	11,53	17,41	21,52	29,36
Среднеквадратическое отклонение измерений, Па	±3,12	±2,41	±1,7	±1,96	±3,1	±2,45	±2,96
Неопределенность измерений разности полного и статического давлений, Па	6,46± 3,12	7,81±2,41	9,13±1,7	11,53±1,96	17,41±3,1	21,52±2,45	29,36±2,96
Скорости на входе в циклон по трубке Пито, м/	3,42	3,76	4,07	4,57	5,62	6,25	7,3
Значения скоростей по термоанемометру на вход в циклон, м/с	4	4,5	5,12	5,5	6,1	6,9	7,9
Соответствие измерений по трубке Пито и термоанемометру	14%	17%	21%	12%	7%	10%	8%

Результаты лабораторных замеров скорости потока на входе в циклон показали хорошее соответствие с данными, полученными термоанемометром.