

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора технических наук, доцента Литвиновой Натальи Анатольевны на диссертационную работу Беляевой Гульназ Ильхамовны на тему: «Комбинированное численное исследование усовершенствования воздухоочистительных устройств газотранспортных, энергетических, промышленных компрессорных станций», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.1.3 – Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение

Актуальность темы исследования

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.

Разработанный комбинированный метод исследования повысит возможности конструирования устройств с невысокими затратами энергии для тонкой очистки частиц пыли классов PM_{2,5} и PM₁₀, 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 CO₂ при энергогенерации.

При этом расчеты двухфазных потоков в проточной части трехмерных численных моделей требуют применения самых высокопроизводительных вычислительных кластеров. В связи с этим весьма актуальными являются исследования по созданию методов совершенствования крупногабаритных

аппаратов со сложной конструкцией с использованием инструментов вычислительной гидродинамики (CFD – Computational Fluid Dynamics).

Структура и содержание работы

Представленная диссертационная работа 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.

Во введении автором представлена общая характеристика работы, обосновываются актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и поставлены задачи диссертационного исследования. Показана научная и практическая значимость полученных результатов.

В главе 1 «Анализ существующих решений по совершенствованию методов очистки и фильтрации воздуха в системах теплогазоснабжения и вентиляции» представлен подробный обзор литературных источников выполнен критический анализ работ зарубежных и отечественных исследователей. Выявлено, что направление рационализации численных исследований объектов с большим количеством очистных элементов развито слабо. Использование комбинированного 2d-, 3d- моделирования методами CFD способствует увеличению результативности исследований аэродинамики потоков в устройствах с множественными элементами вследствие обеспечения их доступности для организаций с не крупными вычислительными центрами.

В целом, материалы обзорной главы 1 подтверждают актуальность поставленных задач соискателем.

Во 2 главе «Расчеты эффективности использования циклонов при осаждении мелкодисперсных частиц в воздухоочистительных устройствах газотранспортных, энергетических и промышленных компрессорных станциях и системах вентиляции, теплоснабжения, газоснабжения» автором работы выполнено расчетное определение осаждения мелкодисперсных частиц классов PM_{2,5} и PM₁₀ 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.

Соискателем использован безразмерный численный комплекс, который позволил найти 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.

Глава 3 «Экспериментальные исследования циклонной фильтрации для верификации результатов теоретических исследований» посвящена результатам лабораторных испытаний работоспособности циклонного элемента диаметром 100 мм, оснащенного тканевым фильтром на расстоянии 0,041 м от центра циклона.

Лабораторные исследования проведены по стандартным методикам в соответствии со стандартами ANSI/ASHRAE Standard 52.2-2007, ISO 12103-1:2024, ГОСТ Р 51708-2001.

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

В 4 главе «Комбинированное численное исследование эффективности очистки дисперсных выбросов в блоках циклонных элементов ВОУ» представлены результаты разработки и применения метода комбинированного (2d-/3d-) численного исследования эффективности очистки дисперсных выбросов в модуле ВОУ с элементами «циклон-фильтр». Построение геометрии,

решение задачи проводилось в программном комплексе ANSYS Fluent. Применены приложения Design Modeler и SpaceClaim Direct Modeler (SCDM). Для анализа течений газовой фазы было выбрано уравнение движения Навье-Стокса, осредненное по Рейнольдсу, для замыкания которого применена k-ε модель турбулентности. В качестве дискретной фазы принята промышленная пыль из библиотеки Fluent типа anthracite с плотностью $\rho = 2000 \text{ кг/м}^3$. При моделировании движения дискретной фазы (DPM) использовался метод Лагранжа с отслеживанием траектории каждой частицы в потоке воздуха и учетом двухстороннего «сцепления» газа и частиц. Распределение размеров частиц пыли принято логарифмическое по Розину-Раммлеру, с числом фракций 10 и спреем (дисперсией) 2,5. Минимальный диаметр частиц 0,4 мкм, максимальный 40 мкм. Параметры инъекции частиц: скорость 0,01 м/с, общий расход 0,002 кг/с. Изначально на основе 2d-модели были определены локации циклонных элементов и расположение их входов, обеспечивающие максимальную степень осаждения поступающей в модуль с элементами «циклон-фильтр» ВОУ взвеси. Затем на 3d-модели испытывалась эффективность осаждения в конструкции элемента типа «циклон-фильтр», обеспечившая требуемую очистку класса F7.

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

полуулиточным вводом с диаметром корпуса 100 мм была построена в приложении ANSYS SpaceClaim Direct Modeler (SCDM) по принципам создания твердотельной модели.

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

В 5 главе «Экспериментальные исследования циклонной фильтрации для валидации результатов численных исследований» приведены результаты экспериментальных исследований циклонной фильтрации, которые проводились для валидации результатов численных исследований. Проведены лабораторные испытания конструкции циклонного фильтра диаметром 100 мм, разработанной на основе серийного циклона ЦН-11. В опытах определялись давление и скорость потока в тестируемой точке элемента «циклон-фильтр» при различных расходах воздуха через него. Результаты лабораторных замеров давления потока в тестируемой точке циклона показали хорошее соответствие с данными, полученными в численном исследовании, при минимальном расходе: расхождение результатов численных и натуральных испытаний составляет 7%. В отличие от замеров скорости, при увеличении расхода расхождение в значениях давления в точке возрастало. При номинальном расходе (при скорости на входе в циклон 28,62 м/с) значение давления в численном опыте составило 9500 Па, а в лабораторном эксперименте – 7800 Па (расхождение 22%). Среднее расхождение численного и лабораторного экспериментов составило 14,5%.

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

В шестой главе «Оценка экономической эффективности использования разработанного комплексного воздухоочистительного

устройства на предприятиях Республики Татарстан» проведена оценка экономической эффективности использования разработанного комплексного воздухоочистительного устройства на предприятиях Республики Татарстан. Применение усовершенствованного КВОУ в блоках очистки КС «Арская» ООО «Газпром трансгаз Казань» позволит значительно сэкономить топливный газ, экономия составит 993171 руб.

Усовершенствованные ВОУ представляют собой важный элемент в системе очистки воздуха АО «Эссен продакшн АГ». В частности, затраты на техническое обслуживание и ремонт снижаются на 42600 руб. Рассчитан технико-экономический эффект от внедрения улучшенного КВОУ в предприятия Республики Татарстан, который составляет 1035771 руб. Расчетный срок окупаемости от внедрения усовершенствованного устройства составляет 3-4 года.

В заключении приведены основные итоги диссертационной работы. Обозначены перспективные направления по исследованию.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций определяется удовлетворительным совпадением сопоставляемых расчетных результатов и экспериментов, проведенных с использованием поверенных средств измерений. Полученные результаты не противоречат общепринятым научным положениям.

Научная новизна диссертационной работы заключается: создана математическая модель для анализа блочной (модульной) компоновки ВОУ на основе методов CFD; разработан способ создания корректной 2d- модели трехмерного двухфазного потока в возвратно-поточном циклонном элементе, что позволило создать метод комбинированного 2d-, 3d- численного исследования; разработаны алгоритм и рекомендации по выполнению комбинированного 2d-, 3d- исследования модулей циклонных и фильтрующих элементов; получены результаты численного исследования циклонно-фильтрующих элементов для создания новой конструкции воздухоочистного устройства типа КВОУ уменьшенных габаритов.

Теоретическая и практическая 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 заключается в предложениях по повышению эффективности осаждения мелкодисперсных частиц PM10, PM2,5 в КВОУ КС ООО «Газпром трансгаз Казань»; предложениях по повышению эффективности очистки на АО «Эссен Продакшн АГ» от мелкодисперсных частиц классов PM10, PM2,5. Все результаты исследования используются в учебном процессе студентов ФГБОУ ВО «КГЭУ».

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций

Соискателем четко сформулированы цель и задачи исследования, обоснован выбор современных методов исследований, адекватных решаемым задачам. Выводы и практические рекомендации логично вытекают из результатов каждой главы и диссертации в целом, соответствуют поставленной цели.

Адекватность численного моделирования проверена сопоставлением с результатами натурных исследований.

Степень завершенности диссертации в целом и качество её оформления

Диссертация Беляевой Гульназ Ильхамовны является завершенным научно-исследовательским трудом, направленным на решение вопросов по расчетному определению осаждения мелкодисперсных частиц PM2,5 и PM10 в воздухоочистительных устройствах с циклонными элементами с использованием

относительного числа Рейнольдса Re_r , предложен способ создания корректной 2d- модели трехмерного двухфазного потока в возвратно-поточном циклонном элементе. Получены результаты численного (2d-) определения наиболее эффективного расположения циклонных элементов в модулях воздухоочистительных устройств. Также получены 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, выполнена валидация данных численного эксперимента по значениям, полученным в натурном эксперименте.

В работе последовательно изложен подход к достижению поставленной цели исследования, который в полном объеме дает представление о результатах положений, выносимых на защиту.

Диссертация написана технически грамотным языком, обладает строгой и понятной логической последовательностью изложения.

Качество оформления диссертации соответствует основным требованиям, предъявляемым к работам на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Соответствие содержания автореферата диссертации

Содержание автореферата полностью соответствует содержанию кандидатской диссертации и является кратким её изложением. Содержание автореферата включает в себя краткое описание всех основных этапов исследования: актуальность темы исследования, цели и задачи, научную новизну, теоретическую и практическую значимость, методологию и методы проведения исследования, степень достоверности, апробацию результатов, а также результаты внедрения, заключение и список основных трудов автора по теме диссертационной работы.

Полнота опубликованных основных результатов диссертации

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

Замечания по диссертационной работе

По диссертационной работе имеются следующие пожелания и замечания:

1) В выводах главы четвертой соискателю целесообразно было бы указать конкретный размер выбранных ячеек и сеточную сходимость при проведении численного моделирования 2d- и 3d- геометрических моделей.

2) В пятой главе следовало бы соискателю подробнее пояснить планирование эксперимента. Автор в качестве тестовой пыли использовал тальк (размер до 63 мкм, медианный диаметр 10 мкм, дисперсия 3,5). В тексте автор не объясняет, с чем связан для анализа именно этот вариант пыли. На мой взгляд, следовало было бы выбрать несколько вариантов пыли, разной дисперсности, разного происхождения, для того чтобы сделать сравнительный анализ при планировании эксперимента и уже затем остановиться на выбранном варианте для опытного образца.

3) Неясно, как были выбраны значимые факторы при проведении эксперимента и оценке концентраций пылей на собранной установке, желательно было бы показать уравнением регрессии - зависимость концентраций пыли на выходе из аппарата от размера частиц, относительной влажности, температуры, давления воздушного потока и скоростей движения воздуха.

4) Не совсем полно автор объясняет, почему именно для очистки от пыли выбран в фильтрах материал «лавсан»? Следовало бы выбрать несколько

вариантов для исследования пористого фильтра, к примеру, такие как орлон, дакрон и другие волокнистые материалы из синтетических волокон для исследования и уже обосновать свой выбор при планировании эксперимента в 5 главе.

5) Остается неясным влияние относительной влажности воздуха в разных диапазонах на эффективность очистки воздуха на «циклон-фильтре» в экспериментальных исследованиях. Как влияет относительная влажность воздуха внутри помещения с пылью на концентрацию взвешенных частиц на выходе из предложенной установки?

6) Результаты лабораторных замеров давления потока в тестируемой точке циклона показали хорошее соответствие с данными, полученными в численном исследовании, при минимальном расходе: в лабораторном опыте, расхождение результатов численных и натуральных испытаний составляет 7%. Среднее расхождение численного и лабораторного экспериментов составило 14,5%. Следовало бы лучше представить эти данные графически (на рисунке) для разных точек (участков) исследуемой конструкции, сопоставление данных численных и натуральных испытаний.

7) В выводе п.5 заключения диссертации следовало бы указать в диссертации конкретные цифры проведения валидации результатов численных расчетов на натурной модели циклонного элемента диаметром 100 мм разработанной численной модели элемента ВОУ типа «циклон-фильтр», которые приведены в тексте диссертации автора.

8) В шестой главе в экономических затратах на воздухоочистное устройство желательно было бы более подробно раскрыть затраты на его эксплуатацию, неясно из текста диссертации, сколько раз за год придется «очищать» (менять) пористый фильтр в циклоне в зависимости от величин концентраций пыли разной дисперсности на входе в аппарат?

9) По тексту диссертации имеются редакционные замечания: табл.5.17 опечатка пропущено слово «воздуха», стр.138 2 абзац снизу убрать точку перед союзом и.

Указанные замечания, не снижают новизну и теоретическую, практическую значимость проведенных автором исследований, а также общего положительного впечатления от работы.

Текст диссертации и автореферата логично и грамотно составлен с учётом предъявляемых к научным работам требований.

Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о присуждении учёных степеней

Рассматриваемая диссертация является законченной работой, выполненной автором на высоком научном уровне. Полученные автором результаты достоверны, выводы и заключения обоснованы. По каждой главе и в целом по работе сделаны четкие выводы.

Тема диссертации Беляевой Гульназ Ильхамовны и содержание диссертации соответствует п.2,3,4 паспорта специальности 2.1.3 – Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение.

Диссертационная работа Беляевой Гульназ Ильхамовны является самостоятельно выполненной завершённой научно-квалификационной работой, выполненной на актуальную тему, содержащей научные результаты, выводы и рекомендации, отличающиеся новизной. Их использование может иметь существенное значение для развития страны вследствие обеспечения возможности значительного расширения круга исследований по оптимизации воздухоочистных устройств систем ТГВ по повышению эффективности очистки при сохранении приемлемых значений энергозатрат на очистку. Диссертация на тему «Комбинированное численное исследование усовершенствования воздухоочистительных устройств газотранспортных, энергетических, промышленных компрессорных станций» отвечает критериям, установленным в пунктах 9-14 Положения о присуждении ученых степеней (Постановление Правительства РФ № 842 от 24.09.2013г. в редакции от 16.10.2024г.) к кандидатским диссертациям, а ее автор, Беляева Гульназ Ильхамовна,

