

УТВЕРЖДАЮ

Первый проректор
ФГБОУ ВО Волгоградского
государственного технического
университета
чл.-корр. РАН


С.В. Кузьмин
«25» 01 2026 г.



ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Волгоградский государственный технический университет» на диссертацию Беляевой Гульназ Ильхамовны «Комбинированное численное исследование усовершенствования воздухоочистительных устройств газотранспортных, энергетических, промышленных компрессорных станций», представленную в диссертационный совет 24.2.310.04, созданный на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Казанский государственный энергетический университет», на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.1.3 Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение

1 Актуальность темы исследования

Представленная работа Беляевой Г.И. направлена на совершенствование воздухоочистных устройств (ВОУ) путем создания аппаратов с невысоким гидравлическим сопротивлением при высокой степени очистки (класс F7), что повышает надежность и экономичность систем теплогазоснабжения и вентиляции. Соответственно, актуальность темы исследования прежде всего касается энергосбережения в системах ТГВ.

Предлагаемая в диссертации методика комбинированного численного исследования двухфазных потоков также позволяет существенно сократить затраты вычислительных ресурсов, что может дать импульс к расширению исследований по совершенствованию ВОУ для их практического применения при проектировании новых и модернизации существующих объектов теплоэнергетики, компрессорных станций (КС) промышленных предприятий и газотранспортных систем, систем вентиляции.

Очевидно, что совершенствование ВОУ данных объектов, которые могут содержать очень большое число рабочих элементов, наиболее рационально проводить на основе численных исследований с их последующей валидацией. Однако расчеты двухфазных потоков в таких устройствах требуют наличия высокопроизводительных вычислительных центров, что недоступно для большинства НИИ и ВУЗов с обычным машинным ресурсом.

Разработанный Беляевой Г.И. метод исследований на основе комбинирования 2d- и 3d- численных моделей рабочих элементов и блоков конструктивно сложных воздухоочистных аппаратов существенно расширит круг исследований, направленных на создание энергоэффективных устройств осаждения взвешенных веществ $PM_{2,5}$ и PM_{10} с улучшением санитарно-гигиенических условий и снижением энергозатрат на очистку воздуха. Уменьшение габаритов и энергопотребления таких устройств также внесет определенный вклад в снижение выбросов CO_2 . Актуальность последнего подтверждается вниманием руководства страны к достижению низкоуглеродности промышленного производства.

2 Анализ структуры и содержания работы

Диссертация Беляевой Гульназ Ильхамовны «Комбинированное численное исследование усовершенствования воздухоочистительных устройств газотранспортных, энергетических, промышленных компрессорных станций» состоит из введения, шести глав, заключения, списка использованных источников из 145 наименований и 8 приложений. Диссертация содержит 176 страниц машинописного текста, 66 рисунков и 22 таблицы. Структура диссертации соответствует требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, утвержденного приказом Минобрнауки России от 10.11.2017 № 1093.

Во **введении** к диссертации соискательница аргументированно обосновала актуальность избранной темы, охарактеризовала уровень научной разработанности исследуемой проблемы, сформулировала цель и задачи исследований, а также представила положения, выносимые на защиту,

обладающие научной новизной, имеющие теоретическую и практическую значимость.

В первой главе представлен довольно обстоятельный анализ отечественных и зарубежных исследований по пылегазоочистной тематике, отражена деятельность сложившихся к настоящему времени основных отечественных школ по натурному и численному моделированию аппаратов и процессов газоочистки.

В результате критического анализа литературных источников соискательницей установлено, что вопросы рационализации численных исследований с целью существенного снижения затрат машинного времени слабо затрагиваются исследователями.

Вторая глава посвящена теоретическим расчетам эффективности осаждения частиц фракций $PM_{2,5}$, PM_{10} в воздухоочистных устройствах с элементами типа «циклон-фильтр» диаметром 100 мм для систем вентиляции и компрессорных станций. Для этого соискательницей использовано специальное безразмерное число Re_r , описывающее зависимость пофракционной степени осаждения частиц во вращающемся потоке от энергозатрат.

По результатам расчетов определено пороговое значение Re_r , равное $3,2 \cdot 10^{-6}$. Частицы с меньшими значениями Re_r не оседают, а частицы с Re_r больше $3,2 \cdot 10^{-6}$ оседают на фильтре и внутренней поверхности корпуса. Определено наилучшее расстояние размещения фильтра в циклоне (0,041 м от оси циклона), соответствующее месту сепарации частиц 0,53 мкм на 50 % и 8,25 мкм на 99 % ($d_{50} = 0,53$ мкм и $d_{99} = 8,25$ мкм), т.е. осаждению частиц фракции PM_{10} на 99 %.

В третьей главе проведена валидация выполненных теоретических расчетов по результатам, полученным на лабораторной установке, представляющей собой модель элемента воздухоочистительного устройства типа «циклон-фильтр» диаметром 100 мм с расположением фильтрующего материала на расстоянии 0,041 м от оси циклона.

Результаты экспериментальных исследований, проведенных с использованием стандартных методик, показали, что эффективность осаждения пыли с характеристиками $d_{50} = 2,7$ мкм, $\sigma = 3,6$, ($d_{15,85} = 0,75$ мкм, $d_{84,15} = 9,72$ мкм) составила 86 %. Следовательно, здесь можно говорить о

соответствии результатов теоретических расчетов на основе комплекса Re_r и полученных экспериментальных данных.

В четвертой главе проведено обоснование и разработка самого метода комбинированного (2d + 3d) численного исследования эффективности очистки дисперсных выбросов в модуле ВОУ с несколькими рабочими элементами. Представленный алгоритм метода, несмотря на видимую громоздкость, логичен и имеет физически прозрачный смысл.

Изначально средствами 2d-моделирования определяют точки максимального давления потока, обтекающего блок круглых циклонных элементов в модуле ВОУ. В этих точках назначают входы потока в улиточные элементы, которыми заменяют круглые, и расстановку элементов первого ряда корректируют так, чтобы получить максимальный расход через каждый улиточный элемент. Затем откорректированный первый ряд заменяют на круглые элементы, что адекватно обтеканию корпуса циклона.

Далее такие же корректировки производят для второго и каждого из следующих рядов, учитывая уменьшение расхода дошедшего до него неочищенного газа. Таким образом соискательница достигает высокого результата осаждения (свыше 90%) в блоке циклонов только за счет оптимизации расположения очистных элементов.

Затем исследуется осаждение в 3d-модели отдельного элемента, оснащенного фильтрующей вставкой, для достижения очистки класса F7. При этом интеграция ступеней первичной и финишной очистки в одном аппарате приводит дополнительно к существенному сокращению габаритов и материалоемкости установки, без чего невозможно было бы использование результатов работы для компрессорных и вентиляционных систем крупных производственных объектов.

Автором показано, что разработанный ею комбинированный (2d + 3d) метод исследования позволяет существенно сократить затраты вычислительных ресурсов и машинного времени. Так, полномасштабная 2d-модель всего модуля ВОУ содержит около 80000 расчетных ячеек, тогда как 3d-модель только одного его циклонного элемента – около 900000 ячеек.

По данным автора, затраты времени на исследование могут сократиться до 7,5 раз. Справедливость этого утверждения очевидна из

приведенных выше данных по существенному сокращению расчетных ячеек в модели.

Таким образом, в главе 4 представлен главный результат данного диссертационного исследования – метод комбинированного (2d + 3d) численного исследования эффективности очистки дисперсных выбросов в аппаратах со множеством рабочих элементов.

В пятой главе с целью валидации численных исследований проведены экспериментальные исследования циклонной фильтрации. В лабораторном эксперименте испытан рабочий элемент модуля ВОУ типа «циклон-фильтр» диаметром 100 мм, циклонная часть которого сконструирована по пропорциям серийного циклона ЦН-11.

Результаты лабораторных измерений давления потока показали хорошее соответствие с данными, полученными в численном исследовании. Среднее расхождение данных численного и лабораторного экспериментов составило 14,5 %, что для экспериментов с запыленными потоками можно считать хорошим подтверждением валидности результатов численных расчетов.

В шестой главе рассчитан технико-экономический эффект, полученный от внедрения улучшенного ВОУ на предприятиях Республики Татарстан, который составил составляет 1035771 руб.

В заключении диссертации изложены итоги выполненного исследования, рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы.

3 Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций диссертационной работы изначально обеспечивается корректностью подбора численной 2d- модели трехмерного объекта.

Численные исследования проведены с использованием верифицированных программных комплексов ANSYS DesignModeler, ANSYS SpaceClaim Direct Modeler, ANSYS Fluent. Валидация их результатов проводилась по экспериментальным данным, полученным с использованием стандартных методик и поверенных приборов, а также по данным других исследователей.

Научные положения, выводы и рекомендации соискательницы соответствуют полученным ею результатам исследований и не противоречат общепринятым научным представлениям.

4 Научная новизна работы

1 Создана численная 2d- модель циклонных элементов возвратно-поточного типа, которая адекватна трехмерному модулю ВОУ по основным аэродинамическим характеристикам перемещения в нем двухфазного потока.

2 Разработан метод комбинированного (2d + 3d) численного исследования блочной (модульной) компоновки ВОУ.

3 Разработаны алгоритм и рекомендации по выполнению комбинированного (2d + 3d) исследования на основе методов CFD модулей циклонных и фильтрующих элементов.

4 Получены результаты численного исследования циклонно-фильтрующих элементов для создания конструктивно нового типоразмерного ряда ВОУ уменьшенных габаритов.

5 Практическая значимость диссертации

По результатам диссертационного исследования разработаны предложения и рекомендации по повышению эффективности воздухоочистных устройств, принятые к внедрению ООО «Газпром трансгаз Казань» и АО «Эссен Продакшн АГ».

6 Значимость полученных результатов для соответствующей отрасли науки

Представленная диссертационная работа посвящена решению актуальной научно-технической проблемы, связанной с разработкой расчетных способов определения эффективности осаждения взвеси из двухфазных потоков. Созданы алгоритм и рекомендации для комбинированных (2d + 3d) исследований, позволяющие улучшать существующие и проектировать новые аппараты ВОУ с большим числом очистных элементов для систем вентиляции, теплоснабжения и газоснабжения.

7 Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертационной работы

Разработанные алгоритм и рекомендации по выполнению комбинированного (2d + 3d) исследования модулей циклонных и фильтрующих элементов могут быть использованы для уточненного анализа возможностей усовершенствования существующих КВОУ на объектах ТЭК.

Для реализации результатов исследований на малых и средних производственных объектах необходима методическая проработка предложений и рекомендаций в форматах, удобных для проектных организаций, с последующим включением положений, сформулированных на основе опыта проектирования, в нормативную документацию.

В качестве дальнейшего развития применения результатов исследования необходима разработка специального типоразмерного ряда ВОУ с небольшими расходами обрабатываемого воздуха для компрессорных и вентиляционных систем средних и малых производственных объектов.

Разработанные алгоритм и рекомендации могут быть использованы в курсах повышения квалификации проектировщиков, связанных с проектированием воздухоочистительных устройств большой и малой производительности.

Материалы диссертации могут быть использованы в учебных курсах студентов строительных и энергетических специальностей для углубленного изучения методов численного моделирования в области механики жидкости и газа.

8 Публикации

Результаты диссертационного исследования отражены в 34 публикациях, в том числе: 3 статьи в изданиях, индексируемых в МБД SCOPUS, 9 статей в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ (из них 3 по специальности 2.1.3). Дополнительно опубликовано 20 работ в других изданиях. Получено два патента РФ на полезную модель.

9 Вопросы и замечания по диссертационной работе

При анализе содержания диссертации сформировались следующие вопросы и замечания.

1 В анализе данных научно-технических источников не указана основная причина недостаточной разработанности в настоящее время методики комбинирования плоских и объемных моделей.

По нашему мнению, основная причина здесь состоит в существенной трудности подбора 2d- модели, которая была бы адекватна реальной 3d- модели. Такое затруднение для исследуемого объекта соискательницей принципиально преодолено, однако не показаны принципы создания адекватных 2d- моделей для других случаев.

2 Соискательницей не объяснены причины количественного расхождения на 13% теоретических и опытных результатов по эффективности осаждения.

3 Не конкретизирована форма фильтрующей вставки в циклонный элемент. Остается неясным, на основании чего она может быть определена, и какая роль в этом была отведена теоретическим расчетам на основании порогового значения безразмерного параметра Re_r .

4 Также не внесена ясность в отношении принципиальных затруднений, связанных с созданием корректной 2d-модели трехмерного объекта при реализации предложенного алгоритма исследования. Очевидно, что не каждое очистное устройство можно аэродинамически адекватно представить плоской моделью.

5 В главе 5 не обоснован выбор параметра потока, по которому проводилась валидация расчетной модели.

6 По нашему мнению, в шестой главе было бы нелишним указать на необходимость разработки специального типоразмерного ряда ВОУ с небольшими расходами обрабатываемого воздуха для компрессорных и вентиляционных систем средних и малых производственных объектов, как на одно из перспективных направлений развития последующих исследований.

Высказанные замечания не снижают теоретическую и практическую ценность и общую положительную оценку работы Беляевой Г.И.

Заключение по диссертационной работе

Диссертационная работа Беляевой Гульназ Ильхамовны является завершенным, самостоятельным научным исследованием, в котором решена актуальная научная задача по разработке энергоэффективного устройства

очистки воздуха для газотранспортных, энергетических, промышленных компрессорных станций и систем вентиляции. Полученные результаты обладают научной новизной и достоверностью. Выводы и положения, выносимые на защиту, обоснованы и логически вытекают из содержания работы.

Научные и практические результаты диссертационного исследования достаточно полно представлены в публикациях в журналах из перечня ВАК России, доложены на российских и международных научных конференциях.

Содержание работы соответствует пунктам 2, 3, 4 Паспорта научной специальности 2.1.3 Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение:

- п. 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;

- п. 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 динамических процессов в аэродисперсных системах;

- п. 4 Разработка математических моделей, методов, алгоритмов 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.

Автореферат отражает основное содержание диссертационной работы.

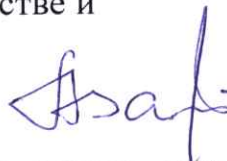
Диссертация полностью отвечает требованиям, установленным в пунктах 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного

Постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 (в редакции от 16.10.2024), а ее автор - Беляева Гульназ Ильхамовна - заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.1.3 Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение.

Диссертация, автореферат и отзыв на диссертацию рассмотрены и одобрены на заседании кафедры «Безопасность жизнедеятельности в строительстве и городском хозяйстве» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Волгоградский государственный технический университет». Протокол заседания № 10 от 15 мая 2026 г. Присутствовало на заседании 11 человек В голосовании участвовало 11 человек, за – 11, против – нет, воздержались – нет.

Составители отзыва:

Заведующий кафедрой «Безопасность жизнедеятельности в строительстве и городском хозяйстве», доктор технических наук, профессор



Азаров Валерий Николаевич

(Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по научным специальностям 05.26.01 Охрана труда, 03.00.16 Экология. Тел.: +7(8442)96-99-07, e-mail: kaf_bgdvt@mail.ru)

Профессор кафедры «Безопасность жизнедеятельности в строительстве и городском хозяйстве», доктор технических наук, доцент



Сергина Наталия Михайловна

(Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по научной специальности 2.1.10 Экологическая безопасность строительства и городского хозяйства. Тел.: +7(8442)96-99-07, e-mail: kaf_bgdvt@mail.ru)

Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волгоградский государственный технический университет». Юридический адрес: 400005, г. Волгоград, проспект им. В.И. Ленина, д. 28. Тел.: +7(8442)24-81-15. Официальный веб-сайт: <https://vstu.ru>. E-mail: rector@vstu.ru.



Азаров В.Н., Сергиной Н.М.
 ИСТОБЕРЯЮ 15 мая 2026
 Нач. общего отдела
 (подпись)