



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(ФГБОУ ВО «КГЭУ»)



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по НИК ФГБОУ ВО «КГЭУ»

И.В. Ившин

« 15 »

декабря

2025 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
ФГБОУ ВО «КГЭУ»

Диссертационная работа «Комбинированное численное исследование усовершенствования воздухоочистительных устройств газотранспортных, энергетических, промышленных компрессорных станций» выполнена на кафедре «Атомные и тепловые электрические станции» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Казанский государственный энергетический университет».

В 2009 году Беляева Гульназ Ильхамовна с отличием окончила ФГОУ ВПО «Казанский государственный архитектурно-строительный университет», присуждена квалификация инженер по специальности «Теплогазоснабжение и вентиляция», диплом ВСА 0982886 от 22.06.2009.

С 2010 – 2014 годы обучалась в аспирантуре в ФГБОУ ВО «Казанский государственный архитектурно-строительный университет» по специальности 05.23.03 «Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение». Справка об обучении в аспирантуре и сданных кандидатских экзаменах от 20.02.2021 № 5 выдана ФГБОУ ВО «Казанский государственный архитектурно-строительный университет».

С 2021 – 2024 годы прикреплена соискателем на кафедру «Атомные и тепловые электрические станции» ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» для защиты диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Научный руководитель — Зиганшин Малик Гарифович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Атомные и тепловые электрические станции» ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет».

Диссертационная работа Беляевой Гульназ Ильхамовны «Комбинированное численное исследование усовершенствования воздухоочистительных устройств газотранспортных, энергетических, промышленных компрессорных станций» обсуждалась на заседании кафедры «Атомные и тепловые электрические станции» ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет». По итогам обсуждения на заседании принято заключение:

Актуальность темы диссертационной работы

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

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

Разработанный комбинированный метод исследования повысит возможности конструирования устройств с невысокими затратами энергии для тонкой очистки частиц пыли классов $PM_{2,5}$ и PM_{10} , что ведет к улучшению санитарно-гигиенических условий и снижению энергозатрат на вентиляционные системы на объектах производственной сферы. Создаваемые устройства очистки воздуха будут иметь меньшие габариты, что позволит использовать их на любых объектах строительства,

энергетики и промышленности, где имеются системы механической вентиляции и/или компрессорные установки, независимо от производительности. Вследствие многочисленности таких устройств уменьшение габаритов и снижение энергозатрат на их эксплуатацию внесет ощутимый эффект в снижение выбросов CO_2 при энергогенерации. На особую актуальность этого вопроса указывает постоянное внимание руководства страны, что подтверждает ряд директивных документов Президента и Правительства РФ.

Научная новизна исследований

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.

Практическая значимость полученных результатов

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

Соответствие диссертации паспорту специальности

Диссертация является научно – квалификационной работой, соответствует паспорту специальности научных работников 2.1.3 «Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение» в части:

2. Технологические задачи теплогоснабжения, 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 теплогоснабжения, 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.

Достоверность и обоснованность полученных результатов

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

Личный вклад 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.

Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем ученой степени

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

Публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России и приравненных к ним по специальности 2.1.3

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

2. Беляева, Г.И., Горбунов, С.В., Зиганшин, М.Г. Комбинированное (2d - 3d) численное исследование эффективности воздухоочистительного устройства/ Г.И. Беляева, С.В. Горбунов, М.Г. Зиганшин//Надежность и безопасность энергетики.– 2024. – Т. 17.– № 4. – С.299-305 (вклад соискателя – 33%).

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

Публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России

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

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

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

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

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

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

Статьи в изданиях, входящих в международные базы цитирования Scopus и Web of Science:

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

11. Belyaeva, G. I. Experimental and numerical studies in elaboration the multi-cyclone with filter cells to processing of flue-gases of coal-fired and incineration power plants / G. I. Belyaeva, M. G. Ziganshin, R. D. Sukhov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Kazan, 29 октября – 02 2018 года. Vol. 288. – Kazan: Institute of Physics Publishing, 2019. – P. 012077 (вклад соискателя – 33%).

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

Публикации в других изданиях

13. Belyaeva, G. I. Numerical studies of the aerodynamics of dispersed flows in multicyclones/G. I. Belyaeva, M. G. Ziganshin//Тинчуриные чтения - 2023 "Энергетика и цифровая трансформация" : Материалы Международной молодежной научной конференции. В 3-х томах, Казань, 26–28 апреля 2023 года.– 2023.– Vol. 2. – P. 22-24 (вклад соискателя – 50%).

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

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

Патенты

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

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

Ценность научных работ соискателя

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 выводы

Диссертационная работа Беляевой Г.И. «Комбинированное численное исследование усовершенствования воздухоочистительных устройств газотранспортных, энергетических, промышленных компрессорных станций» является работой, актуальной в настоящее время. Научная ценность работы заключается в обоснованности основных положений и выводов, подтвержденных эмпирическими данными и теоретическими разработками. Изложение соответствует научным стандартам.

Результаты научных и практических исследований, выполненных в рамках диссертационной работы, представлены в журналах, входящих в перечень ВАК при Минобрнауки России, а также в индексируемых в международных базах данных Scopus. Кроме того, основные выводы и результаты исследования были представлены в ряде российских и международных научно-технических конференций.

Диссертационная работа Беляевой Г.И. является завершенной научно – квалификационной работой и соответствует паспорту специальности 2.1.3 «Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение» по 2,3,4 областям исследования.

Результаты, представленные в диссертационной работе Беляевой Г.И., основываются на исследованиях, выполненных с применением современных методов анализа, включая современные программные комплексы и численное моделирование. Представленные результаты обладают достоверностью и имеют научную новизну и также практическую значимость. Работа Беляевой Г.И. имеет значение для проведения численных экспериментов, обеспечивая решение достаточно сложных задач без задействования мощных вычислительных ресурсов. Таким образом данная диссертация может служить основой для дальнейших исследований и практических разработок по совершенствованию устройств с большим числом рабочих элементов.

С учетом соответствия требованиям, предъявляемым ВАК Минобрнауки России, установленным в пп. 9 – 14 Положения о присуждении ученых степеней (Постановление Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г. в редакции от 16.10.2024 г.)

к диссертационным работам на соискание ученой степени кандидата наук, диссертация на тему: «Комбинированное численное исследование усовершенствования воздухоочистительных устройств газотранспортных, энергетических, промышленных компрессорных станций» рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.1.3 «Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение». Заключение принято на расширенном заседании кафедры «Атомные и тепловые электрические станции» ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», которое состоялось 11.12.2025г., протокол № 4-25/26. На заседании присутствовали 20 человек, из них докторов наук 4. Результаты голосования: «за» – 20 человек, «против» – 0 человек, «воздержались» – 0.

Председатель заседания:

Чичирова Наталия

Дмитриевна д.х.н., профессор
кафедры

«Атомные и тепловые электрические станции»

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет»
420066, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Красносельская, 51
Тел. (843)519-42-52, e-mail: kgeu.tes@mail.ru

Сведения о лице, утвердившем заключение

Ившин Игорь Владимирович: доктор технических наук, профессор, Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Казанский государственный энергетический университет», проректор по науке и коммерциализации,

420066, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Красносельская, 51
Тел. (843)519-43-72, e-mail: ivshin.iv@kgeu.ru



Специалист ОК

подпись

11.12.2025

Чичирова Н.Д.
М.А. Кадыбрахманова О.А.