

ОТЗЫВ

официального оппонента Мостовенко Любови Владимировны
на диссертацию Беляевой Гульназ Ильхамовны
«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

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук выполнялась Беляевой Гульназ Ильхамовной выполнена на кафедре «Атомные и тепловые электрические станции» ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет».

Актуальность темы исследования. Актуальность избранной в рецензируемой работе темы не вызывает сомнений и имеет как глобальный, так и прикладной характер. Обеспечение тонкой очистки воздуха от частиц PM2.5 и PM10 перед газотурбинными установками (ГТУ) и компрессорами критически важно для надёжности и ресурса оборудования, а также для снижения смертности от лёгочных заболеваний в промышленных регионах, что усиливает социальный аспект проблемы. Разработанная автором методика комбинированного 2d-3d моделирования отвечает острой потребности предприятий, не оснащённых суперкомпьютерами, в эффективном инструменте для оптимизации сложных очистных устройств с большим количеством элементов.

Общая характеристика, структура и завершенность работы

Представленная работа состоит из введения, 6 глав, заключения, списка использованной литературы (145 наименований) и 8 приложений. Структура диссертации соответствует ГОСТ Р 7.0.11-2011. Список литературы имеет 145 наименований. Автором обеспечен оптимальный

баланс между классическими трудами и современными исследованиями, при этом глубина проработки источников не вызывает нареканий.

Во введении обоснована актуальность решаемой научно-технической задачи и выбор направления исследования, сформулированы цель и задачи, научная новизна, приводятся объект и предмет исследования. Указан личный вклад автора, а также каким образом проводилась апробация работы, включая основные публикации, приведено соответствие диссертационной работы паспорту специальности 2.1.3 Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение.

В главе 1 выполнен анализ литературных источников по устройствам циклонической и пористой фильтрации для очистки воздуха на компрессорных станциях и энергетических объектах (разделы 1.1–1.3), а также представлен обзор существующих численных методов исследования аппаратов с большим количеством очистных элементов (раздел 1.4), при этом выявлена недостаточная проработанность комбинированных 2d- и 3d-подходов, развитию которых посвящено представленное исследование.

Интересной является поисковая работа, проведенная автором, например, упоминание нового безразмерного параметра – числа момента частицы Pa , характеризующий турбулентность частиц пыли в потоке, а также впечатляет работа, сделанная в ходе создания методики, упрощающей расчет золоуловителя из 3d в 2d расчет, что глобально экономит время исследователя.

В главе 2 представлено расчётное определение эффективности осаждения мелкодисперсных частиц ($PM_{2.5}$ и PM_{10}) на основе безразмерного параметра Re_r . Автор предлагает использовать этот комплекс как критериальный для оценки фракционной эффективности циклонных элементов типа «циклон-фильтр». Достоинством подхода является попытка обобщить характеристики осаждения, связывая входную скорость, плотность частиц и конструктивный радиус кривизны потока. В результате теоретических подсчётов (таблица 2.1) определено оптимальное расстояние

размещения фильтрующей вставки — 0,041 м от оси циклона диаметром 100 мм, что обеспечивает расчётную степень очистки 99% для частиц PM_{10} .

В главе 3 описаны экспериментальные исследования циклонной фильтрации для верификации теоретических расчётов. Создана установка на базе циклона ЦН-11 диаметром 100 мм с лавсановым фильтром, расположенным на найденном расстоянии. Получено распределение пыли: 68% улавливается тканью, 18% оседает на стенках, 14% проскакивает. Результаты качественно подтверждают теорию, но количественное сопоставление результатов расчёта и эксперимента, строго говоря, в главе не выполнено — отсутствует таблица сравнения расчётных и опытных значений фракционной эффективности. Сама конструктивная реализация «циклон-фильтра» (рисунок 3.1) и методика измерений (тарировка, замеры скоростей) сомнений не вызывают и выполнены на добротном методическом уровне.

К главе 4, посвящённой комбинированному численному исследованию, следует отнести основное достоинство работы. Автором разработан и реализован рациональный метод, радикально снижающий вычислительные затраты: сначала на 2d-модели блока из 16 элементов (ЦБ-16) путём девяти численных экспериментов определяется оптимальная компоновка циклонных элементов и входов; затем на 3d-модели одиночного элемента с фильтром выполняется финальная оценка эффективности. Такой подход, при котором максимальное количество ячеек в 3d-модели составляет около 63214, что на порядки меньше, чем потребовалось бы для полного 3d-расчёта всего блока, является несомненным методическим достижением и может быть рекомендован для расчёта других многоканальных систем. К сожалению, в тексте не приведено прямое сравнение точности 2d- и 3d-прогнозов на тестовой задаче, что позволило бы строго обосновать границы применимости предложенной комбинированной методики.

В главе 5 обсуждаются вопросы валидации результатов численных исследований на натурной модели. С этой целью сопоставлены результаты

численного и лабораторного эксперимента для циклонного элемента диаметром 100 мм (раздел 5.3). Показано, что при минимальном расходе (скорость на входе 3,5 м/с) расхождение по давлению составляет 7% (1050 Па расчёт против 981 Па опыта). Однако при номинальном расходе расхождение возрастает до 22% (9500 Па против 7800 Па). Среднее расхождение составило 14,5%, что является приемлемым для инженерных задач, но заслуживает отдельного комментария о причинах роста погрешности при увеличении расхода — возможно, из-за недостаточно точного моделирования сопротивления пористой вставки или упрощений модели турбулентности (использовалась RANS $k-\epsilon$), которая, как справедливо отмечает сам автор (глава 4), не всегда адекватно описывает высокозакрученные потоки.

В главе 6 приведены расчёты экономической эффективности. Показано, что внедрение усовершенствованного КВОУ на КС «Арская» ООО «Газпром трансгаз Казань» позволяет снизить гидравлическое сопротивление тракта на 5 мм вод. ст., что даёт экономию топливного газа 993171 руб. в год для шести ГПА в одном цехе. На АО «Эссен Продакшн АГ» достигается снижение затрат на ремонт блока очистки на 42600 руб. в год. Суммарный экономический эффект определён в 1 035 771 руб., расчётный срок окупаемости – 3-4 года при нормативном 7–8 лет. Эти данные убедительно демонстрируют практическую целесообразность разработки.

В заключении сформулированы основные научные и практические результаты работы. Приведены рекомендации по использованию разработанной методики, а также намечены перспективы дальнейших исследований.

Научная новизна исследований. Научная новизна работы не вызывает сомнений и подтверждается следующими пунктами, выносимыми на защиту:

– Создана математическая модель для анализа блочной (модульной) компоновки ВОУ на основе методов CFD, что позволяет прогнозировать эффективность осаждения.

– Разработан способ создания корректной 2d-модели трёхмерного двухфазного потока в возвратно-поточном циклонном элементе, что легло в основу комбинированного 2d-3d метода.

– Получены новые численные данные по влиянию расположения циклонных элементов в модуле и подбора параметров фильтрующей вставки на фракционную эффективность осаждения частиц PM10 и PM2.5.

Конструктивная новизна подтверждена двумя патентами РФ на полезную модель (№ 190593 «Батарейный циклон с циклонными элементами «циклон-фильтр»») и № 199050 «Циклон-фильтр»).

Научная и практическая ценность работы. Теоретически обоснована степень осаждения взвеси в двухфазном потоке при использовании модуля "циклон-фильтр". Создан алгоритм и методика для проведения комбинированных 2d и 3d исследований аппаратов с большим количеством рабочих элементов как воздухоочистительные устройства.

Практическая значимость работы заключается в применении предложений по повышению эффективности осаждения мелкодисперсных частиц PM₁₀, PM_{2,5} в предприятиях Республики Татарстан, в учебном процессе ФГБОУ ВО «КГЭУ».

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций. Основные научные положения диссертации заключаются в установлении зависимости фракционной эффективности осаждения от конструктивного параметра — радиуса установки фильтрующей вставки (0,041 м), а также в создании рационального комбинированного метода численного исследования (2d-оптимизация компоновки + 3d-валидация элемента). Они сформулированы в заключении (п.п. 1-4) и обосновываются в работе через:

– теоретические расчёты с использованием безразмерного комплекса Re_r (глава 2);

– 2d- и 3d-численные эксперименты в ANSYS Fluent (глава 4), где показано достижение 99,29% инерционного осаждения взвеси;

– валидацию на лабораторном стенде (глава 5). Положение о реламинизации потока в аппарате (заключение, п. 4) сформулировано, скорее как перспективное направление, чем как доказанный результат, что не снижает ценности работы, но указывает на путь дальнейших исследований.

Достоверность и новизна научных положений, выводов и рекомендаций. Достоверность результатов обеспечена корректным применением методов вычислительной гидродинамики (CFD) в лицензионном пакете ANSYS Fluent, верификацией сеточных зависимостей и, главное, валидацией численной модели на основе натурального эксперимента. Эксперимент выполнен с использованием поверенных измерительных приборов (микроманометр ММН-240, термоанемометр Testo 425). Количественно подтверждено, что расхождение между численным и лабораторным экспериментом составляет в среднем 14,5%, а при минимальных расходах — 7%, что является приемлемым уровнем точности.

По диссертационной работе имеются следующие пожелания и замечания:

1. Стр. 15: в диссертации отмечено, что более тяжёлые частицы пыли под действием сил инерции движутся поперёк потока быстрее лёгких. Однако не проанализировано, что сила тяжести, напротив, увлекает их в бункер, а инерция в сочетании с коагуляцией может замедлять частицы в потоке. Отсутствует оценка того, какой из механизмов преобладает для разных фракций.

2. Гл. 1.2, рис. 1.5: в базовой схеме КВОУ элемент 7 предлагается заменить как минимум четырьмя циклонно-фильтрующими аппаратами.

Такое решение существенно усложняет и загромождает установку. При этом не рассмотрено, не будет ли вибрационная активность новых фильтров нарушать работу антиобледенительного устройства.

3. Гл. 1.2.2: сказано, что подогрев или охлаждение воздуха могут быть реализованы калориферами, холодильниками и кондиционерами, устанавливаемыми отдельно на свободных площадях. Однако в типовых КВОУ холодильники и кондиционеры не применяются, а их обособленная установка противоречит принципам трассировки воздушного тракта на энергоблоках с ГТУ.

4. Гл. 1.3: в качестве материалов фильтрации упоминается стеклянная вата. Не исследован риск её уноса в процессе работы, особенно при вибрационных нагрузках. Попадание микроволокон за фильтр может привести к абразивному воздействию на оборудование.

5. Гл. 1.4: автор использует программный комплекс Flow Vision, предназначенный для расчёта дисперсных потоков, но в нём по умолчанию не реализовано двустороннее влияние частиц на поток (обратная связь). Поскольку в работе такое влияние декларируется, способ его учёта остаётся нераскрытым.

6. Стр. 61: сделан вывод, что эффективность осаждения частиц возрастает при уменьшении радиуса установки фильтра. Однако не показано, как этот геометрический фактор коррелирует с количественным отбором фракций пыли (например, не приведены зависимости фракционной эффективности от радиуса). Без такой корреляции практическая рекомендация по выбору радиуса остаётся качественной и не обеспечена расчётным аппаратом.

7. Гл. 4.3: автор указывает на использование двух графических модулей для работы с геометрией — DesignModeler и SpaceClaim Direct Modeler (SCDM). Такое дублирование усложняет процесс моделирования, особенно с учётом необходимости корректного изображения фильтрующего элемента циклона, имеющего сложную структуру (лавсановое переплетение

нитей). Не пояснено, какие именно функции и инструменты в каждой из оболочек применялись для построения геометрии фильтра и почему было недостаточно одной среды.

8. Стр. 85: в расчётах принимаются скорости потока в диапазоне 3,5–20 м/с, что практически в два раза выше скоростей, найденных для стандартного циклона в начале диссертации. Фильтрующий элемент, напротив, должен способствовать замедлению потока для повышения эффективности осаждения. Автором не обосновано, с чем связано такое увеличение скорости и как оно согласуется с заявленной логикой работы аппарата.

9. Стр. 125, табл. 5.17: указана низкая точность измерений, достигающая погрешности 18–25%. Автором не проанализированы возможные причины столь высокой погрешности (например, неравномерность подачи пыли, нестабильность расхода воздуха, методика отбора проб, погрешность весового анализа).

10. Стр. 127, рис. 5.6: приведён микроскопический снимок фильтрующего элемента из лавсана. Однако в технико-экономическом обосновании работы не представлена проработка срока службы данного материала, а также отсутствует смета затрат на будущие работы по его замене и оценка периодичности обновления в аппарате.

11. Стр. 136: указана цена 993 171 руб. Однако не ясно, относится ли эта сумма к одному циклонно-фильтрующему элементу или ко всему комплекту оборудования, необходимому для замены штатного фильтра. От этого зависит корректность расчёта капитальных затрат на проект в целом.

12. Стр. 136: снижение сопротивления на входе в воздушный тракт на 5 мм вод. ст. пересчитано в экономию топливного газа через мощность ГТУ. Однако не учтено, что воздухозаборная система КВОУ является не единственным потребителем энергии на компрессорной станции, и доля этой экономии в общем расходе топливного газа не приведена.

Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней в РФ

По п. 9: считаю, что диссертация Беляевой Г.И. на соискание ученой степени кандидата наук является научно-квалификационной работой, в которой изложены новые научно обоснованные технические решения и разработки, а именно: результаты исследования циклонно-фильтрующего аппарата, обеспечивающего эффективную очистку воздуха от пыли для последующего его использования на ГПА и ГТУ, и рекомендации для использования разработанных циклонно-фильтрующих модулей и комбинированной методики 2d-3d численного моделирования на практике, которые имеют существенное значение для развития энергетики, газотранспортной и промышленной инфраструктуры страны, в том числе для совершенствования воздухоочистки перед газотурбинными установками и компрессорными станциями, а также для систем вентиляции и кондиционирования воздуха общественных и производственных объектов. Работа особенно актуальна в связи с перспективой сохранения и роста доли углегенерации на ТЭС (сопряжённой с выбросами тонкодисперсных зол), а также в условиях сохраняющейся проблемы распространения респираторных инфекций, включая коронавирусные, где фильтрация частиц классов PM_{10} и $PM_{2,5}$ является критическим барьерным механизмом.

По п. 10: можно с очевидностью утверждать, что работа обладает внутренним единством. Все главы подчинены общей цели — созданию рационального способа комбинированного численного моделирования для усовершенствования воздухоочистительных устройств с большим числом элементов. Логика исследования выстроена последовательно: теоретическое обоснование (глава 2), 2d-оптимизация компоновки циклонных элементов в модуле (глава 4), 3d-моделирование одиночного элемента «циклон-фильтр», верификация на лабораторном стенде (глава 5) и валидация с натурным экспериментом. Предложенное в работе решение — новые конструкции «циклон-фильтр» и батарейного циклона с фильтрующими вставками, а

также комбинированная 2d-3d методика их исследования — оценено в сравнении с серийными аппаратами (ЦН-11, ЦБ-16) и получено путём последовательной модификации на основе выполненных численных и лабораторных исследований. Сведения о практическом использовании разработанного комплексного воздухоочистительного устройства подтверждены актами внедрения, приведёнными в приложениях А.1 и А.2 (КС «Арская» ООО «Газпром трансгаз Казань» и АО «Эссен Продакшн АГ»).

По п.п. 11–13: публикации соискательницы дают достаточно полное представление об основных научных результатах диссертации. Только за последние годы Беляева Г.И. имеет 3 статьи в журналах, индексируемых в SCOPUS, 9 статей в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ (из них 3 по специальности 2.1.3), а также два патента РФ на полезную модель: № 190593 «Батарейный циклон с циклонными элементами «циклон-фильтр»» и № 199050 «Циклон-фильтр». Более 34 публикаций соискательницы, включая работы в IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (2019, 2020, Екатеринбург, Казань) и IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (2019, Казань), регулярно выходили в свет с 2009 года. При этом, выходя на защиту с перевыполнением требований по количеству печатных трудов, Беляева Г.И. не прекратила публикационную активность. Ею опубликованы статьи в журналах «Надежность и безопасность энергетики» (2021, 2024, 2025), а также получены акты внедрения на объектах энергетики и промышленности Республики Татарстан. Совместно с научным руководителем и соавторами продолжаются исследования по численному моделированию мультифазных потоков в циклонно-фильтрующих элементах.

По п. 14: попыток заимствования материалов или отдельных результатов без ссылок на авторов и (или) источники в рецензируемой диссертационной работе не замечено. Все использованные результаты

предшественников сопровождаются корректным цитированием, а новые научные положения чётко выделены автором.

Заключение по диссертации.

В целом с учетом приведенных выше замечаний считаю, что диссертация Беляевой Г.И. является завершённой научно-исследовательской работой, в которой изложены новые научно обоснованные технические решения и разработки, а именно: результаты исследования циклонно-фильтрующего аппарата для очистки воздуха в КВОУ газотранспортных, энергетических, промышленных компрессорных станций.

Результаты комбинированного 2d- и 3d- численного исследования циклонно-фильтрующих модулей, обеспечивающих очистку воздуха до класса F7 с эффективностью осаждения PM_{10} и $PM_{2,5}$ до 99,29 %, а также разработанные на их основе конструкции батарейных циклонов с элементами «циклон-фильтр» имеют существенное значение для развития энергетики, газотранспортной и промышленной инфраструктуры страны. Их внедрение позволяет снизить абразивный износ проточных частей газотурбинных установок и компрессоров, повысить надёжность оборудования при сжигании углеводородов и использовании запылённого воздуха, а также улучшить санитарно-гигиенические условия труда. В условиях перспективного роста доли углегенерации и сохраняющейся проблемы респираторных инфекций (включая коронавирусные) создание высокоэффективных и энергоэкономичных воздухоочистительных устройств приобретает не только техническое, но и социально-эпидемиологическое значение.

Работа соответствует формуле специальности 2.1.3 в части разработки и совершенствования систем вентиляции, газоснабжения и воздухоочистки, направленных на повышение энергоэффективности промышленной компрессорной станции и охрану воздушного бассейна. В указанном аспекте диссертация полностью соответствует пункту 3 области

исследований: «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», поскольку в ней создан и применён рациональный способ комбинированного 2d- и 3d- численного моделирования для оптимизации расположения циклонно-фильтрующих элементов в воздухоочистительных устройствах. Работа соответствует пунктам 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.») и 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»), так как полученные результаты (степень очистки 99,29%) прошли экспериментальную валидацию и внедрены на компрессорных станциях и промышленных предприятиях Республики Татарстан с подтверждённым технико-экономическим эффектом.

Диссертационная работа соответствует критериям, предъявляемым ВАК Минобрнауки России, установленным в пунктах 9-14 Положения о присуждении ученых степеней (Постановление Правительства РФ № 842 от

