


ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ЛУГАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ ВЛАДИМИРА ДАЛЯ»

На правах рукописи

 УДК 697

ЧЕРНИКОВА ИРИНА ДЕМЬЯНОВНА

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ОТОПИТЕЛЬНО-ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ СИСТЕМ
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕМ ПРОЦЕССОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ
АЭРОТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК**

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

Диссертация

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор технических наук, доцент

Пилавов Манолис Васильевич

Идентичность всех экземпляров заверяю:

Ученый секретарь диссертационного совета

Д 24.2.484.01



З.В. Удовиченко

Луганск – 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
РАЗДЕЛ 1 АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА, ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ	13
1.1 Автоматизация процессов регулирования аэротермодинамических характеристик отопительно-вентиляционных систем.....	13
1.1.1 Системы автоматического управления отоплением, вентиляцией и кондиционированием воздуха.....	13
1.1.2 Адаптивное прогнозирующее управление отопительно-вентиляционными системами.....	14
1.2 Регулирование аэротермодинамических характеристик отопительно-вентиляционных систем.....	17
1.2.1 Регулирования аэродинамических характеристик вентиляционных систем.....	17
1.2.2 Регулирование температуры воздушных потоков.....	20
1.2.3 Регулирующие устройства вентиляционных систем с переменным расходом воздуха.....	23
1.2.4 Регулирующие устройства без подвижных механических частей.....	26
1.3 Повышение эффективности вентиляционных систем выравниванием потока на выходе радиальных вентиляторов.....	29
1.3.1 Конструктивные элементы присоединения радиальных вентиляторов к вентиляционной системе.....	30
1.3.2 Совершенствование диффузоров с несимметричным расширением на выходе радиальных вентиляторов.....	33
Выводы по первому разделу, цель и задачи исследования.....	34

РАЗДЕЛ 2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АЭРОТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ ОТОПИТЕЛЬНО-ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ СИСТЕМ.....	37
2.1 Математическое моделирование отопительно-вентиляционных систем.....	37
2.1.1 Методологические основы математического моделирования отопительно-вентиляционных систем.....	37
2.1.2 Математическая модель комбинированной отопительно- вентиляционной системы как объекта автоматического управления	42
2.1.3 Идентификация математических моделей отопительно-вентиляционных систем.....	50
2.2 Вентиляционные системы со струйными регулируемыми устройствами.....	55
2.2.1 Типовые схемы вентиляционных систем со струйными регулируемыми устройствами.....	55
2.2.2 Критерий энергетической эффективности регулирования аэродинамических характеристик вентиляционных систем.....	60
2.3 Моделирование турбулентных потоков в элементах вентиляционных систем.....	65
2.3.1 Математическая модель турбулентного потока в вентиляционной системе.....	65
2.3.2 Исследование турбулентного потока в элементах присоединения радиального вентилятора к вентиляционной системе.....	69
2.4 Особенности расчета аэротермодинамических характеристик с учетом сжимаемости воздушной среды.....	72
Выводы по второму разделу.....	77
РАЗДЕЛ 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ	79

3.1 Контрольно-измерительная аппаратура для экспериментальных исследований.....	80
3.2 Методика обработки экспериментальных данных, оценка адекватности расчетных зависимостей.....	85
3.3 Экспериментальные исследования аэродинамических характеристик вентиляционной системы с диффузорами с несимметричным расширением.....	90
3.4 Экспериментальные исследования аэродинамических характеристик вентиляционных систем со струйными регулирующими устройствами	94
Выводы по третьему разделу.....	97

РАЗДЕЛ 4 ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ

ОТОПИТЕЛЬНО-ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ СИСТЕМ

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕМ ПРОЦЕССОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ..... 100

4.1 Повышение производительности вентиляционных систем с радиальными вентиляторами.....	100
---	-----

4.2 Методика оценки возможности эффективного использования байпасного способа регулирования аэродинамических характеристик вентиляционных систем.....	106
---	-----

4.3 Совершенствование процессов регулирования отопительно-вентиляционных систем на основе адаптивного прогнозирующего управления.....	110
---	-----

4.3.1 Постановка задачи управления комбинированной отопительно-вентиляционной системой.....	111
---	-----

4.3.2. Синтез двухконтурной системы автоматического управления воздушным отоплением с МРС-регулятором.....	114
--	-----

4.3.3 Исследование переходных процессов в комбинированной отопительно-вентиляционной системе.....	118
---	-----

Выводы по четвертому разделу.....	120
-----------------------------------	-----

ЗАКЛЮЧЕНИЕ	123
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	126
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	138
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	146

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования.

Составной частью зданий и сооружений являются системы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха (ОВКВ, в зарубежной литературе HVAC). Системы ОВКВ осуществляют формирование воздушной среды в обслуживаемых помещениях, отвечающей санитарно-гигиеническим требованиям, а также необходимой для выполнения производственных и технологических процессов. Создание требуемого состояния воздушной среды обеспечивается удалением образующихся избытков тепла, влаги, газа, пыли и добавлением необходимого количества предварительно подготовленного воздуха путем его нагрева или охлаждения, осушки или увлажнения, фильтрации и др.

В настоящее время при разработке и проектировании систем ОВКВ особое внимание уделяется вопросам снижения их эксплуатационных затрат, которые в ряде случаев получаются гораздо выше, чем затраты на приобретение и установку. Обеспечить снижение эксплуатационных затрат возможно, в первую очередь, уменьшением энергопотребления и повышением надежности оборудования, элементов и устройств систем ОВКВ.

Важным резервом уменьшения энергопотребления является сокращение потребляемой мощности путем снижения потерь энергии, связанных с процессами регулирования аэротермодинамических характеристик систем ОВКВ и, прежде всего, отопительно-вентиляционных систем (ОВС). Это может быть достигнуто разработкой систем автоматического управления (САУ), обеспечивающих рациональное использование энергоресурсов за счет улучшения показателей качества регулирования ОВС на основе алгоритмов и методов оптимального управления.

Одним из направлений повышения надежности ОВС можно рассматривать использование регулирующих устройств, которые лишены влияния влажности, загрязненности, химической агрессивности рабочей среды, вибраций, резких перепадов температуры. К таким устройствам можно отнести, например, струйные элементы, которые, кроме нечувствительности к перечисленным выше факторам,

имеют более высокую надежность и долговечность, а также меньшую материалоемкость, благодаря отсутствию подвижных механических частей.

На основании вышеизложенного повышение эффективности ОВС совершенствованием процессов регулирования аэротермодинамических характеристик является актуальной научно-практической задачей, решение которой позволит обеспечить улучшение показателей качества регулирования и снижение эксплуатационных затрат.

Степень разработанности проблемы исследования.

По тематике диссертационной работы проведены исследования отечественными и зарубежными учеными, которые занимаются изучением рабочих процессов систем ОВКВ, исследованием процессов регулирования аэротермодинамических характеристик, улучшением технических характеристик и параметров оборудования, элементов и устройств данных систем, а также анализом показателей качества регулирования и эффективности ОВС. Наиболее весомый вклад в развитие этого направления науки внесли такие ученые, как: Андрийчук Н.Д., Богословский В.Н., Беккер А.М., Бондарь Е.С., Гусенцова Я.А., Зайцев О.Н., Каменев П.Н., Коваленко А.А., Пилавов М.В., Посохин В.Н., Свистунов В.К., Соколов В.И., Стефанов Е.В., Штокман Е.А., Driss Z., Ifa S, Howell R., McPherson M. и др.

Объект исследования – рабочие процессы ОВС, процессы регулирования аэротермодинамических характеристик систем.

Предмет исследований – аэротермодинамические характеристики ОВС, показатели качества регулирования и эффективности систем.

Цель исследования – повышение эффективности ОВС совершенствованием процессов регулирования аэротермодинамических характеристик, что обеспечивает улучшение показателей качества регулирования и снижение эксплуатационных затрат.

Задачи исследования.

- выполнить анализ современных подходов к проектированию систем ОВКВ, разработке САУ воздушным отоплением и обосновать основные направления исследований для повышения эффективности ОВС;

- предложить математическую модель комбинированной ОВС как объекта автоматического управления температурным режимом в обслуживаемом помещении, обосновать подходы к структурной и параметрической идентификации математических моделей систем ОВКВ и методы определения параметров для выбранной структуры динамической модели;

- исследовать возможность использования струйных регулирующих устройств в САУ воздушным отоплением для повышения эффективности ОВС, предложить критерий энергетической эффективности регулирования аэродинамических характеристик вентиляционных систем;

- теоретически обосновать и экспериментально подтвердить технические решения для повышения производительности вентиляционных систем за счет выравнивания потока в диффузорах с несимметричным расширением, имеющих разные наклоны боковых стенок;

- разработать рекомендации по размещению конструктивных элементов в диффузорах с несимметричным расширением, имеющих разные наклоны боковых стенок, обеспечивающих повышение производительности вентиляционных систем;

- предложить методику оценки возможности эффективного использования байпасного способа регулирования аэродинамических характеристик вентиляционных систем по начальному (максимальному) расходу в системе на основе критерия энергетической эффективности регулирования;

- разработать двухконтурную САУ воздушным отоплением с регуляторами расхода и температуры приточного воздуха, обеспечивающей повышение эффективности ОВС за счет совершенствования процессов регулирования аэротермодинамических характеристик.

Научная новизна исследования.

1. Разработана математическая модель комбинированной ОВС как объекта автоматического управления температурным режимом в помещении для синтеза САУ воздушным отоплением с регулированием расхода и температуры приточного воздуха.

2. Предложен критерий энергетической эффективности регулирования аэродинамических характеристик вентиляционных систем, позволяющий производить оценку возможности эффективного использования байпасного способа регулирования.

3. Получили дальнейшее развитие методы выравнивания потока на выходе радиальных вентиляторов путем установки конструктивных элементов в диффузорах с несимметричным расширением, что обеспечивает повышение производительности вентиляционных систем.

4. Разработана двухконтурная САУ воздушным отоплением с МРС-регулятором расхода и ПИД-регулятором температуры приточного воздуха, обеспечивающая улучшение показателей качества регулирования аэротермодинамических характеристик ОВС.

Теоретическая и практическая значимость исследования.

1. Разработана структурная схема комбинированной ОВС и на ее основе блок-диаграмма в среде Simulink пакета прикладных программ MATLAB для моделирования САУ воздушным отоплением, позволяющая исследовать процессы и качество регулирования аэротермодинамических характеристик.

2. Предложена методика оценки возможности эффективного использования байпасного способа регулирования аэродинамических характеристик вентиляционных систем по начальному (максимальному) расходу в системе.

3. Разработаны рекомендации по выбору геометрических размеров и параметров размещения конструктивных элементов в диффузорах с несимметричным расширением, имеющих разные наклоны боковых стенок, что обеспечивает повышение производительности вентиляционных систем.

4. Разработана двухконтурная САУ воздушным отоплением с МРС-регулятором расхода и ПИД-регулятором температуры приточного воздуха, обеспечивающая повышение эффективности ОВС за счет совершенствования процессов регулирования аэротермодинамических характеристик.

Основные результаты диссертационной работы использованы и внедрены на ГУП ЛНР «Лугансквода», ЧАО «Луганский завод «Сантехдеталь» при

модернизации и обновлении систем инженерного оборудования производственных участков и помещений, в учебном процессе на кафедре «Вентиляция, теплогазо- и водоснабжение» института строительства, архитектуры и жилищно-коммунального хозяйства (ИСА и ЖКХ) Луганского государственного университета имени Владимира Даля (ЛГУ им. В. Даля).

Методология и методы исследования.

Достижение поставленной цели и выполнение сформулированных задач проведено на основе системного подхода к теоретическим и экспериментальным исследованиям. В работе использованы методы математического и компьютерного моделирования, методы теории автоматического управления, методы теории вероятности и математической статистики, методы экспериментальных исследований на лабораторных стендах. В основе математических моделей лежат классические уравнения технической механики жидкости и газа, термодинамики, в ряде случаев применены методы структурной и параметрической идентификации, эмпирические зависимости и приближенные формулы, что вполне допустимо при моделировании таких сложных объектов, которыми являются системы отопления и вентиляции.

Личный вклад соискателя состоит в постановке цели и задач исследования, непосредственном проведении и участии во всех видах исследований, проводимых в рамках диссертационной работы, формулировании выводов по результатам ее выполнения. Отдельные составляющие теоретических и экспериментальных исследований выполнены совместно с соавторами научных работ, представленных в списке публикаций.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Математическая модель комбинированной ОВС как объекта автоматического управления температурным режимом в помещении.
2. Критерий энергетической эффективности регулирования аэродинамических характеристик вентиляционных систем.
3. Рекомендации по размещению конструктивных элементов в диффузорах с несимметричным расширением, имеющих разные наклоны боковых стенок.

4. Двухконтурная САУ воздушным отоплением с МРС-регулятором расхода и ПИД-регулятором температуры приточного воздуха.

Степень достоверности и апробация результатов.

Достоверность и обоснованность результатов и выводов диссертационной работы подтверждается корректным использованием математического аппарата, соответствием принятых допущений характеру решаемых задач. Кроме того, достоверность подкрепляется значительным объемом экспериментальных данных, полученных в реальных условиях работы оборудования, применением современных методов проведения экспериментальных исследований и обоснованным выбором контрольно-измерительной аппаратуры, а также сопоставлением теоретических и экспериментальных данных, оценкой адекватности расчетных зависимостей.

Основные результаты диссертационной работы доложены и одобрены на следующих научных конференциях:

- VII научно-практическая конференция с международным участием «Возрождение, экология, ресурсосбережение и энергоэффективность инфраструктуры урбанизированных территорий Донбасса: традиции и инновации» (г. Луганск, 2022 г.);

- VI научно-техническая интернет-конференция с международным участием «Актуальные вопросы механики текучих сред» (г. Луганск, 2022 г.);

- Международная научная конференция «Экологическое и биологическое благополучие флоры и фауны» (Амурская обл., г. Благовещенск, 2023 г.);

- VI международная научно-практическая конференция «Методология безопасности среды жизнедеятельности 2023» (Республика Крым, г. Симферополь, 2023 г.);

- научно-практическая конференция с международным участием «Актуальные проблемы строительства, архитектуры и жилищно-коммунального хозяйства» (ЛНР, г. Луганск, 2023 г.);

- V открытая международная очно-заочная научно-практическая конференция молодых ученых и студентов «Энергоресурсосбережение в инженерных и энергетических системах зданий и сооружений» (ДНР, г. Макеевка, 2024 г.);

- IX научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием «Актуальные проблемы урбанизированных территорий Донбасса» (г. Луганск, 2024 г.).

В полном объеме диссертационная работа докладывалась и была одобрена на расширенном заседании кафедры «Вентиляция, теплогазо- и водоснабжение» ИСА и ЖКХ ЛГУ им. В. Даля.

Публикации.

По материалам диссертации опубликовано 12 научных работ, в том числе 4 статьи в изданиях, входящих в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание ученой степени кандидата наук. Соискателем получен 1 патент Российской Федерации на полезную модель, 1 публикация проиндексирована в международных наукометрических базах данных Web of Science и Scopus.

Структура диссертации.

Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка литературы и приложений. Полный объем диссертации составляет 152 страницы, в том числе 125 страниц основного текста, список литературы из 121 источника на 12 страницах, приложений на 15 страницах, работа имеет 54 рисунка и 2 таблицы.

РАЗДЕЛ 1

АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА, ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Автоматизация процессов регулирования азротермодинамических характеристик отопительно-вентиляционных систем

Как было отмечено во введении, повышение эффективности ОВС может быть достигнуто разработкой САУ, обеспечивающих улучшения показателей качества регулирования параметров ОВС на основе алгоритмов и методов оптимального управления [2-4, 68].

1.1.1 Системы автоматического управления отоплением, вентиляцией и кондиционированием воздуха

При математическом описании САУ ОВКВ достаточно широко применяются методы с использованием передаточных функций, что позволяет представить взаимосвязь входных сигналов и выходных параметров составляющих элементов, отдельных частей и системы в целом [2, 15, 37].

Рассмотрим САУ ОВКВ как одномерную систему, имеющую объект управления с одной выходной величиной y . Считаем, что САУ воспринимает одно задающее воздействие g и одно возмущающее воздействие f . Тогда такую САУ ОВКВ с типовым регулятором можно представить обобщенной структурной схемой [10, 11, 58] согласно рисунку 1.1. Здесь обозначены: g – задающее воздействие (уставка); y – выходная (регулируемая) величина (переменная); ε – ошибка управления; $\varepsilon = g - y$; f – возмущающее воздействие (возмущение); u – управляющее воздействие (сигнал управления); W_u – передаточная функция объекта управления по сигналу управления; W_f – передаточная функция объекта управления по возмущению; W_c – передаточная функция регулятора.

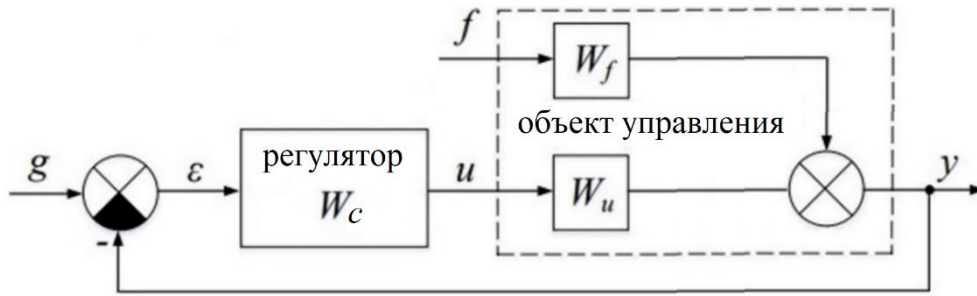


Рисунок 1.1 – САУ ОВКВ

Объектом управления САУ ОВКВ является обслуживаемое помещение [41, 60, 67]. В САУ воздушным отоплением обычно переменной является тепловая нагрузка. Поэтому для таких объектов управления возможны три вида систем регулирования температурного режима [2, 88, 105]:

- системы с постоянным расходом и переменной температурой приточного воздуха;
- системы с переменным расходом приточного воздуха определенной температуры;
- смешанные (или комбинированные, или двухконтурные) системы.

Первые два вида САУ воздушным отоплением являются наиболее распространенными. Данные ОВС достаточно полно рассмотрены и исследованы, для них аналитически получены и экспериментально подтверждены передаточные функции, даны рекомендации по определению коэффициентов передач и постоянных времени [55, 77, 110].

В этой связи, несомненный интерес вызывает исследование комбинированных ОВС и разработка двухконтурных САУ воздушным отоплением.

1.1.2 Адаптивное прогнозирующее управление отопительно-вентиляционными системами

В настоящее время получают распространение новые подходы к построению САУ ОВКВ, использование которых дает дополнительные возможности в

совершенствовании процессов регулирования ОВС на основе алгоритмов оптимального управления [43, 106, 110]. Среди таких алгоритмов выделяется адаптивное прогнозирующее управление, основанное на применении прогнозирующей модели – Model Predictive Control (MPC) [52].

Такой подход широко используется для управления нелинейными динамическими системами [109, 117, 121]. Основным преимуществом MPC-регулятора является возможность исключения статической ошибки в системе и достижения компромисса между нечувствительностью к отклонениям и качеством регулирования [42]. Однако, как и другие методы оптимального управления, данный подход предполагает использование математической модели объекта управления. Вместе с тем, следует отметить важное достоинство MPC-подхода, заключающееся в возможности использования приближенных линейных моделей для разработки системы управления, так как реализуется закон управления с обратной связью по параметрам состояния, а управление формируется и производится на достаточно коротком промежутке времени.

Рассмотрим MPC-подход на упрощенной функциональной схеме САУ ОВКВ как одномерной системы (рисунок 1.2), в которой объект управления имеет одну выходную величину y (здесь обозначения согласно рисунку 1.1). MPC-регулятор приведен на рисунке 1.3. Регулятор включает оптимизатор (блок оптимизации) и прогнозирующую модель объекта.

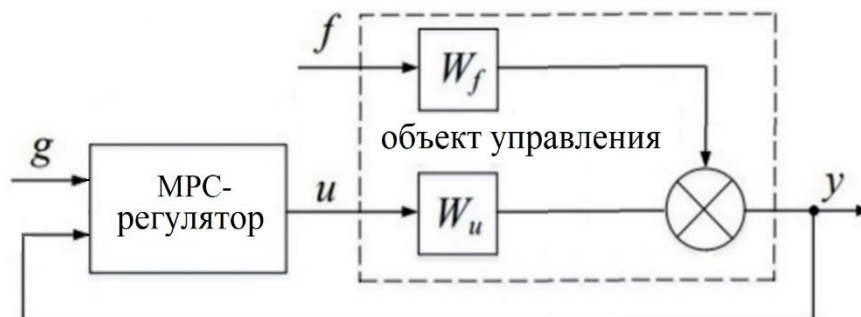


Рисунок 1.2 – САУ ОВКВ с MPC-регулятором

Принцип адаптивного прогнозирующего управления поясняется рисунком 1.4. Значения регулируемой величины $y(t)$, предсказанные в момент времени t , обозначены через $\hat{y}(t)$. Система рассматривается для дискретных моментов времени $t=k\Delta T$, где k – целое число, а ΔT – период квантования. Горизонт предсказания строится на определенное число шагов N_p .

Прогнозируемое изменение выходной переменной будет зависеть от предсказанных значений управляющего воздействия $u(t)$. Идея MPC-подхода состоит в определении оптимальной последовательности значений управляющего сигнала, которая позволила бы обеспечить наилучшую прогнозируемую траекторию для выходной переменной. Длина последовательности N_c управляющих воздействий называется горизонтом управления.



Рисунок 1.3 – MPC-регулятор

В качестве критерия оптимизации используется функционал

$$J = \sum_{i=k}^{k+N_p} (y(i) - g(i))^2 + \sum_{i=k}^{k+N_c} (u(i) - u(k))^2, \quad (1.1)$$

где $k=1, 2, 3 \dots$ – целое число;

N_p – горизонт предсказания;

N_c – горизонт управления.

В пакете прикладных программ MATLAB для построения систем адаптивного прогнозирующего управления имеется набор программных инструментов Model Predictive Control Toolbox [33, 115]. Также отметим работы [10, 108, 116] эффективного применения MPC-подхода для управления одноконтурными ОВС с переменным расходом воздуха.

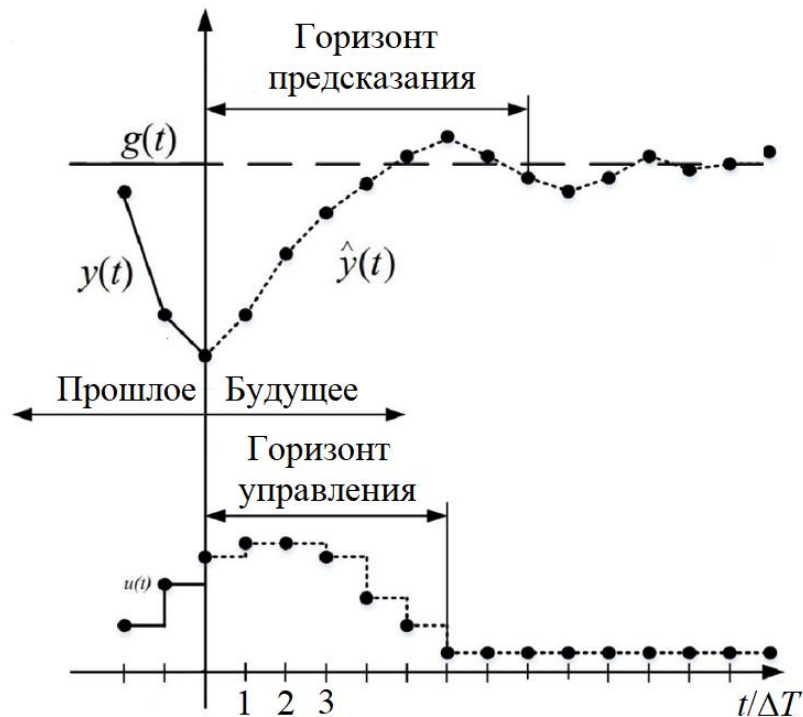


Рисунок 1.4 – Адаптивное прогнозирующее управление (MPC-подход)

1.2 Регулирование аэротермодинамических характеристик отопительно-вентиляционных систем

1.2.1 Регулирования аэродинамических характеристик вентиляционных систем

Для регулирования расхода существует два принципиально различных способа [71, 103, 105]. Первый способ предполагает изменение производительности

вентилятора. При втором способе в системе дополнительно создают аэродинамическое сопротивление движению потока.

При первом способе используют регулирование частоты вращения рабочего колеса вентилятора, а выполнить регулирование расхода воздуха для отдельно взятого участка не представляется возможным. Поэтому для регулирования расхода воздуха на отдельно взятом или нескольких участках вентиляционной сети применяют второй подход, используя различного вида регулирующие устройства, позволяющие создавать переменное сопротивление (дресселирование).

Необходимо отметить, что с точки зрения экономической эффективности второй способ (дрессельное регулирование) является менее эффективным вследствие больших затрат энергии [19, 51, 67]. Сравнение эффективности различных способов регулирования расхода показано на рисунке 1.5.

Поэтому для повышения эффективности и уменьшения эксплуатационных затрат в разветвленных вентиляционных системах сочетают оба способа регулирования расхода [26, 114].

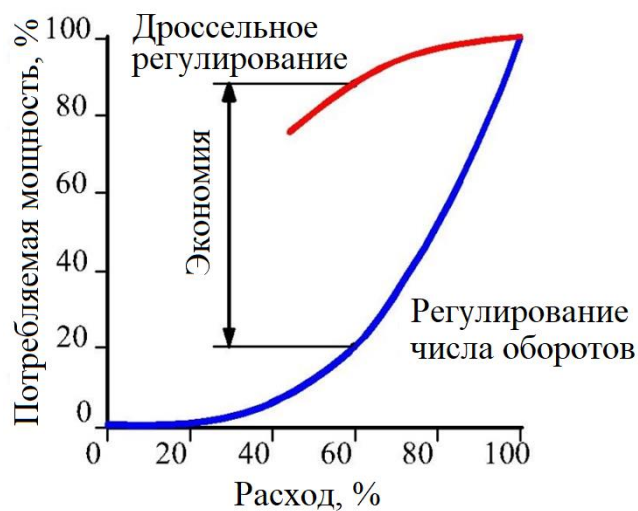


Рисунок 1.5 – Сравнение эффективности различных способов регулирования расхода

Создание в вентиляционной системе необходимого дополнительного аэродинамического сопротивления путем дресселирования широко применяется на

практике при регулировании характеристик ОВС [71]. К регулирующим устройствам ОВС в качестве основного требования предъявляется возможность осуществления плавного изменения расхода вентилятора в диапазоне от максимальной величины до конкретного заданного значения.

Наиболее распространенными регулирующими устройствами являются дроссель-клапаны, диафрагмы, шиберы и другие органы [47, 89]. Наибольшее распространение получили одностворчатые клапаны круглого (рисунок 1.6, а, б) и прямоугольного (рисунок 1.6, в, г) сечения.



одностворчатые клапаны круглого сечения:

а) с ручного управления; б) автоматического управления;

одностворчатые клапаны прямоугольного сечения:

в) ручного управления; г) автоматического управления;

д) регулируемая диафрагма

Рисунок 1.6 – Основные регулирующие устройства ОВС

При ручной настройке вентиляционной системы в основном используют клапаны шиберного типа [14, 40, 67]. При пусконаладочных работах применяются регулируемые диафрагмы (рисунок 1.6, д).

При использовании в вентиляционных системах осевых вентиляторов регулирование расхода воздуха может осуществляться поворотом и изменением длины лопаток рабочего колеса, применением направляющего аппарата [20, 104]. Отметим конструктивное решение для рабочего колеса осевого насоса с регулированием длины лопаток [61], на которое получен патент Российской Федерации № 225264 на полезную модель «Рабочее колесо осевого вентилятора». Описание полезной модели приведено в Приложении А.

Совершенствование устройств для регулирования аэродинамических характеристик обеспечивает повышение эффективности и улучшение эксплуатационных характеристик ОВС в целом.

1.2.2 Регулирование температуры воздушных потоков

Регулирование температуры воздушных потоков осуществляется калориферами или воздухонагревателями [18, 79]. Воздухонагреватели и калориферы – это поверхностные теплообменные аппараты, которые предназначены для нагрева приточного воздуха в системах ОВКВ. Для удобства определения соответствия назначению теплообменника часто принято условно называть воздухонагревателями (воздухоохладителями) теплообменные аппараты для использования в системах кондиционирования воздуха, а калориферами – теплообменные аппараты для вентиляционных систем, тепловых завес и систем воздушного отопления.

По виду теплоносителя различают калориферы водяные, паровые, электрические и огневые. В ОВС наиболее распространенными являются калориферы в виде поверхностных теплообменников типа «воздух– жидкость» [9]. Схема теплообменного аппарата показана на рисунке 1.7.

Выходным (регулируемым) параметром теплообменника является температура воздуха на выходе $t_{вых}$. Управляющими воздействиями (сигналами) могут

выступать расход жидкости (теплоносителя) G_w , а также ее температура на входе t_{wex} . Температура воздуха на входе t_{ex} и расход воздуха G_b выступают в качестве возмущающих воздействий. Хотя температура теплоносителя на выходе $t_{wвых}$ не регулируемый, управляющий или возмущающий параметром, но, вместе с тем, необходим контроль ее величины. Минимальное значение температуры на выходе, а также температура воздуха на входе и температура наружного воздуха формируют сигнал для включения защиты от замерзания калорифера.

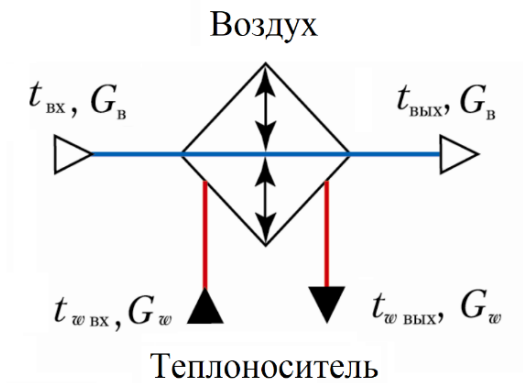


Рисунок 1.7 – Теплообменный аппарат

В первом приближении передаточную функцию теплообменника по любому управляющему сигналу принято представлять в виде апериодического звена первого порядка [2, 53]

$$W(s) = \frac{k_{he}}{T_{he}s + 1}, \quad (1.2)$$

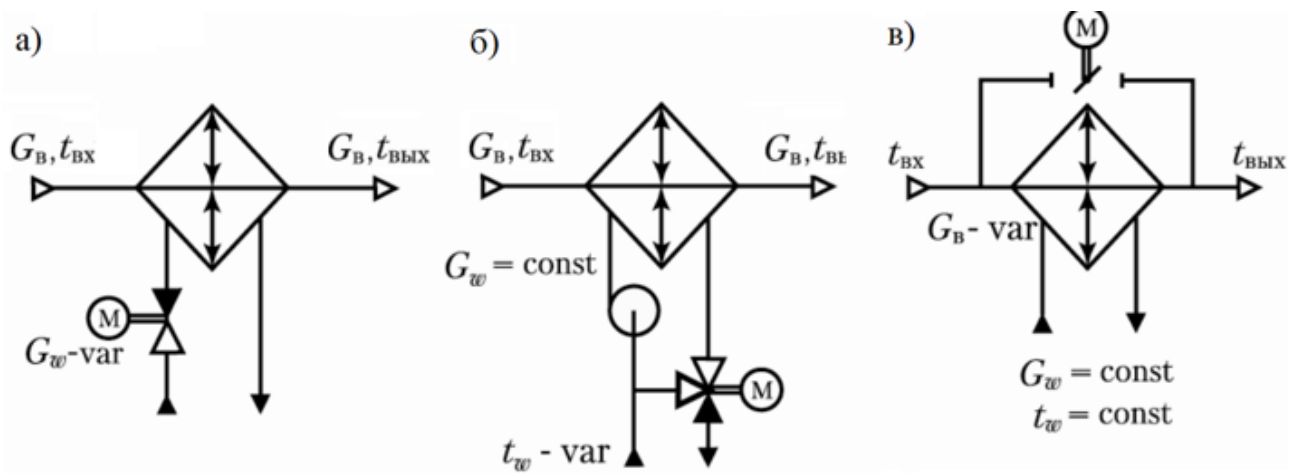
где s – переменная Лапласа;

k_{he} – коэффициент передачи;

T_{he} – постоянная времени.

Управление теплообменными аппаратами типа «воздух-жидкость» может осуществляться расходом теплоносителя G_w , его температурой t_w , а также и байпасированием, т.е. перепуском, воздуха. Варианты технической реализации разных способов управления показаны на рисунке 1.8.

Управление расходом теплоносителя (рисунок 1.8, а) осуществляется одним двухходовым клапаном и является наиболее применимым способом благодаря своей простоте. Вместе с тем, регулировочная характеристика для данного способа управления, т.е. зависимость температуры воздуха на выходе $t_{\text{вых}}$ от расхода теплоносителя G_w нелинейная. Коэффициент теплопередачи теплообменника k_{he} изменяется во всем диапазоне регулирования, что затрудняет настройку САУ воздушным отоплением.



а) управление расходом теплоносителя; б) управление температурой теплоносителя; в) управление байпасированием воздуха

Рисунок 1.8 – Управление теплообменными аппаратами

типа «воздух-жидкость»

Для регулирования температуры теплоносителя (рисунок 1.8, б) чаще всего применяют два двухходовых клапана или один трехходовой, а также используют циркуляционный насос. Зависимость температуры воздуха на выходе $t_{\text{вых}}$ от температуры теплоносителя t_w (воды), в этом случае получается линейной, а коэффициент передачи k_{he} имеет постоянное значение. В случае выбора клапанов, имеющих линейную характеристику, теплообменный аппарат в целом получается линейным объектом. Поэтому, по техническим характеристикам теплообменника предпочтительной считается схема управления температурой теплоносителя ввиду линейности регулировочной характеристики.

Считается, что управление теплообменным аппаратом применением байпасирования воздушного потока (рисунок 1.8, в) не обеспечивает достаточного качества регулирования, поскольку нельзя уменьшить до нуля значение расхода теплоты или холода, а регулировочная характеристика имеет существенную нелинейность. При разработке САУ воздушным отоплением байпасирование практически не используется.

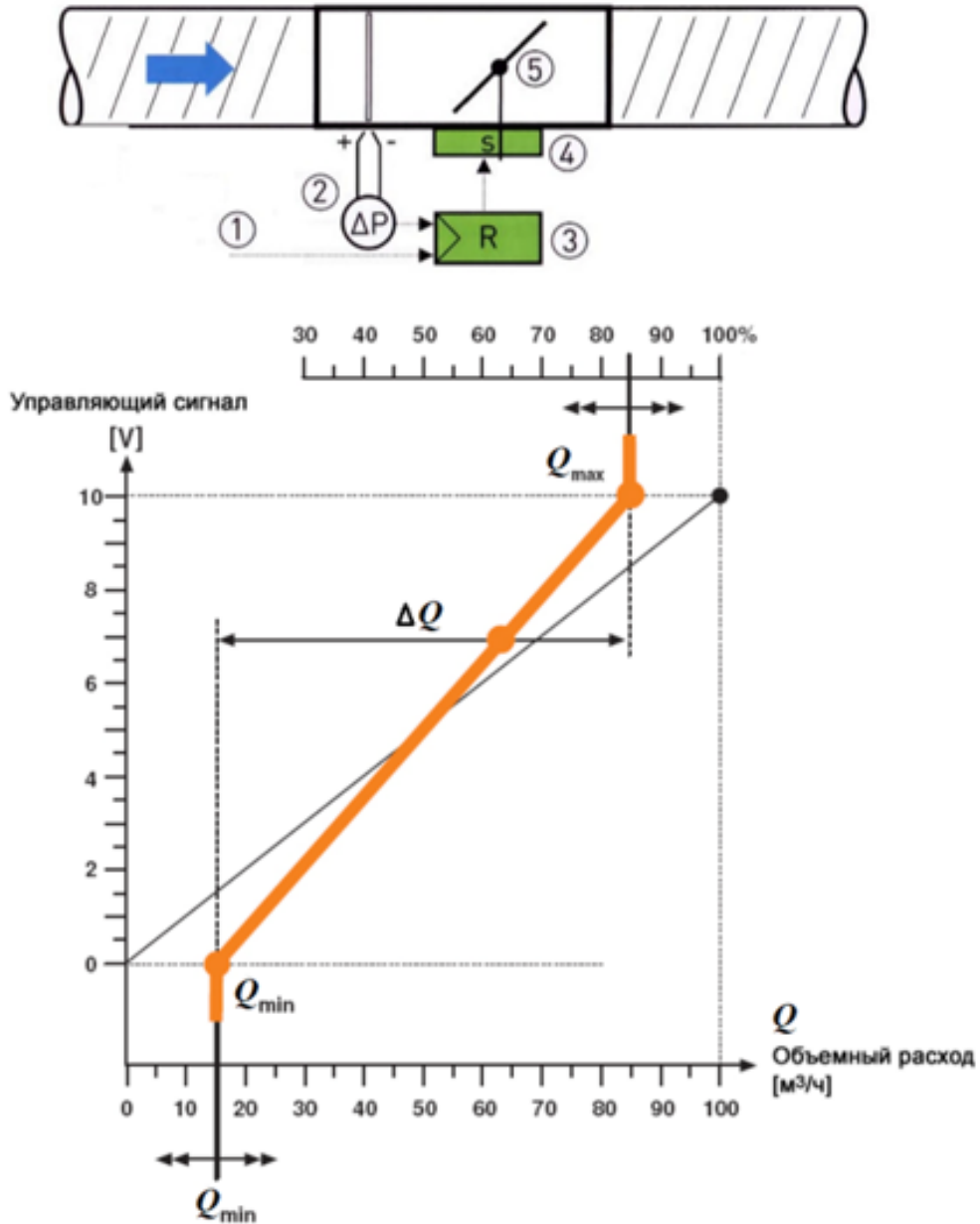
1.2.3 Регулирующие устройства вентиляционных систем с переменным расходом воздуха

В настоящее время широкое применение получают вентиляционные системы с переменным расходом воздуха, так называемые вентиляционные системы VAV (Variable Air Volume – переменный объем воздуха) [71, 88, 91]. В системах VAV изменения тепловой нагрузки компенсируются изменением расхода приточного или (и) вытяжного воздуха.

Главным элементом вентиляционной системы VAV является терминал VAV (регулятор VAV или клапан VAV). Основной задачей терминала VAV является поддержание через него заданного расхода воздуха. Клапан (регулятор) VAV показан на рисунке 1.9. Основные конструктивные элементы регулятора VAV представлены на рисунке 1.10. Величина поддерживаемого им расхода устанавливается значением управляющего сигнала.



Рисунок 1.9 – Клапаны VAV
прямоугольного и круглого сечения



1 - внешний управляющий сигнал; 2 - преобразователь перепада давлений;
 3 - регулятор; 4 - электропривод; 5 - дроссельная заслонка
 Рисунок 1.10 – Конструктивные элементы терминала VAV
 и его регулировочная характеристика

На рисунке 1.11 показан пример САУ воздушным отоплением офисного помещения на основе приточной вентиляционной системы VAV [10, 80, 116]. ОВС обеспечивает температурный режим $T(t)$ согласно заданному закону изменения температуры $T_s(t)$, что достигается регулированием величины массового расхода

приточного воздуха $G(t)$, который поступает от центральной приточной вентиляционной установки.

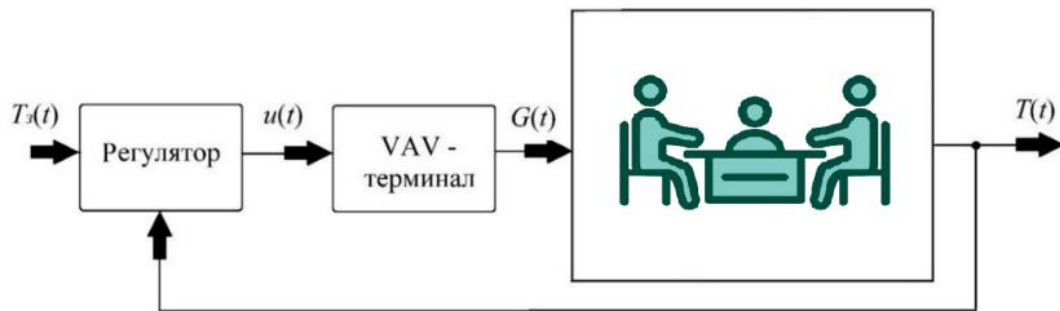


Рисунок 1.11 – САУ воздушным отоплением офисного помещения с применением приточной вентиляционной системы VAV

Основное преимущество использования вентиляционных систем с переменным расходом воздуха — это возможность уменьшения общего количества подаваемого воздуха в здание. В его помещениях или отдельных зонах тепловые нагрузки и вредные выделения неодинаковы для различных режимов эксплуатации. Поэтому клапаны VAV регулируют количество воздуха согласно необходимой потребности расхода воздуха для обслуживаемого помещения или значимой (рабочей) зоны [91]. В нужное время увеличенный расход воздуха подается в помещение, где требуется большая потребность в вентилировании. Поэтому, различные потребности отдельных помещений и рабочих (значимых) зон позволяют снизить величину суммарного расхода и потребляемой мощности для всей системы вентиляции.

Что касается недостатков данных систем VAV, то, в первую очередь, необходимо отметить классическую конструкцию регулирующего элемента. Здесь для регулировочного элемента применяется дроссельная заслонка. При такой конструкции из-за набегания воздушного потока на дроссельную заслонку возникает сильное вихреобразование и появляется существенная неустойчивость турбулентного потока. Это может привести к рассогласованию совместной работы электропривода дроссельной заслонкой, преобразователя перепада давлений и регулятора в целом.

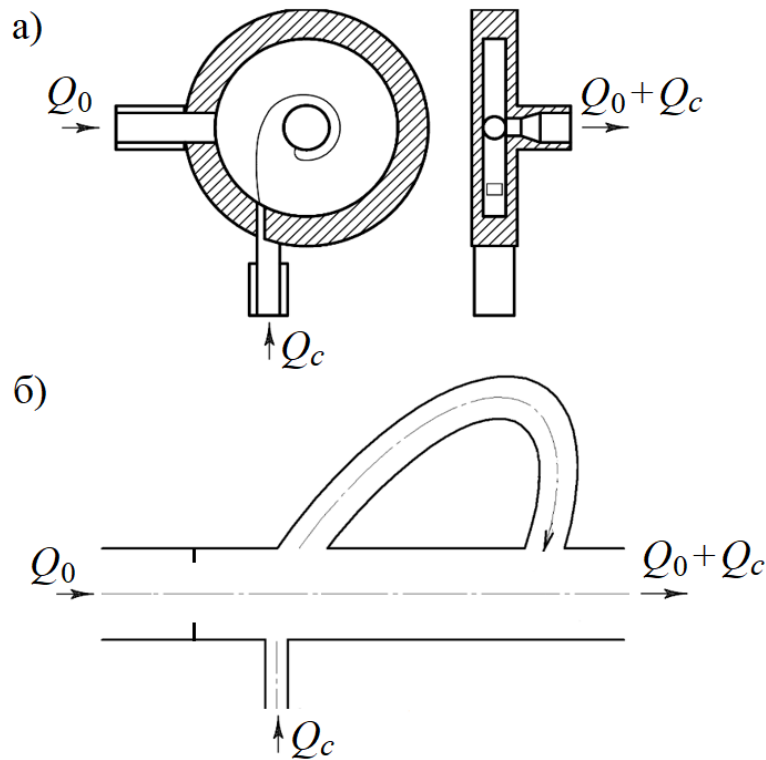
1.2.4 Регулирующие устройства без подвижных механических частей

Рассмотренные в п. 1.2.1, 1.2.3 регулирующие устройства имеют достаточно сложную конструкцию, обладают большой материалоемкостью, требуют для управления оснащения дополнительными приводами и элементами. Наличие в конструкции подвижных механических частей усложняет обслуживание и ремонт, а также снижает надежность работы и долговечность. Ряд устройств не обеспечивают плавное регулирование расхода вентилятора в диапазоне от максимальной величины до конкретного заданного значения. Отдельные устройства не отвечают требованиям энергетической эффективности, т.е. не являются такими, которые обеспечивают максимальное уменьшение потребляемой вентиляторной установкой мощности при уменьшении расхода воздуха.

Некоторые недостатки можно исключить применением вихревых и струйных устройств [13, 27], которые не имеют подвижных механических частей и элементов, поэтому им присущи более высокие показатели надежности и долговечности. Такие устройства лишены влияния влажности, загрязненности, химической агрессивности рабочей среды, вибраций, резких перепадов температуры. Кроме нечувствительности к перечисленным выше факторам, они имеют более высокую надежность и долговечность, а также меньшую материалоемкость, благодаря отсутствию подвижных механических частей. Регулирующим устройствам с вихревыми и струйными элементами присущи определенные недостатки, которые ограничивают их широкое использование в вентиляционных системах, среди которых, прежде всего, необходимо отметить более высокий уровень шума [75, 90].

Отметим принцип работы вихревых и струйных регулирующих устройств. Основной поток с расходом Q_0 через вихревое регулирующее устройство поступает в радиальный канал и вытекает из центрального отверстия (рисунок 1.12, а). При наличии потока управления Q_c в тангенциальном канале основной поток закручивается, и тогда коэффициент сопротивления вихревого устройства возрастает. Таким образом осуществляется регулирование расхода в вентиляционной системе.

В струйном регулирующем устройстве поток управления с расходом Q_c перенаправляет часть основного потока с расходом Q_0 в боковой канал. На выходе из бокового канала формируется струя, направленная на встречу основному потоку (рисунок 1.12, б). Тогда коэффициент сопротивления вихревого устройства возрастает и происходит регулирование расхода в системе.



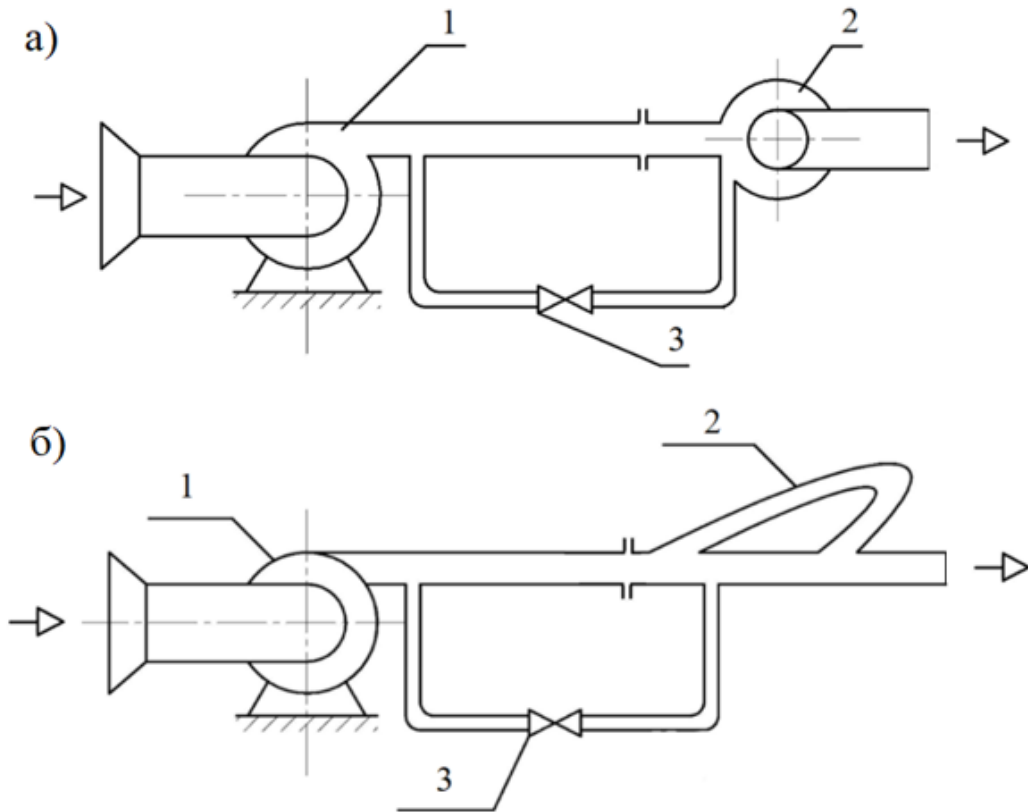
а) вихревое регулирующее устройство;

б) струйное регулирующее устройство

Рисунок 1.12 – Вихревые и струйные регулирующие устройства
вентиляционных систем

Оба регулирующих устройства могут иметь дополнительный орган, имеющий гораздо меньшие размеры, для формирования и регулирования потоков управления из линии основного потока. На рисунке 1.13 изображены одни из возможных схем вентиляционных систем, содержащие вихревые и струйные регулирующие устройства. На схемах обозначены: вентилятор 1, регулирующие устройства 2, дроссель 3.

Для вентиляционной системы с вихревым регулирующим устройством (рисунок 1.13, а), установленным на выходе вентилятора, настройка потока управления осуществляется дросселем. Регулирование расхода в системе происходит путем создания закрутки основного потока в вихревом устройстве за счет взаимодействия основного и управляющего потоков. При этом изменяется аэродинамическое сопротивление регулирующего устройства и, как следствие, расход вентилятора.



а) схема с вихревым регулирующим устройством;

б) схема со струйным регулирующим устройством

1 – вентилятор; 2 – регулирующее устройство; 3 - дроссель

Рисунок 1.13 – Вентиляционные системы

Для вентиляционной системы со струйным регулирующим устройством (рисунок 1.13, б), установленным на выходе вентилятора, настройка потока управления также осуществляется дросселем. Поток в канале управления перенаправляет часть основного потока в боковой канал. Регулирование расхода в системе происходит путем создания в боковом канале струи, направленной под углом к

основному потоку. При этом изменяется аэродинамическое сопротивление регулирующего устройства и, как следствие, расход вентилятора 1.

Вопросы разработки и проектирования вихревых и струйных регулирующих работ широко представлены в работах Гусенцовой Я.А., Семина Д.А., Андрийчука К.Н., Коваленко А.А., Андрийчука В.Н. [13, 21, 27, 75, 90]. Накопленный опыт позволяет выбирать необходимые геометрические параметры в соответствии с заданными аэродинамическими характеристиками устройств. В то же время, в литературе практически нет сведений по расчету рабочих процессов вентиляционных систем со струйными регулирующими устройствами, в частности, отсутствуют методики расчета регулировочных характеристик, что является одним из основных факторов, который ограничивает их применение в ОВС.

На основании вышеизложенного можно считать, что интересным направлением повышения надежности ОВС следует рассматривать использование струйных регулирующих устройств. Такие устройства лишены влияния влажности, загрязненности, химической агрессивности рабочей среды, вибраций, резких перепадов температуры. Кроме нечувствительности к перечисленным выше факторам, они имеют более высокую надежность и долговечность, а также меньшую материалоемкость, благодаря отсутствию подвижных механических частей. В этой связи, необходимы исследования по использованию струйных регулирующих устройств в САУ воздушным отоплением с точки зрения энергетической эффективности регулирования аэродинамических характеристик вентиляционных систем.

1.3 Повышение эффективности вентиляционных систем выравниванием потока на выходе радиальных вентиляторов

Важным направлением повышения эффективности ОВС является дальнейшее развитие методов выравнивания потока в элементах соединения воздуховодов с выходными патрубками радиальных вентиляторов, что обеспечивает повышение производительности вентиляционных систем. Это обосновывается тем, что на выходе радиального вентилятора воздушный поток имеет существенно

неравномерное поле скоростей, поток претерпевает деформацию своей структуры, вследствие чего в нем возникают крупномасштабные завихрения [50, 54].

1.3.1 Конструктивные элементы присоединения радиальных вентиляторов к вентиляционной системе

На рисунке 1.14 показаны диффузоры, которые устанавливаются на выходе радиальных вентиляторов для присоединения их к вентиляционной системе, когда выходной патрубок вентилятора и напорный воздуховод имеют различные площади, а также формы поперечного сечения [12, 56]. Кроме того, установка диффузоров осуществляется для снижения потери динамического напора в том случае, когда на выходе вентилятора отсутствует воздуховод или какие-либо другие устройства и оборудование.

Диффузоры являются широко распространёнными конструктивными элементами, которые широко применяются в системах вентиляции и имеют самые разнообразные формы, конструкции и сечения. Эффективность использования диффузоров существенно зависит от условий входа потока, что затрудняет анализ влияния их на аэродинамические характеристики ОВС.

Диффузоры характеризуются параметрами: угол раскрытия α_∂ , степень расширения \bar{F}_∂ и относительная длина \bar{l}_∂

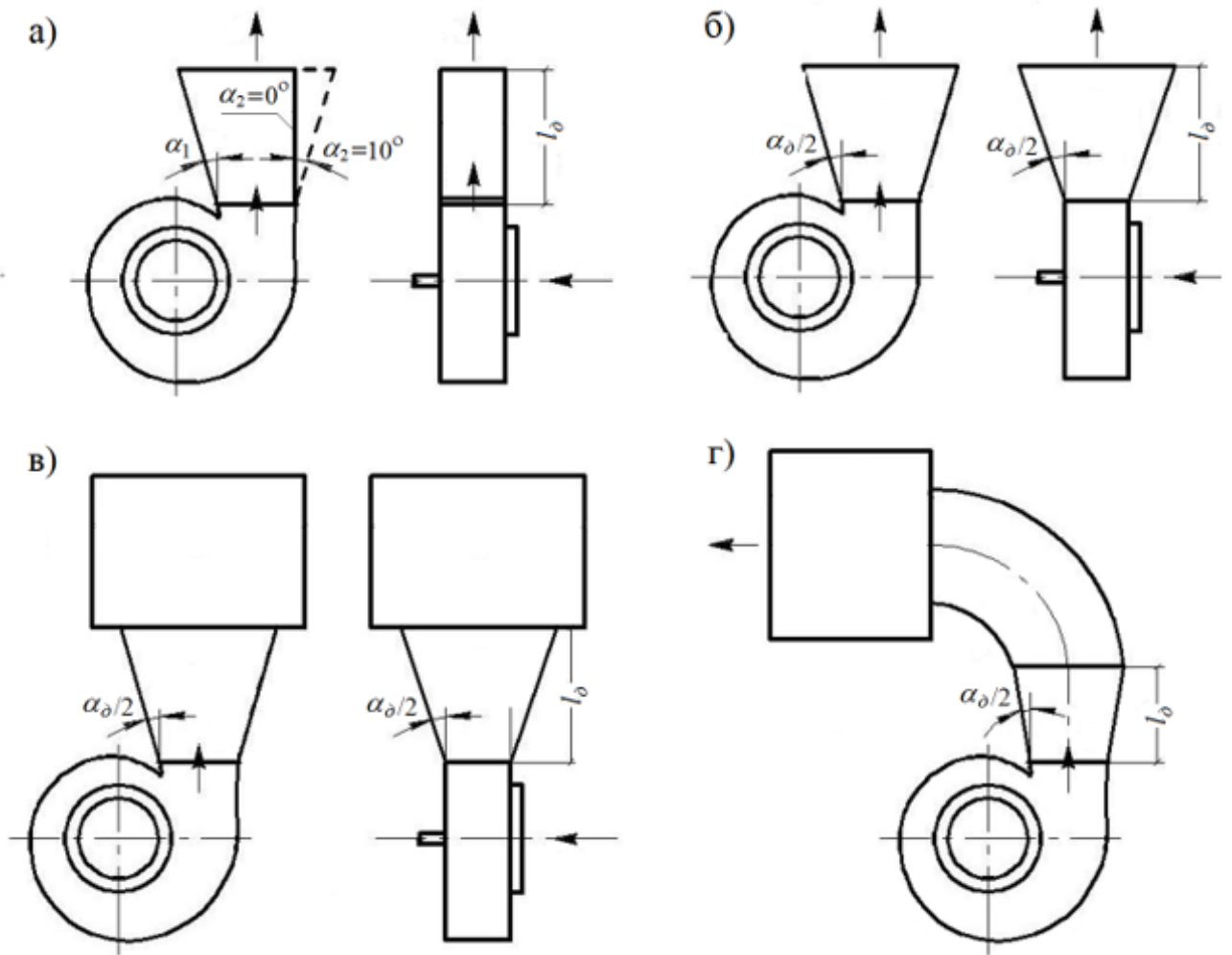
$$\bar{F}_\partial = F_2/F_1, \quad (1.3)$$

$$\bar{l}_\partial = l_\partial/b_0, \quad (1.4)$$

где F_1, F_2 – площади входного и выходного сечений;

b_0 – характерный размер (обычно рассматривают линейный размер выходного патрубка вентилятора);

l_∂ – длина диффузора.



а) плоский несимметричный диффузор; б) пирамидальный диффузор;

в) пирамидально-ступенчатый диффузор;

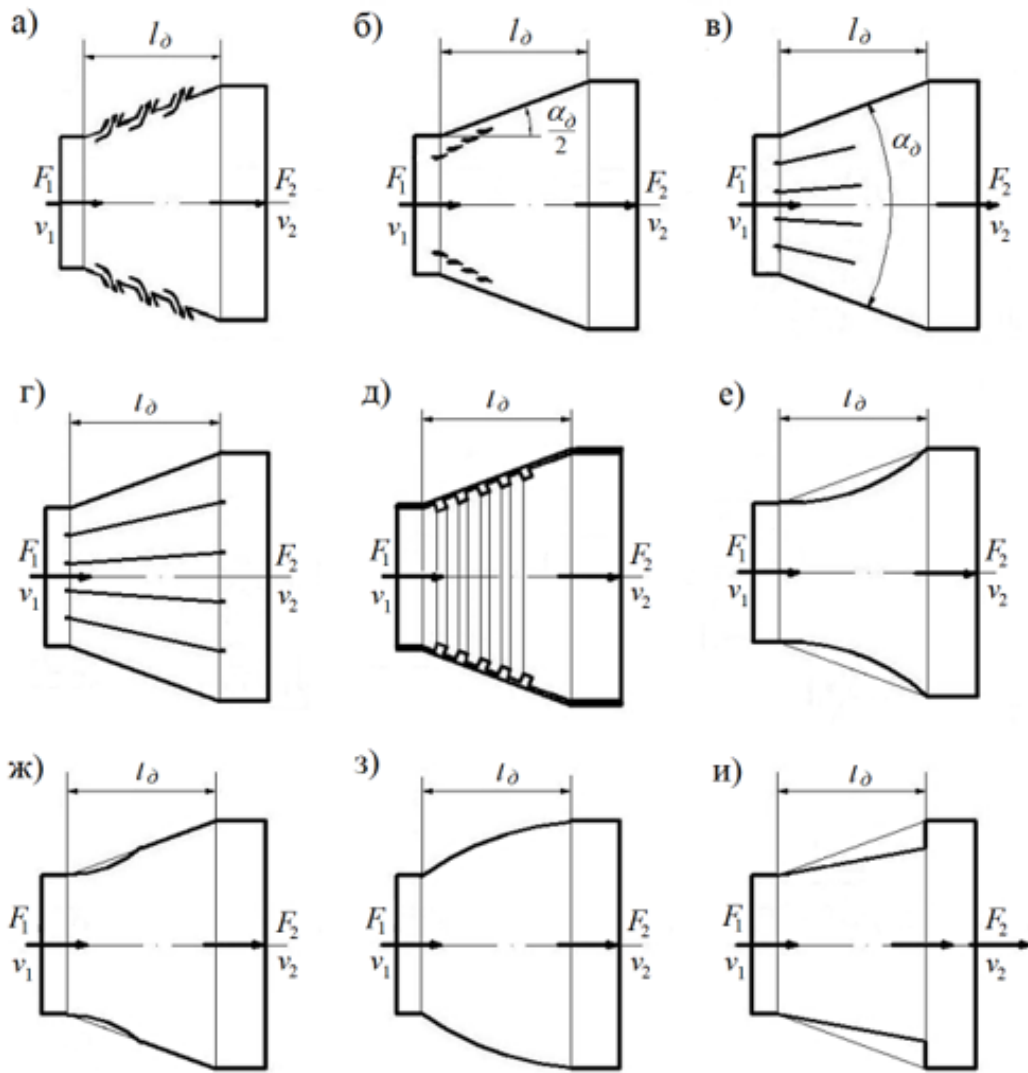
г) пирамидальный диффузор со ступенчатым отводом

Рисунок 1.14 – Диффузоры вентиляционных систем

на выходе радиальных вентиляторов

Основные способы, мероприятия и подходы, которые способствуют улучшению течения в диффузорах, показаны на рисунке 1.15 [22, 38, 39, 95, 96].

Вопросы протекания в изолированных диффузорах разных форм, рекомендации по определению значений коэффициентов местных сопротивлений (коэффициентов потерь давления) приведены в литературе [8, 39]. В тоже время, для диффузоров, которые непосредственно подключены к радиальным вентиляторам, таких рекомендаций нет.



- а) отсос пограничного слоя; б) установка направляющих лопаток (дефлекторов)
 в) установка укороченных разделяющих стенок; г) установка удлиненных
 разделяющих стенок; д) оребрение внутренних поверхностей стенок диффузора
 е) изогradientный криволинейный диффузор; ж) криволинейный диффузор;
 з) предотрывный диффузор; и) ступенчатый диффузор

Рисунок 1.15 – Эффективные диффузоры

Сложность анализа аэродинамических характеристик диффузоров, непосредственно подключенных к выходному патрубку радиального вентилятора, объясняется тем, что в их начальном сечении формируется существенно неравномерное и несимметричное поле скоростей. Это является основной причиной увеличения

потерь давления. Для снижения потерь давления необходимо создать условия безотрывного течения воздушного потока в диффузоре и уменьшить вихреобразование.

Исследования аэродинамических характеристик диффузоров показывают резкое увеличение потерь давления при наличии даже незначительной неравномерности поля скоростей на входе.

Отмеченные особенности течения воздушного потока в диффузорах, установленных после радиального вентилятора, обуславливают важность и сложность задачи совершенствования конструктивных элементов для присоединения вентиляторов к воздуховодам и оборудованию вентиляционных систем. Эффективность выбора рекомендуемых геометрических размеров и параметров размещения может быть оценена величиной повышения производительности вентилятора при различных режимах его работы или величиной потерь давления на конструктивных элементах.

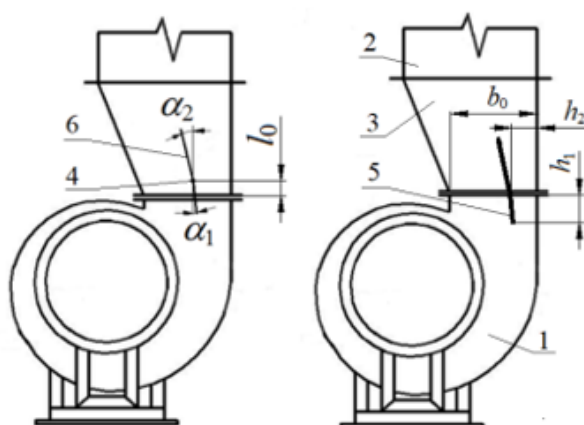
1.3.2 Совершенствование диффузоров с несимметричным расширением на выходе радиальных вентиляторов

При рассмотрении задачи совершенствования конструктивных элементов для присоединения радиальных вентиляторов к воздуховодам и оборудованию вентиляционных систем отметим теоретические и экспериментальные исследования в работах [10, 39], в которых обоснована эффективность установки в несимметричном диффузоре с прямой боковой стенкой выравнивающей пластины, обеспечивающей повышение производительности системы.

В работе Андрийчука В.Н. [10] вентиляционная система имеет составную выравнивающую пластину, что показано на рисунке 1.16. Здесь воздушный поток от радиального вентилятора 1 перетекает в воздуховод 2 через несимметричный диффузор 3. В диффузоре 3 размещена пластина 4, которая выполнена составной из двух частей 5 и 6. Часть 5 составной пластины 4 направлена под углом α_1 , а часть 6 расположена под углом α_2 к вертикальной оси (рисунок 1.16). В данной работе

разработаны рекомендации для основных геометрических размеров составной выравнивающей пластины, а также параметров ее размещения.

В тоже время, для повышения производительности вентиляционных систем путем выравнивания потока на выходе радиальных вентиляторов отсутствуют рекомендации по выбору геометрических размеров и параметров размещения конструктивных элементов в диффузорах с несимметричным расширением, которые имеют разные наклоны боковых стенок. Поэтому необходимо дальнейшее развитие методов выравнивания потока на выходе радиальных вентиляторов, а также разработка рекомендаций по выбору геометрических размеров и параметров размещения конструктивных элементов в диффузорах с несимметричным расширением для зоны рабочих аэродинамических характеристик вентилятора.



1 – радиальный вентилятор; 2 – воздуховод; 3 – несимметричный диффузор;
4 – составная выравнивающая пластина; 5, 6 – составные части пластины

Рисунок 1.16 – Установка составной выравнивающей пластины
в вентиляционную систему

Выводы по первому разделу, цель и задачи исследования

Анализ современных задач, требований и методов разработки систем ОВКВ убедительно показал, что повышение энергетической эффективности ОВС может быть достигнуто разработкой САУ воздушным отоплением, обеспечивающих

улучшения показателей качества регулирования аэротермодинамических характеристик на основе алгоритмов и методов оптимального управления.

Для повышения надежности ОВС, как одно из важных направлений, следует рассматривать использование регулирующих устройств, которые лишены влияния влажности, загрязненности, химической агрессивности рабочей среды, вибраций, резких перепадов температуры. К таким устройствам можно отнести струйные элементы, которые, кроме нечувствительности к перечисленным выше факторам, имеют более высокую надежность и долговечность, а также меньшую материалоемкость, благодаря отсутствию подвижных механических частей.

Обосновано, что важным направлением повышения эффективности ОВС является дальнейшее развитие методов выравнивания потока в элементах соединения воздухопроводов с выходными патрубками радиальных вентиляторов, что обеспечивает повышение производительности вентиляционных систем.

На основании вышеизложенного актуальной научно-практической задачей является повышение эффективности ОВС совершенствованием процессов регулирования аэротермодинамических характеристик, что позволит обеспечить улучшение показателей качества регулирования и снижение эксплуатационных затрат.

Целью работы является повышение эффективности ОВС совершенствованием процессов регулирования аэротермодинамических характеристик, что обеспечивает улучшение показателей качества регулирования и снижение эксплуатационных затрат.

Для достижения поставленной цели сформулированы следующие задачи:

- выполнить анализ современных подходов к проектированию систем ОВКВ, разработке САУ воздушным отоплением и обосновать основные направления исследований для повышения эффективности ОВС;

- предложить математическую модель комбинированной ОВС как объекта автоматического управления температурным режимом в обслуживаемом помещении, обосновать подходы к структурной и параметрической идентификации математических моделей систем ОВКВ и методы определения параметров для выбранной структуры динамической модели;

- исследовать возможность использования струйных регулирующих устройств в САУ воздушным отоплением для повышения эффективности ОВС, предложить критерий энергетической эффективности регулирования аэродинамических характеристик вентиляционных систем;

- теоретически обосновать и экспериментально подтвердить технические решения для повышения производительности вентиляционных систем за счет выравнивания потока в диффузорах с несимметричным расширением, имеющих разные наклоны боковых стенок;

- разработать рекомендации по размещению конструктивных элементов в диффузорах с несимметричным расширением, имеющих разные наклоны боковых стенок, обеспечивающих повышение производительности вентиляционных систем;

- предложить методику оценки возможности эффективного использования байпасного способа регулирования аэродинамических характеристик вентиляционных систем по начальному (максимальному) расходу в системе на основе критерия энергетической эффективности регулирования;

- разработать двухконтурную САУ воздушным отоплением с регуляторами расхода и температуры приточного воздуха, обеспечивающей повышение эффективности ОВС за счет совершенствования процессов регулирования аэротермодинамических характеристик.

РАЗДЕЛ 2
ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
АЭРОТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ ОТОПИТЕЛЬНО-
ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ СИСТЕМ

2.1 Математическое моделирование отопительно-вентиляционных систем

2.1.1 Методологические основы математического моделирования отопительно-вентиляционных систем

Сложности в изучении рабочих процессов в системах ОВКВ привели к использованию ряда искусственных приемов. Выделением так называемых случайных факторов в регулировании аэротермодинамических характеристик (т. е. путем исключения всего случайного) представляет сложный рабочий процесс в виде простых математических закономерностей. Таким образом, абстрагированием от случайного и выделением основных неопределенностей в так называемые начальные условия можно познать основные закономерности протекающих в ОВС процессов. Этот искусственный прием позволяет предложить разнообразные математические модели аэротермодинамических характеристик. Поэтому, главное в исследованиях ОВС заключается не в том, чтобы выделить множество условий, оказывающих влияние на ход рабочего процесса, а в выделении таких условий, которые составляют его основу [11, 46, 74].

Обобщение опыта экспериментальных и теоретических исследований позволяет считать, что существуют три основных уровня познания сути протекающих процессов.

Первый уровень – изучение опытных факторов (событий) при работе ОВС. Экспериментальные исследования в реальных и искусственных условиях (на моделях) позволяют накопить и изучить первичную информацию.

Второй уровень – теоретическое осмысливание и определение закономерностей путем систематизации, обобщения и анализа опытных данных, полученных при экспериментальных исследованиях. Здесь основное направление исследований связано, как правило, с установлением корреляции между событиями (факторами), влияющими на результаты тепломассопереноса. Отметим, что корреляции между различными причинами (которые можно прогнозировать решением определенных уравнений) остаются неизменными независимо от того, где и как протекает рабочий процесс в системах ОВКВ.

Третий уровень – получение принципов инвариантности, которые могут быть выведены из основных законов процесса тепломассопереноса. Поясним это следующим примером. Если бы мы знали «мгновенное» значение расхода и напора в любой момент времени, т. е. зависимость расход – время (напор – время), то любой закон аэродинамики не мог бы представить нам ничего нового относительно процесса тепломассопереноса. Другими словами, если закон распределения расхода по ветвям вентиляционной системы известен, то значение различных тонких (второстепенных факторов) свойств уравнений (описывающих этот закон) ничего не добавляет к их физическому содержанию. Изменение расхода в общем случае осуществляется как в пространстве (т. е. объеме объекта регулирования), так и во времени. Это означает, что корреляции между расходами в отдельных ветвях (событиями) всегда и всюду одинаковы. Следовательно, закон тепломассопереноса есть, по существу, концентрированное выражение корреляций. Очевидно, что корреляции не зависят от того, когда и где они установлены: в противном случае мы вообще не могли бы находить физические законы. Как уже отмечалось выше, понятие инвариантности (неизменности) процесса вентиляции может иметь смысл лишь при отнесении указанного понятия, например, к бесконечно длительному времени протекания этого процесса.

Наиболее полная информация о рабочем процессе ОВС соответствует третьему уровню, когда обоснован инвариантный характер процесса.

ОВС можно представить некоторым объектом, имеющим ряд входных величин (входов), которыми определяется воздействие окружающей среды или других

систем, и ряд выходных величин (выходов), по которым производится наблюдение за системой или, которыми характеризуется воздействие данной системы на окружающую среду (другие системы) [30, 36, 62].

Явления и процессы в различных системах можно рассматривать с единых позиций теории систем, сложившейся в результате объединения и развития методов теории автоматического регулирования и управления. Теория систем предусматривает прежде всего формализацию физических явлений и процессов с целью их математического описания и последующего изучения как отдельных элементов, так и всей системы [16, 48, 49]. При таком подходе системами можно считать не только сложные соединения объектов, аппаратов и механизмов, но и отдельные устройства, составленные из несложных по принципу действия и конструкции элементов. Примерами систем служат, в том числе, и системы ОВКВ. Математическое описание рабочих процессов в определяемых таким образом ОВС складывается из описаний процессов тепломассопереноса в обслуживаемых помещениях, аэротермодинамических характеристик объектов, аппаратов и устройств, взаимодействия рабочей среды (газа) с устройствами, входящими в систему, взаимодействия этих устройств с окружающей средой и другими устройствами, которые по каким-либо причинам не были включены в данную систему [35, 78].

Для исследования взаимодействия системы с окружающей средой или с другими системами выполняют математическое описание тех процессов, которые оказывают наибольшее влияние на выходные для данной системы величины. В таких случаях можно более упрощенно рассматривать внутренние процессы, связанные с течениями в воздуховодах вентиляционной системы или с взаимодействием отдельных элементов с рабочей средой.

Составление адекватной математической модели ОВС, т. е. модели, обеспечивающей наиболее полное соответствие теоретических процессов реальным, требует глубокого проникновения в сущность физических явлений, от которых зависят изучаемые процессы. При этом очень важно избегать неоправданного усложнения модели из-за загромождения ее учетом второстепенных факторов, не оказывающих заметного влияния на результаты решаемой задачи. Правильному выбору

модели может помочь, прежде всего, предварительная оценка порядка членов в уравнениях, описывающих отдельные стороны изучаемого процесса. Возможна также оценка применимости моделей по заданной точности расчета.

Проверка адекватности модели обычно требует сравнения рассчитанных по этой модели процессов либо с процессами, полученными при испытаниях реальной системы, либо с процессами, рассчитанными по более точной модели, учитывающей те факторы, возможность пренебрежения которыми не была очевидной при составлении проверяемой модели.

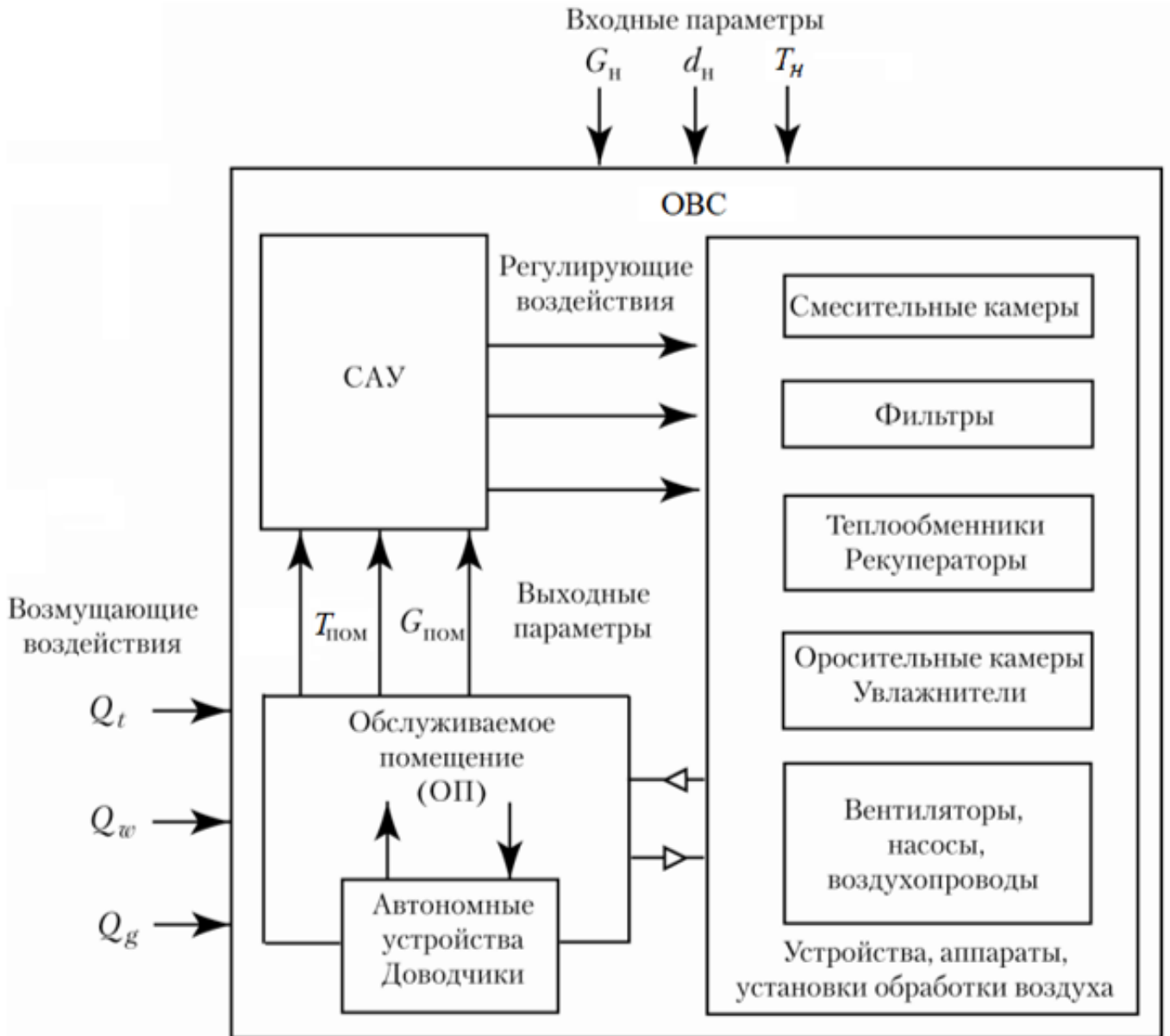
Математические модели процессов, протекающих в вентиляционных системах, в наиболее общем виде представляют собой системы нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных. Расчеты и исследования процессов по таким моделям часто очень сложны, несмотря на применение компьютерной техники. Математические модели можно существенно упростить переходом от описания пространственного течения рабочей среды к описанию квазиодномерного течения. Кроме того, ограничиваясь рассмотрением малых отклонений переменных величин от значений, характеризующих какой-либо режим системы, в ряде случаев удастся линеаризовать уравнения и получить более простую линейную математическую модель системы [15, 48, 49].

Линейные модели систем интересны для исследования тем, что позволяют обнаружить и в хорошо обозримом виде представить характерные особенности изучаемого процесса, например, определить оптимальные условия для любого сочетания параметров системы. Однако линейные модели систем могут быть, адекватными только при соблюдении ограничений, при которых они были получены.

Удобство использования линейных математических моделей также обусловлено возможностью описания элементов и устройств системы в виде типовых динамических звеньев, для которых имеется наработанный аппарат для исследования их временных и частотных характеристик, анализа устойчивости и качества регулирования, применения методов коррекции.

В реальности системы ОВКВ и, частности, ОВС как объекты автоматического управления очень сложные. Поэтому при определении передаточных

функций для всей системы в целом (рисунок 2.1) предварительно устанавливают для отдельных функциональных устройств и элементов ОВС применением передаточных функций типовых динамических звеньев.



T_n, d_n, G_n – температура, влажность, расход наружного воздуха;

$T_{пом}, d_{пом}, G_{пом}$ – температура, влажность, расход воздуха в помещении;

Q_t, Q_w, Q_g – тепловая, влажностная и газовые нагрузки

Рисунок 2.1 – Обобщенная структурная схема ОВС

как объекта управления

Определение передаточной функции всей ОВС как объекта автоматического управления осуществляется по правилам структурных преобразований для различных видов соединения звеньев, размещения узлов и сумматоров.

2.1.2 Математическая модель комбинированной отопительно-вентиляционной системы как объекта автоматического управления

Комбинированная ОВС на основе приточной вентиляционной системы VAV показана на рисунке 2.2. В системе имеется возможность дополнительного регулирования температуры воздуха.

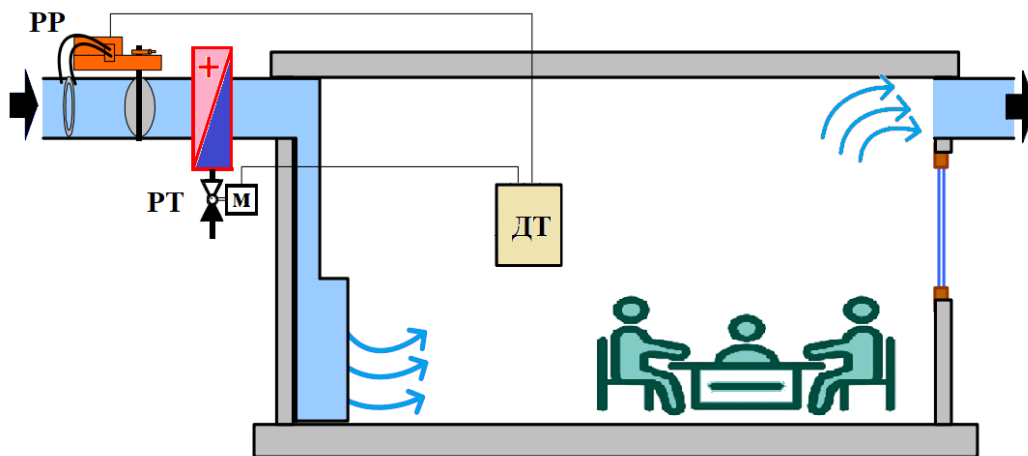


Рисунок 2.2 – Комбинированная ОВС

Согласно рисунку 2.2 приточный воздух поступает от центральной вентиляционной установки при его постоянной температуре. Регулирование расхода приточного воздуха осуществляется терминалом VAV, который обозначен как PP (регулятор расхода). Изменение температуры воздуха происходит в теплообменном аппарате при помощи регулятора температуры РТ. Заданный температурный режим в значимой (рабочей) зоне обслуживаемого помещения контролируется датчиком температуры ДТ и обеспечивается как регулированием расхода приточного воздуха, так и его температуры.

Рабочие процессы в комбинированной ОВС отражены функциональной схемой на рисунке 2.3. Здесь ОВС рассматривается как двухконтурная САУ воздушным отоплением. Входным сигналом является заданная температура (закон изменения ее во времени t) в значимой (рабочей) зоне обслуживаемого помещения $T_s(t)$.

По расхождению $\varepsilon(t)$ заданной температуры $T_s(t)$ и температуры в значимой (рабочей) зоне $T(t)$

$$\varepsilon(t) = T_s(t) - T(t) \quad (2.1)$$

регулятор расхода РР формирует закон изменения массового расхода воздуха $G(t)$ постоянной температуры, поступающего от центральной приточной вентиляционной системы. Далее в теплообменном аппарате регулятор температуры РТ изменяет температуру приточного воздуха $T_h(t)$, который поступает в обслуживаемое помещение (рисунок 2.3). В дальнейшем температуру в значимой (рабочей) точке $T(t)$ будем называть температурой в помещении.

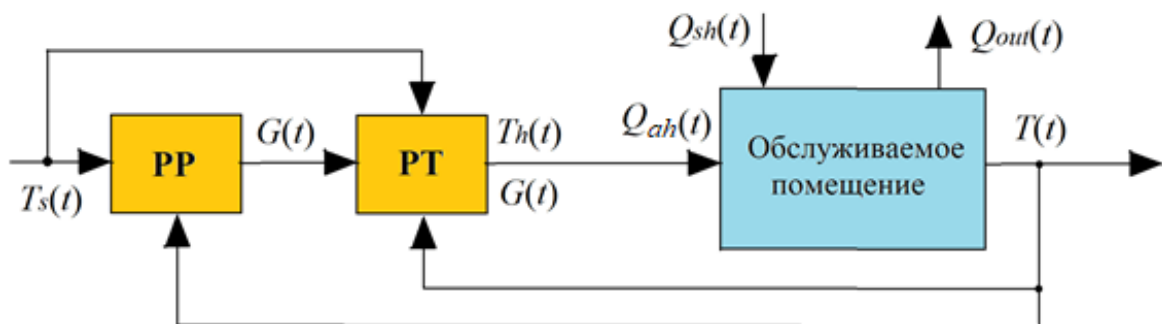


Рисунок 2.3 – Функциональная схема

Приближенно считаем, что расход приточного воздуха равен расходу удаляемого воздуха. Тогда теплоступление от вентиляционной системы Q_{ah} в обслуживаемое помещение будет определяться разницей температуры приточного воздуха $T_h(t)$ и температуры в помещении $T(t)$

$$Q_{ah}(t) = cG(t)[T_h(t) - T(t)], \quad (2.2)$$

где c – теплоемкость воздуха.

Теплопоступления в обслуживаемое помещение также могут быть и от других источников, которые будем называть дополнительными теплоизбытками $Q_{sh}(t)$. Они не связаны с приточной вентиляционной системой, а поступают от людей, оборудования, освещения, солнечной радиации и т.п. Тогда общие теплопоступления $Q_{in}(t)$ определим выражением

$$Q_{in}(t) = Q_{ah}(t) + Q_{sh}(t). \quad (2.3)$$

Теплопотери на рисунке 2.3 обозначены как $Q_{out}(t)$. Суммарные теплоизбытки $\Delta Q(t)$ (теплодифицит при отрицательном знаке) составят

$$\Delta Q(t) = Q_{in}(t) - Q_{out}(t). \quad (2.4)$$

В относительно длительном промежутке времени ОВС может находиться в состоянии при ее практически постоянных параметрах. Такому условно стационарному режиму соответствуют значения массового расхода приточного воздуха G_0 , его температуры T_h^0 , температуры в помещении T_0 и наружного воздуха T_{out}^0 , а теплопоступления Q_{in}^0 равны теплопотерям Q_{out}^0 . Обозначим

$$Q_{in}^0 = Q_{out}^0 = Q_0. \quad (2.5)$$

Теплопоступления при стационарном режиме складываются из стационарных значений теплопоступлений от приточной вентиляционной системы Q_{ah}^0 и дополнительных теплоизбытков Q_{sh}^0

$$Q_{in}^0 = Q_{ah}^0 + Q_{sh}^0. \quad (2.6)$$

Изменение во времени теплоизбытков $\Delta Q(t)$ с учетом (2.5) определим как разницу между изменением теплопоступлений $\Delta Q_{in}(t)$ и теплопотерь $\Delta Q_{out}(t)$

$$\Delta Q(t) = \Delta Q_{in}(t) - \Delta Q_{out}(t). \quad (2.7)$$

Теплоизбытки $\Delta Q(t)$ приводят к изменению температуры в помещении $\Delta T(t)$

$$\Delta T(t) \sim \Delta Q(t). \quad (2.8)$$

Рассматривая обслуживаемое помещение как объект управления, свяжем безразмерные отклонения переменных, преобразованные по Лапласу [49, 94], через передаточные функции

$$T(s) = W_{TQ}(s) [Q_{in}(s) - Q_{out}(s)] \quad (2.9)$$

или с учетом (2.3)

$$T(s) = W_{TQ}(s) [k_{ah} Q_{ah}(s) + k_{sh} Q_{sh}(s) - Q_{out}(s)], \quad (2.10)$$

где s – переменная Лапласа;

$T(s)$ – преобразование по Лапласу безразмерного отклонения температуры в помещении от стационарного значения T_0 (отклонение делится на разницу стационарных значений температур в помещении T_0 и наружного воздуха T_{out}^0)

$$\Delta \bar{T}(t) = \Delta T(t) / (T_0 - T_{out}^0); \quad (2.11)$$

$Q_{in}(s)$, $Q_G(s)$, $Q_{sh}(s)$ – преобразование по Лапласу безразмерных отклонений суммарных теплопоступлений, теплопоступлений от приточной вентиляционной системы и дополнительных теплоизбытков от своих стационарных значений

$$\Delta \bar{Q}_{in}(t) = \Delta Q_{in}(t) / Q_0; \quad (2.12)$$

$$\Delta \bar{Q}_G(t) = \Delta Q_{ah}(t) / Q_{ah}^0; \quad (2.13)$$

$$\Delta \bar{Q}_{sh}(t) = \Delta Q_{sh}(t) / Q_{sh}^0. \quad (2.14)$$

В уравнение (2.10) $W_{TQ}(s)$ – передаточная функция для температуры в помещении по суммарному тепловому потоку, а $Q_{out}(s)$ – преобразование по Лапласу безразмерного отклонения теплопотерь от стационарного значения Q_0

$$\Delta \bar{Q}_{out}(t) = \Delta Q_{out}(t) / Q_0; \quad (2.15)$$

В силу (2.5) и (2.6) имеем

$$k_{ah} = \frac{Q_{ah}^0}{Q_0}; \quad k_{sh} = \frac{Q_{sh}^0}{Q_0}; \quad k_{ah} + k_{sh} = 1. \quad (2.16)$$

Коэффициенты k_{ah} и k_{sh} показывают долю тепlopоступлений соответственно от приточной вентиляционной системы и дополнительных теплоизбытков в теплоснабжении обслуживаемого помещения для стационарного режима работы.

По уравнению (2.10) сформируем фрагмент структурной схемы ОВС, представленный на рисунке 2.4.

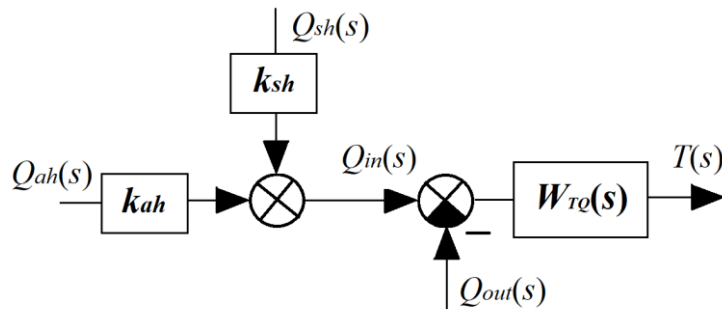


Рисунок 2.4 – Элементы структурной схемы

Выполним линеаризацию зависимости (2.2) для тепlopоступлений от вентиляционной системы. Разложение в ряд Тейлора для отклонений переменных имеет вид

$$\begin{aligned} \Delta Q_{ah}(t) &= \left. \frac{\partial Q_{ah}}{\partial G} \right|_0 \Delta G(t) + \left. \frac{\partial Q_{ah}}{\partial (T_h - T)} \right|_0 [\Delta T_h(t) - \Delta T(t)] = \\ &= c(T_h^0 - T_0) \Delta G(t) + cG_0 [\Delta T_h(t) - \Delta T(t)]. \end{aligned} \quad (2.17)$$

Индекс «0» при производных в выражении (2.17) означает вычисление их для значений параметров в стационарном режиме работы ОВС. Записав уравнение (2.17) для безразмерных отклонений переменных (2.11), (2.13)

$$\Delta \bar{G}(t) = \Delta G(t)/G_0; \quad (2.18)$$

$$\Delta \bar{T}_h(t) = \Delta T_h(t)/(T_h^0 - T_0), \quad (2.19)$$

выполним для них преобразование по Лапласу, после чего получим уравнение для теплоступлений от вентиляционной системы

$$Q_{ah}(s) = \frac{cG_0(T_h^0 - T_0)}{Q_{ah}^0} G(s) + \frac{cG_0(T_h^0 - T_0)}{Q_{ah}^0} T_h(s) - \frac{cG_0 T_0}{Q_{ah}^0} T(s). \quad (2.20)$$

Нетрудно заметить, что

$$cG_0(T_h^0 - T_0) = Q_{ah}^0, \quad (2.21)$$

поэтому выражение (2.20) можно привести к виду

$$Q_G(s) = G(s) + T_h(s) - k_T T(s), \quad (2.22)$$

где

$$k_T = \frac{T_0 - T_{out}^0}{T_h^0 - T_0}. \quad (2.23)$$

Изменение теплотерь во времени $Q_{out}(t)$ носит весьма сложный характер [69, 92], с некоторым приближением можно считать, что теплотери зависят от разности температуры в помещении $T(t)$ и наружной температуры $T_{out}(t)$. Эту зависимость для безразмерных отклонений переменных, преобразованных по Лапласу, представим в следующем виде

$$Q_{out}(s) = W_{QT}(s)[T(s) - T_{out}(s)], \quad (2.24)$$

где $T_{out}(s)$ – преобразование по Лапласу безразмерного отклонения температуры наружного воздуха от стационарного значения T_{out}^0

$$\Delta \bar{T}_{out}(t) = \Delta T_{out}(t) / (T_0 - T_{out}^0); \quad (2.25)$$

$W_{QT}(s)$ – передаточная функция для теплопотерь по разнице температур в помещении и снаружи.

Подстановка (2.22) и (2.24) в (2.10) дает следующее выражение

$$T(s) = W_{TQ}(s) \left\{ \left[k_{ah} [G(s) + T_h(s) - k_T T(s)] + k_{sh} Q_{sh}(s) - W_{QT}(s) [T(s) - T_{out}(s)] \right] \right\}. \quad (2.26)$$

После преобразований имеем

$$T(s) \left[1 + k_{ah} k_T W_{TQ}(s) + W_{TQ}(s) W_{QT}(s) \right] = W_{TQ}(s) \left\{ k_{ah} [G(s) + T_h(s)] + k_{sh} Q_{sh}(s) + W_{QT}(s) T_{out}(s) \right\}. \quad (2.27)$$

Далее приводим (2.27) к виду

$$T(s) = W_0(s) \left\{ k_{ah} [G(s) + T_h(s)] + k_{sh} Q_{sh}(s) \right\} + W_{out} T_{out}(s), \quad (2.28)$$

где $W_0(s)$ – передаточная функция для температуры в помещении по общим теплопоступлениям (теплопоступлениям от приточной системы и теплоизбыткам)

$$W_0(s) = \frac{W_{TQ}(s)}{1 + k_{ah} k_T W_{TQ}(s) + W_{TQ}(s) W_{QT}(s)}; \quad (2.29)$$

$W_{out}(s)$ – передаточная функция для температуры в помещении по температуре наружного воздуха

$$W_{out}(s) = \frac{W_{QT}(s)}{1 + k_{ah}k_T W_{TQ}(s) + W_{TQ}(s)W_{QT}(s)}; \quad (2.30)$$

Отметим, что передаточные функции $W_0(s)$ и $W_{out}(s)$ устанавливаются либо приближенно на основе аналитических подходов, либо с использованием методов параметрической идентификации [16, 17]. Вопросы идентификации математических моделей ОВС будут рассмотрены ниже.

На основе рисунка 2.3 и уравнения (2.28) получаем структурную схему комбинированной ОВС как объекта автоматического управления, приведенную на рисунке 2.5.

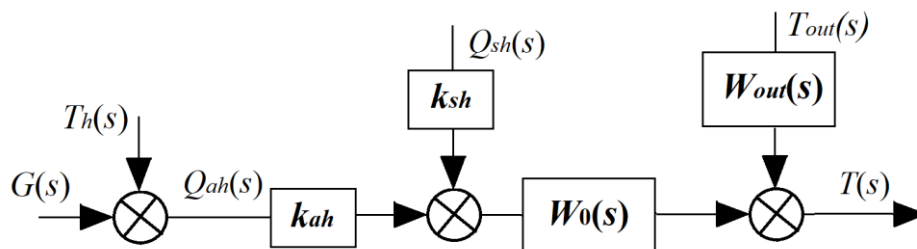


Рисунок 2.5 – Структурная схема комбинированной ОВС как объекта автоматического управления

Согласно положениям теории автоматического управления [15, 48] построение структурной схемы является конечной целью математического описания системы.

Некоторые передаточные функции, в частности (2.29), (2.30), в силу сложности математического описания не представляется возможным получить аналитическим путем. Поэтому для дальнейших исследований необходимо обосновать подходов к идентификации математических моделей ОВС.

2.1.3 Идентификация математических моделей отопительно-вентиляционных систем

Рабочие процессы в ОВС подчиняются сложным физическим законам и описываются математическими моделями с распределенными параметрами в виде дифференциальных уравнений в частных производных [1, 12, 25].

Для идентификации математических моделей важно понимать причинные отношения процессов тепломассопереноса в системах ОВКВ и рабочих процессов входящих аппаратов и устройств. При исследовании систем ОВКВ очень редко приходится сталкиваться со всеми имеющими значение причинами. Обычно рассматривают лишь некоторые из существующих причин, определяющих процесс тепломассопереноса. Однако, если не известны все существенные причины, это не означает, что нельзя осуществлять прогнозы вообще, так как предсказания аэротермодинамических характеристик систем ОВКВ можно выполнять приближенно (внутри определенных пределов, области). Следовательно, такого рода предсказания всегда содержат ошибку, которая может меняться в зависимости от условий решения задачи.

Различают вполне определенные виды формализованных моделей причинных отношений, имеющих следующие условные названия: одно-однозначные, много-однозначные, одно-многозначные, много-многозначные. Примером одно-однозначного причинного отношения является объект, процесс тепломассопереноса в котором происходит под влиянием многочисленных внешних воздействий, но при условии учета лишь одного (основного) воздействия. Таким основным воздействием может служить, например, температура окружающей среды. Много-однозначное причинное отношение является наиболее общим, к нему прибегает большинство исследователей, занимающихся разработкой математических моделей. Обычно на процесс вентиляции оказывает воздействие большое число внешних факторов, например температура окружающей среды, влажность и т.д. Под воздействием этой гаммы факторов возникают определенные изменения характеристик нагнетателей, воздухопроницаемости стенок и т.п. Примером одно-многозначного

причинного отношения является случай, когда на входе принимается во внимание лишь одно, наиболее существенное воздействие, а на выходе учитываются многочисленные последствия этого возмущения. Наконец, много-многозначное причинное отношение является комбинацией много-однозначного и одно-многозначного отношений, так как вытекает именно из этих двух закономерностей.

Можно считать, что одно-однозначное причинное отношение является простейшим. Однако в общих рамках других причинных отношений одно-однозначное отношение является определенной идеализацией, которая никогда полностью не осуществляется. При некоторых ограниченных условиях протекания вентиляционного процесса эта его идеализация может настолько приближаться к действительности, что мы вполне реально можем рассматривать причинное отношение как одно-однозначное.

Причинные отношения являются очень важной характеристикой систем ОВКВ. Они позволяют рассматривать проблему прогнозирования параметров протекающих в них рабочих процессов с некоторой степенью приближения, избавляясь (в отдельных случаях) от необходимости изучать бесконечное множество факторов, требующихся для реально неосуществимого абсолютно точного предсказания конечных результатов. Причинные отношения помогают нам осуществлять шаг за шагом характерную научную процедуру изучения проблемы теплопереноса (в разных условиях), причем каждый шаг закладывает основание для более глубокого, более детального и широкого изучения, ведущего к следующему шагу познания.

Необходимо также иметь в виду то, что не существует какого-либо действительного рабочего процесса в системах ОВКВ, известного нам как совокупность совершенных однозначных причинных отношений. Поэтому нельзя делать прогнозы в системах ОВКВ с неограниченной точностью, без необходимости качественного учета новых групп причинных факторов, существующих в природе данного явления.

Определенная схематичность и, очевидно, недостаточная полнота принципиальных схем моделей отношений объясняются отсутствием обратных связей,

опущенных нами в целях упрощения этих схем. В действительности же вследствие наличия обратных связей возникают дополнительные, порой непреодолимые сложности точного представления формализованных моделей с обратными связями. Следует отметить, что, как показали исследования, даже в простейшей модели причинных отношений (одно-однозначной) имеется не одна, а по крайней мере, две взаимодействующие обратные связи. Во всех же остальных моделях следует говорить о гамме обратных связей, ибо развитые входы и выходы этих моделей (с большим числом входных воздействий и сложной системой переменных на выходе) вызывают процесс образования дополнительных обратных связей.

В вышесказанном можно убедиться, анализируя функциональную схему обслуживаемого помещения системы ОВКВ, показанной на рисунке 2.6.

На рисунке 2.6 отмечены входные (управляющие) параметры: температура приточного воздуха $T_{пр}$, его влажность $d_{пр}$ и подаваемый массовый расход $G_{пр}$; и регулируемые: температура в обслуживаемом помещении $T_{пом}$, влажность воздуха $d_{пом}$ и концентрация газовых примесей $C_{пом}$. Возмущающие воздействия на систему: тепловая нагрузка Q_n , влажностная нагрузка W_n и аэродинамическая G_n . Внутренние воздействия: тепловая мощность $Q_{пом}$, влажностная нагрузка в помещении $W_{пом}$ и аэродинамическая (включая выделения вредных примесей) $G_{пом}$.

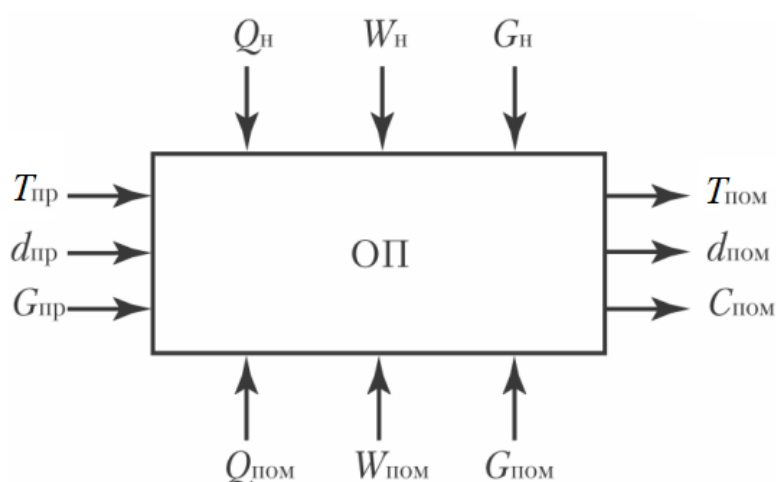


Рисунок 2.6 – Функциональная схема обслуживаемого помещения системы ОВКВ

В системе ОВКВ для стабилизации двух независимых переменных, соответствующих заданному состоянию воздуха, в общем случае можно использовать три управляющих (входных) воздействия с учетом накладываемых ограничений.

В п. 2.1.1 отмечено, что удобство использования линейных математических моделей также обусловлено возможностью описания элементов и устройств системы в виде типовых динамических звеньев, для которых имеется наработанный аппарат для исследования их временных и частотных характеристик, анализа устойчивости и качества регулирования, применения методов коррекции. Отметим, что аппарат теории автоматического управления использует прямое преобразование Лапласа для оригинала произвольной функции $f(t)$

$$F(s) = L[f(t)] = \int_0^{\infty} f(t)e^{-st} dt \quad (2.31)$$

и обратное преобразование Лапласа для ее изображения $F(s)$

$$f(t) = L^{-1}[F(s)] = \frac{1}{2\pi j} \int_{\sigma-j\infty}^{\sigma+j\infty} F(s)e^{st} dt, \quad (2.32)$$

где s – переменная Лапласа;

$$j = \sqrt{-1}, \quad \sigma = \text{const.}$$

Рассматривая системы ОВКВ как объект управления, в общем случае в качестве управляющего сигнала следует рассматривать изменение тепловой мощности [25, 64], в частных случаях этим параметром может быть температура теплоносителя или его расход, температура или расход приточного воздуха для ОВС и т.п. Обычно в качестве регулируемой переменной рассматривается температура в значимой (рабочей) зоне обслуживаемого помещения [2, 63], величина которой будет выходным параметром модели.

Вместе с тем, несмотря на сложность математического описания рабочих процессов в ОВС, они имеют общие черты [81, 83, 92]. Данные системы

инерционны и являются объектами с саморегулированием, т.е. регулируемая переменная стабилизируется на некотором значении. Переходные процессы в ОВС имеют не колебательный вид и характерное запаздывание. В этой связи наиболее рациональным будет построение математических моделей ОВС как объектов автоматического управления путем их идентификации по экспериментальным данным в виде апериодических звеньев первого и второго порядков с запаздыванием

$$W_1(s) = \frac{ke^{-\tau s}}{T_0s + 1}; \quad (2.33)$$

$$W_2(s) = \frac{ke^{-\tau s}}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)}, \quad (2.34)$$

где k – коэффициент передачи;

T_0, T_1, T_2 – постоянные времени;

τ – время запаздывания.

Переходные характеристики динамических звеньев (2.33) и (2.34) описываются соответственно уравнениями [15, 48]

$$h(t) = \begin{cases} 0, & t \leq \tau; \\ k \left(1 - e^{-\frac{t-\tau}{T_0}} \right), & t > \tau; \end{cases} \quad (2.35)$$

$$h(t) = \begin{cases} 0, & t \leq \tau; \\ k \left(1 - \frac{T_1}{T_1 - T_2} e^{-\frac{t-\tau}{T_1}} - \frac{T_2}{T_2 - T_1} e^{-\frac{t-\tau}{T_2}} \right), & t > \tau. \end{cases} \quad (2.36)$$

При наличии аналитических выражений для переходных функций (2.35) и (2.36) задача параметрической идентификации сводится к задаче оптимизации по критерию минимума суммы квадратичных отклонений расчетных и экспериментальных значений выходной переменной объекта управления. Для автоматизации процедуры оптимизации удобно воспользоваться встроенной функцией *fminsearch* в пакете прикладных программ MATLAB.

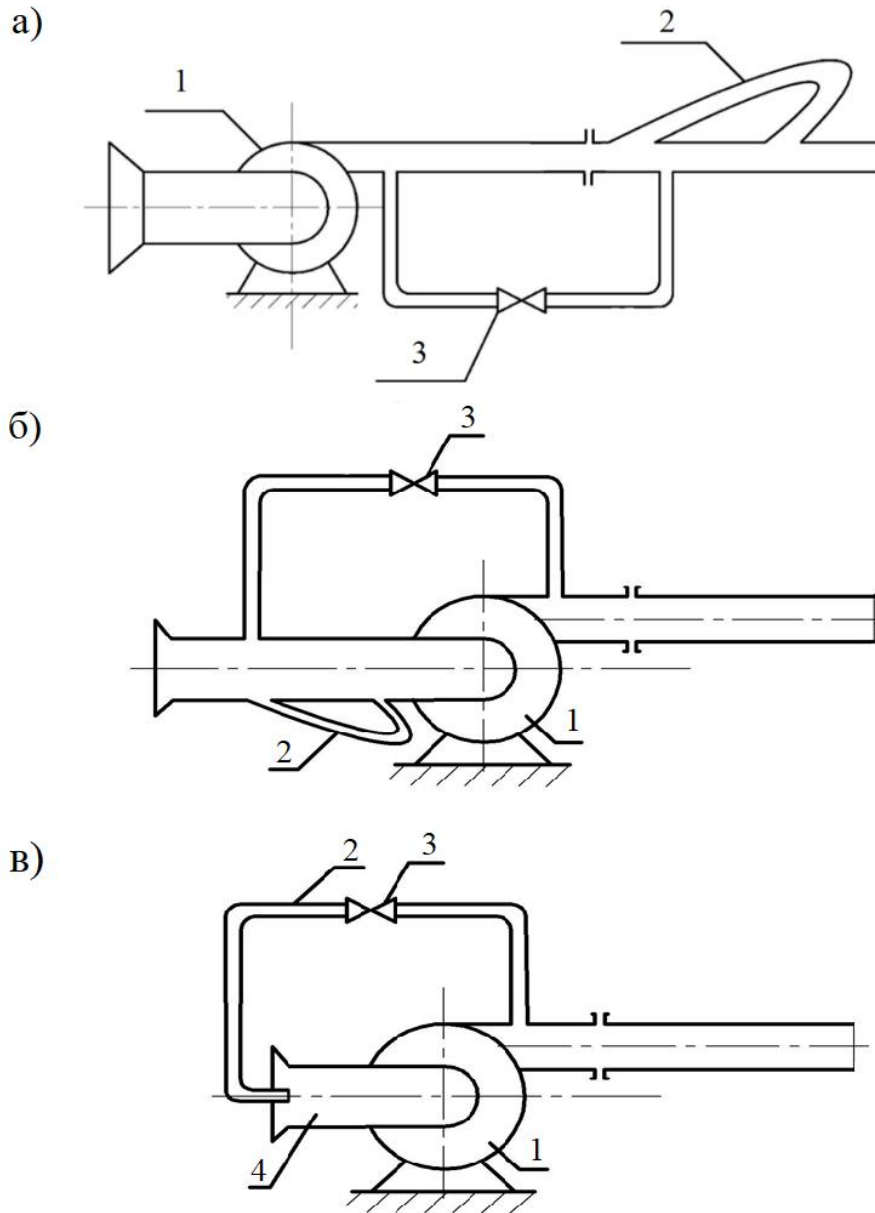
2.2 Вентиляционные системы со струйными регулирующими устройствами

2.2.1 Типовые схемы вентиляционных систем со струйными регулирующими устройствами

Как отмечалось в первом разделе (см. п. 1.2.4) наличие в конструкции регулирующих устройств подвижных механических частей усложняет их обслуживание и ремонт, а также снижает надежность работы и долговечность. Многие устройства не обеспечивают возможность плавного изменения производительности вентилятора от максимального значения до необходимого значения, а также не являются такими, чтобы уменьшение расхода воздуха в системе происходило при уменьшении потребляемой вентилятором мощности. Ряд из перечисленных недостатков предложено устранять использованием для регулирования вентиляционных систем струйных элементов, которые не имеют подвижных частей и элементов. Такие регулирующие устройства лишены влияния влажности, загрязненности, химической агрессивности рабочей среды, вибраций, резких перепадов температуры. Благодаря отсутствию подвижных механических частей устройства имеют меньшие габариты и материалоемкость.

Типовые схемы установки струйных регулирующих устройств в вентиляционных системах показаны на рисунке 2.7.

Схема вентиляционной системы со струйным регулирующим устройством на выходе вентилятора представлена на рисунке 2.7, а. На рисунке обозначены: вентилятор 1, струйное регулирующее устройство 2, дроссель 3. Здесь поток в канале управления перенаправляет часть основного потока в боковой канал. Регулирование расхода в системе происходит путем создания в боковом канале струи, направленной под углом к основному потоку, что приводит к изменению сопротивления струйного регулирующего устройства. Если поток управления не подается, то сопротивления основному потоку практически не оказывается.



- а) установка струйного регулирующего устройства на выходе;
 б) установка струйного регулирующего устройства на входе;
 в) вентиляционная система с эжектором на входе

Рисунок 2.7 – Типовые схемы вентиляционных систем со струйными регулирующими устройствами

Схема включения струйного регулирующего устройства во всасывающей линии вентилятора показана на рисунке 2.7, б. Здесь обозначены: вентилятор 1, струйное регулирующее устройство 2, дроссель 3. Для настройки потока управления

используется дроссель 3. Изменение расхода воздуха в вентиляционной системе осуществляется регулировкой его проходного сечения, что, как и для вышерассмотренной схемы, приводит к изменению аэродинамического сопротивления струйного регулирующего устройства. За счет байпасного подвода воздуха для управления струйным устройством может повышаться энергетическая эффективность регулирования и всей вентиляционной системы в целом. Критерий энергетической эффективности байпасного способа регулирования аэродинамических характеристик будет рассмотрен ниже.

В рассмотренной схеме вентиляционной системы можно на входе вентилятора установить струйный элемент другого типа – эжекционное устройство (рисунок 2.7, в). На рисунке обозначены: вентилятор 1, обводной канал 2, дроссель 3, эжектор 4. Это позволит создать большее разрежение во всасывающем воздуховоде вентиляторной установки, тем самым, увеличив полное давление вентилятора, следовательно, и его мощность. Таким образом, имеет место повышение экономичности процесса регулирования аэродинамических характеристик вентиляционной системы.

Следует отметить, что использование струйного регулирующего органа, установленного согласно рисункам 2.7, б и 2.7, в, достаточно просто позволяет реализовать рециркуляцию в системе воздушного отопления. Здесь расходом рециркуляционного воздуха можно управлять от датчика температуры через усилитель и исполнительный механизм, который перенастраивает дроссель струйного регулирующего устройства. Изменение температуры в помещении приводит к изменению расхода струи и, как следствие, тепловой мощности основного потока, что обеспечивает стабилизацию заданной температуры в помещении. Снизить потери энергии воздушного потока, проходящего по каналу рециркуляции, позволяет установка эжектора на входе в вентилятор. Тогда поток рециркуляции будет активным воздушным потоком, часть энергии которого идет на создание расхода во всасывающей линии вентилятора.

Для анализа рабочих процессов в струйных регулирующих устройствах, а также процессов в вентиляционных системах их использующих, необходим

математический аппарат для описания аэродинамических характеристик струйных элементов. Наиболее проработанной в настоящее время является математическая модель струйного управляемого сопротивления (рисунок 2.8), представленная в работах Гусенцовой Я.А. и Андрийчука К.Н. [13, 27], которую примем за основу для использования в дальнейших исследованиях.

Математическая модель аэродинамических характеристик струйного управляемого сопротивления построена на его принципе действия, который заключается в следующем. Без сигнала управления (массовый расход m_3 на рисунке 2.8) потери давления между сечениями 1-1 и 3-3 незначительны и обусловлены трением о стенки. При подаче сигнала управления (открытие дросселя $ДР$) появляется массовый расход m_2 , направленный навстречу основному, причем величина m_2 тем больше, чем больше m_3 . Потери энергии происходят как при разделении потока, так и при последующем соударении. Таким образом, появляется возможность управления аэродинамическим сопротивлением за счет изменения проходного сечения дросселя $ДР$ (величины массового расхода m_3).

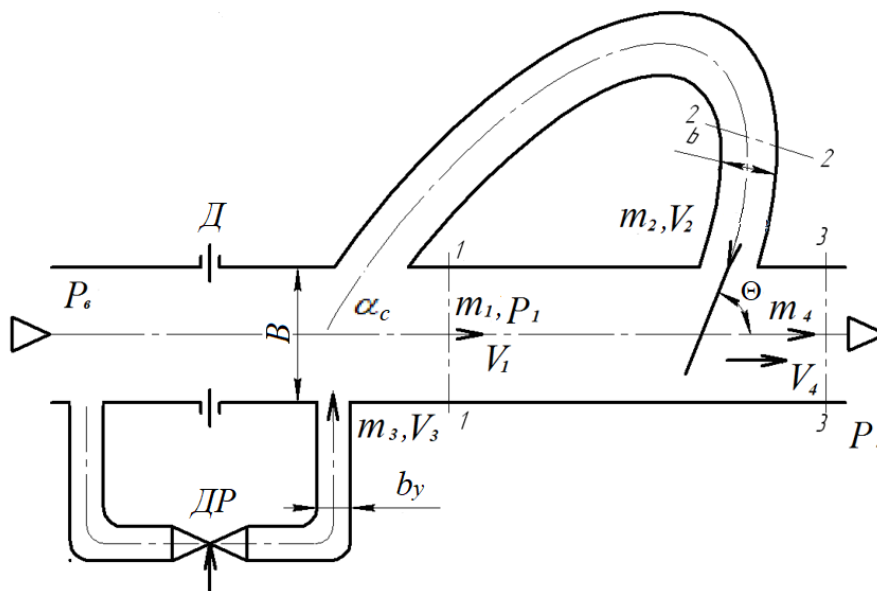


Рисунок 2.8 – Расчетная схема струйного управляемого сопротивления

Основным параметром, определяющим аэродинамические характеристики струйного управляемого сопротивления, является коэффициент аэродинамического сопротивления ζ_c . В-- качестве параметров, определяющих потери давления в струйном элементе, следует рассматривать угол Θ между осями прямого и бокового каналов в области соударения струй, отношение $\bar{b} = b/B$ ширины бокового b и прямого B каналов (их диаметров при цилиндрической форме), а также массовых расходов m_2 и m_3 .

Для связи коэффициент сопротивления ζ_c с данными параметрами можно использовать следующие зависимости.

Уравнение для определения массового расхода m_3

$$m_3 = f_{op} \mu_{op} \rho \sqrt{\frac{2(p_6 - p_1)}{\rho}}. \quad (2.37)$$

Уравнение, определяющее перепад давления на диафрагме D

$$p_6 - p_1 = \zeta_d \rho \frac{V_6^2}{2}. \quad (2.38)$$

Уравнение, определяющее угол отклонения струи α_c , а следовательно, и расход m_2 (его величину принято считать пропорциональным углу отклонения α_c)

$$\operatorname{tg} \alpha_c = \frac{b_y \varepsilon_y u_3}{B \varepsilon_n u_1}. \quad (2.39)$$

Уравнение изменения количества движения для объема воздуха между сечениями 1-1 и 3-3

$$m_1 V_1 - m_4 V_4 - m_2 V_2 \cos \theta = BH (p_1 - p_3). \quad (2.40)$$

Уравнение для определения коэффициента аэродинамического сопротивления струйного элемента

$$\zeta_c = \frac{2(p_1 - p_3)}{\rho V_3^2}. \quad (2.41)$$

В выражениях (2.37-2.41) обозначены:

ζ_δ – коэффициент гидравлического сопротивления диафрагмы;

f_{dp}, μ_{dp} – площадь проходного сечения и коэффициент расхода дросселя;

$\varepsilon_y, \varepsilon_n$ – коэффициенты сжатия соответствующих потоков;

H – высота канала;

V_1, V_2, V_3, V_4, V_6 – скорости потоков;

ρ – плотность воздушного потока (в рассматриваемой задаче можно считать постоянной величиной, которая зависит от температуры воздуха и атмосферного давления).

Основные величины, входящие в уравнения (2.37-2.41), отмечены на рисунке 2.8. Представленные зависимости формируют математическую модель статической характеристики струйного управляемого сопротивления, которая определяет зависимость его коэффициента аэродинамического сопротивления ζ_c от сигнала управления (величины проходного сечения f_{dp}, μ_{dp} дросселя DP). Необходимо учитывать, что в систему уравнений входят ряд параметров, требующих экспериментального определения ($\varepsilon_y, \varepsilon_n, \mu_{dp}, \zeta_\delta$).

2.2.2 Критерий энергетической эффективности регулирования аэродинамических характеристик вентиляционных систем

Как отмечалось в п.1.2.1 одним из способов регулирования расхода в вентиляционной системе является изменение сопротивления для движения воздушного потока на одном конкретном или отдельных участках вентиляционной сети. И с

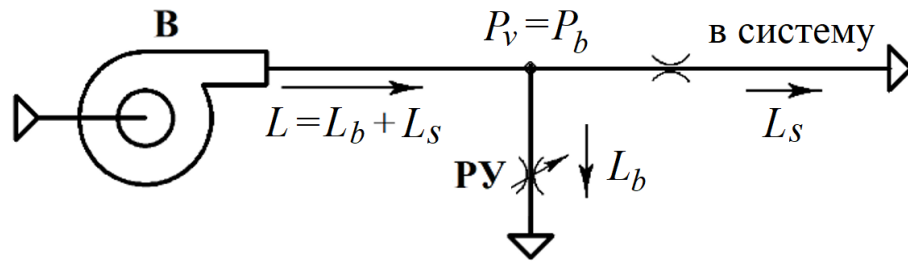
этой целью встраиваются различные регулировочные устройства в соответствующие воздуховоды для создания переменного сопротивления (дросселирования).

Также было отмечено, что к регулирующим устройствам ОВС в качестве основного требования предъявляется возможность осуществления плавного изменения расхода вентилятора в диапазоне от максимальной величины до конкретного заданного значения. Кроме того, струйное регулирующее устройство должно отвечать требованию эффективности с точки зрения обеспечения максимального уменьшения потребляемой вентиляторной установкой мощности при снижении расхода воздуха.

Выше были рассмотрены типовые схемы вентиляционных систем со струйными регулирующими устройствами, где для управления струйными устройствами, установленными перед вентилятором, организуется байпасный подвод воздуха, т.е. его расход через частично открытый обводной канал. Как показывает практика регулирования производительности центробежных насосов, а также радиальных вентиляторов с лопатками, загнутыми назад, в ряде случаев при использовании байпасного способа регулирования достигается повышение энергетической эффективности регулирования вентиляционной системы в целом [26, 78]. Простота осуществления данного способа, глубина регулирования, надёжность могут в ряде случаев оказаться решающими при создании систем автоматики. Поэтому важна задача оценки экономичности байпасного способа регулирования производительности вентилятора и диапазона его применения, что требует разработки критерия энергетической эффективности регулирования аэродинамических характеристик.

Для разработки критерия энергетической эффективности рассмотрим простейшую схему байпасного регулирования, представленную на рисунке 2.9. Расход L_s , поступающий в систему, изменяется вследствие полного или частичного открытия параллельного к системе канала (байпасной линии). Величина расхода в байпасной линии L_b настраивается регулирующим устройством. Расход вентилятора L определяется выражением

$$L = L_b + L_s. \quad (2.42)$$



В – вентилятор; РУ – регулирующее устройство

Рисунок 2.9 – Расчетная схема

Более детально процесс регулирования расхода в вентиляционной системе байпасным способом отражен на рисунке 2.10.

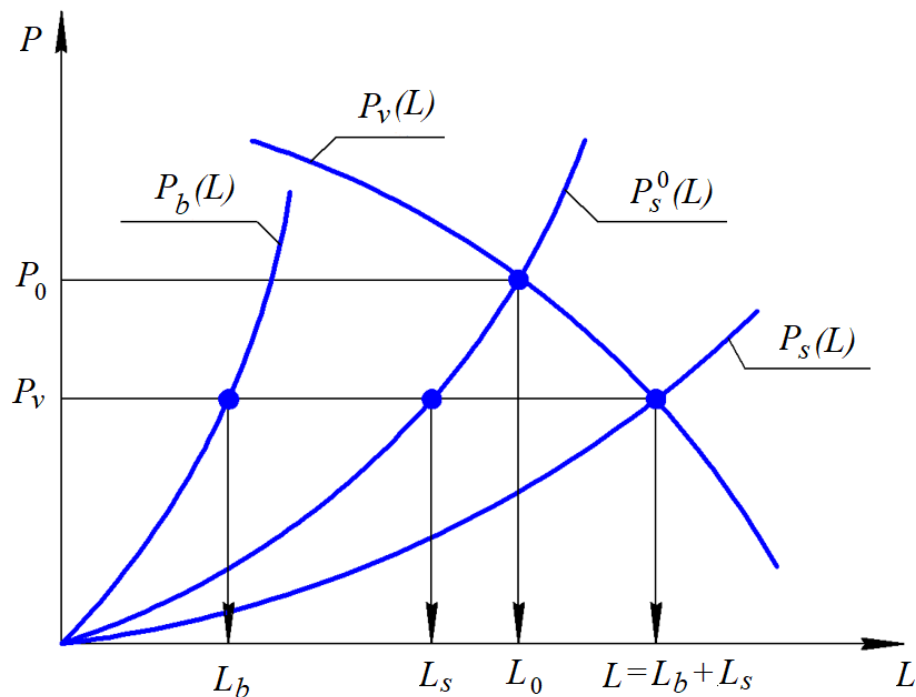


Рисунок 2.10 – Регулирование расхода в вентиляционной системе байпасным способом

На рисунке 2.10 показаны аэродинамические характеристики: характеристика вентилятора $P_v(L)$ и начальная характеристика сети $P_s^0(L)$ при нормально закрытом регулирующем устройстве. При этом в систему идет максимальный расход, который равен начальному расходу вентилятора L_0 . При частичном открытии характеристика байпасной линии имеет вид $P_b(L)$. Суммируя по расходу

характеристику байпасной линии и начальную характеристику сети, получаем характеристику сети с частично открытой байпасной линией $P_s(L)$. В точке пересечения характеристики сети и характеристики вентилятора получаем значение полного давления P_v и расхода вентилятора L , величина которого равна сумме значений расхода в байпасной линии L_b и расхода, идущего в систему L_s .

Зная зависимость КПД вентилятора от расхода $\eta(L)$, можно определить величину мощности, потребляемой вентилятором,

$$N = LP_v/\eta. \quad (2.43)$$

Можно утверждать, что байпасное регулирование имеет энергетическую эффективность, если потребляемая мощность уменьшается при открытии байпасной линии. Математическая запись данного утверждения выражается следующим условием для полного дифференциала мощности

$$dN < 0 \quad (2.44)$$

или

$$dN = \frac{\partial N}{\partial L} dL + \frac{\partial N}{\partial P_v} dP_v + \frac{\partial N}{\partial \eta} d\eta < 0. \quad (2.45)$$

При подстановке (2.43) в (2.45) имеем

$$\frac{P_v}{\eta} dL + \frac{L}{\eta} dP_v - \frac{P_v L}{\eta^2} d\eta < 0, \quad (2.46)$$

которое преобразуем к виду

$$\frac{dL}{L} + \frac{dP_v}{P_v} \leq \frac{d\eta}{\eta}. \quad (2.47)$$

Выражение (2.47) по сути есть критерий энергетической эффективности регулирования аэродинамических характеристик в дифференциальной форме. Использование выражения (2.47) требует аналитических зависимостей для

аэродинамических характеристик вентиляторной установки, поэтому является не вполне удобным в практических расчетах.

Для получения выражения для критерия энергетической эффективности в форме, удобной для практических расчетов, в уравнении (2.47) перейдем от дифференциалов переменных к их отклонениям от начальных значений при открытии байпасной линии: ΔL , ΔP_v , $\Delta \eta$. Тогда уравнение (2.47) с определенной степенью приближения можно заменить выражением

$$\Delta \bar{L} + \Delta \bar{P}_v \leq \Delta \bar{\eta} , \quad (2.48)$$

где $\Delta \bar{L} = \Delta L / L_0$, $\Delta \bar{P}_v = \Delta P_v / P_0$, $\Delta \bar{\eta} = \Delta \eta / \eta_0$ – соответственно относительное изменение расхода, полного давления и КПД вентилятора при открытии байпасной линии;

P_0, η_0 – значения полного давления и КПД вентилятора при начальном расходе L_0 .

Таким образом, в дальнейших исследованиях процессов регулирования аэродинамических характеристик вентиляционных систем и оценки возможности эффективного использования байпасного способа регулирования по начальному (максимальному) расходу в системе для практических расчетов можно рассматривать критерий в виде (2.48). Данное выражение позволяет следующим образом сформулировать критерий энергетической эффективности: процесс регулирования обеспечивает снижение потребляемой мощности, если сумма относительных изменений полного давления и расхода не превышает относительного изменения КПД.

При наличии аналитических выражений для аэродинамических характеристик вентилятора, которые можно установить аппроксимацией экспериментальных данных, для оценки энергетической эффективности для теоретических исследований вполне удобным является использование зависимости (2.47).

2.3 Моделирование турбулентных потоков в элементах вентиляционных систем

В первом разделе было отмечено, что важным направлением повышения эффективности ОВС является выравнивание потока на выходе радиальных вентиляторов. Вместе с тем, отсутствуют рекомендации по выбору геометрических размеров и параметров размещения конструктивных элементов в диффузорах с несимметричным расширением, которые имеют разные наклоны боковых стенок. Поэтому необходимо дальнейшее развитие методов выравнивания потока на выходе радиальных вентиляторов, что позволит разработать рекомендации по выбору геометрических размеров и параметров размещения конструктивных элементов в диффузорах с несимметричным расширением для зоны рабочих аэродинамических характеристик вентилятора.

Основным инструментом в проведении теоретических исследований по данному направлению является численное моделирование турбулентных потоков в элементах вентиляционных систем [44, 55, 66, 76, 93].

2.3.1 Математическая модель турбулентного потока в вентиляционной системе

Для реальных условий работы промышленных вентиляционных систем воздушный поток допустимо рассматривать как несжимаемую среду, а для описания турбулентного течения использовать уравнения Рейнольдса и уравнения неразрывности, которые в декартовой системе координат имеют вид [59, 74, 85]:

$$g_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 \bar{u}_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}_x}{\partial z^2} \right) =$$

$$= \frac{\partial \bar{u}_x}{\partial t} + \bar{u}_x \frac{\partial \bar{u}_x}{\partial x} + \bar{u}_y \frac{\partial \bar{u}_x}{\partial y} + \bar{u}_z \frac{\partial \bar{u}_x}{\partial z} + \frac{\partial (\overline{u'_x u'_x})}{\partial x} + \frac{\partial (\overline{u'_x u'_y})}{\partial y} + \frac{\partial (\overline{u'_x u'_z})}{\partial z}; \quad (2.49)$$

$$\begin{aligned}
& g_y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 \bar{u}_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}_y}{\partial z^2} \right) = \\
& = \frac{\partial \bar{u}_y}{\partial t} + \bar{u}_x \frac{\partial \bar{u}_y}{\partial x} + \bar{u}_y \frac{\partial \bar{u}_y}{\partial y} + \bar{u}_z \frac{\partial \bar{u}_y}{\partial z} + \frac{\partial (\overline{u'_y u'_x})}{\partial x} + \frac{\partial (\overline{u'_y u'_y})}{\partial y} + \frac{\partial (\overline{u'_y u'_z})}{\partial z};
\end{aligned} \tag{2.50}$$

$$\begin{aligned}
& g_z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 \bar{u}_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}_z}{\partial z^2} \right) = \\
& = \frac{\partial \bar{u}_z}{\partial t} + \bar{u}_x \frac{\partial \bar{u}_z}{\partial x} + \bar{u}_y \frac{\partial \bar{u}_z}{\partial y} + \bar{u}_z \frac{\partial \bar{u}_z}{\partial z} + \frac{\partial (\overline{u'_z u'_x})}{\partial x} + \frac{\partial (\overline{u'_z u'_y})}{\partial y} + \frac{\partial (\overline{u'_z u'_z})}{\partial z}.
\end{aligned} \tag{2.51}$$

$$\frac{\partial \bar{u}_x}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}_y}{\partial y} + \frac{\partial \bar{u}_z}{\partial z} = 0; \tag{2.52}$$

где \bar{p} – усредненное давление;

$\bar{u}_x, \bar{u}_y, \bar{u}_z$ – усредненные проекции скорости;

u'_x, u'_y, u'_z – пульсационные составляющие проекций скорости;

ν – коэффициент кинематической вязкости;

g_x, g_y, g_z – проекции ускорения массовых сил.

В уравнениях Рейнольдса турбулентного течения вместе с членами, выражающими вязкое напряжение (μ – коэффициент динамической вязкости)

$$\nu \left(\frac{\partial^2 \bar{u}_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}_x}{\partial z^2} \right) = \frac{1}{\rho} \mu \left(\frac{\partial^2 \bar{u}_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}_x}{\partial z^2} \right), \tag{2.53}$$

содержатся составляющие, выражающие турбулентные напряжения, вида

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x} (\overline{\rho u'_x u'_x}), \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x} (\overline{\rho u'_x u'_y}), \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x} (\overline{\rho u'_x u'_z}). \tag{2.54}$$

Полные касательные напряжения в турбулентном потоке есть сумма вязкостных напряжений τ_{vis} и турбулентных напряжений τ_{tur} [6, 107]

$$\tau = \tau_{vis} + \tau_{tur}. \quad (2.55)$$

где турбулентные напряжения

$$\tau_{tur} = -\rho \overline{u'_j u'_i}. \quad (2.56)$$

Анализируя современные исследования по моделированию турбулентных потоков в системах вентиляции, можно заметить, что используемые в практике расчетов модели турбулентности имеют отличия как с точки зрения приемлемой трудоемкости проведения вычислительной процедуры, так и с точки зрения необходимой точности для инженерных расчетов. В этой связи, предпочтительной для наших исследований является стандартная k - ε модель турбулентности. Кроме того, важным преимуществом этой модели турбулентности есть то, что она включена практически во все известные программные продукты, реализующие методы компьютерной гидродинамики. Поэтому в дальнейшем проводим исследования на основе стандартной k - ε модели турбулентности.

Кинетическая энергия турбулентности

$$k = \frac{1}{2} \left(\overline{(u'_x)^2} + \overline{(u'_y)^2} + \overline{(u'_z)^2} \right). \quad (2.57)$$

Скорость диссипации кинетической энергии турбулентности

$$\begin{aligned} \varepsilon = \nu & \left(2 \overline{\left(\frac{\partial u'_x}{\partial x} \right)^2} + 2 \overline{\left(\frac{\partial u'_y}{\partial y} \right)^2} + 2 \overline{\left(\frac{\partial u'_z}{\partial z} \right)^2} + \right. \\ & \left. + \overline{\left(\frac{\partial u'_x}{\partial y} \right)^2} + \overline{\left(\frac{\partial u'_y}{\partial x} \right)^2} + \overline{\left(\frac{\partial u'_x}{\partial z} \right)^2} + \overline{\left(\frac{\partial u'_z}{\partial x} \right)^2} + \overline{\left(\frac{\partial u'_y}{\partial z} \right)^2} + \overline{\left(\frac{\partial u'_z}{\partial y} \right)^2} \right). \end{aligned} \quad (2.58)$$

В современной аэрогидромеханике k - ε модель турбулентности и ее различные модификации используют для вычисления турбулентных напряжений концепцию турбулентной вязкости, опирающуюся на гипотезу Буссинеска. Если использовать для краткости записи тензорные обозначения и показать индекс

турбулентности « t » сверху, то для дополнительных турбулентных напряжений получаются следующие уравнения

$$\tau_{ji}^t = \rho \nu_{tur} \left(\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) - \frac{2}{3} \rho \delta_{ji} k, \quad (2.59)$$

где δ_{ji} – символы Кронекера

$$\delta_{ji} = \begin{cases} 1, & j = i; \\ 0, & j \neq i. \end{cases} \quad (2.60)$$

«Связка» Прандтля-Колмогорова для определения кинематического коэффициента турбулентной вязкости имеет вид

$$\nu_{tur} = C_\nu \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (2.61)$$

где C_ν – эмпирическая константа.

Для описания кинетической энергии турбулентности k и скорости ее диссипации ε в рассмотрение вводят скорость генерации турбулентности

$$\begin{aligned} G = & \tau_{xx}^t \frac{\partial \bar{u}_x}{\partial x} + \tau_{yy}^t \frac{\partial \bar{u}_y}{\partial y} + \tau_{zz}^t \frac{\partial \bar{u}_z}{\partial z} + \\ & + \tau_{xy}^t \frac{\partial \bar{u}_x}{\partial y} + \tau_{yx}^t \frac{\partial \bar{u}_y}{\partial x} + \tau_{xz}^t \frac{\partial \bar{u}_x}{\partial z} + \\ & + \tau_{zx}^t \frac{\partial \bar{u}_z}{\partial x} + \tau_{yz}^t \frac{\partial \bar{u}_y}{\partial z} + \tau_{zy}^t \frac{\partial \bar{u}_z}{\partial y}. \end{aligned} \quad (2.62)$$

Кинетическая энергия турбулентности и скорость ее диссипации связаны уравнениями

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{u}_x k)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \bar{u}_y k)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho \bar{u}_z k)}{\partial z} = G - \rho \varepsilon + \\ + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\rho(\nu + \nu_t)}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\rho(\nu + \nu_t)}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\rho(\nu + \nu_t)}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial z} \right); \end{aligned} \quad (2.63)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\bar{u}_x\varepsilon)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho\bar{u}_y\varepsilon)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho\bar{u}_z\varepsilon)}{\partial z} = C_1\frac{\varepsilon}{k}G - C_2\rho\frac{\varepsilon^2}{k} + C_3\frac{G^2}{\rho k} + \\ + \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\rho(v+v_t)}{\sigma_\varepsilon}\frac{\partial\varepsilon}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\rho(v+v_t)}{\sigma_\varepsilon}\frac{\partial\varepsilon}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\rho(v+v_t)}{\sigma_\varepsilon}\frac{\partial\varepsilon}{\partial z}\right); \end{aligned} \quad (2.64)$$

где входящие константы $C_1, C_2, C_3, C_v, \sigma_k, \sigma_\varepsilon$ принимают значения в зависимости от модификации модели турбулентности согласно рекомендациям [6, 83, 107].

2.3.2 Исследование турбулентного потока в элементах присоединения радиального вентилятора к вентиляционной системе

В среде программного комплекса SOLIDWORKS (модуль Flow Simulation) [98, 119] выполнено исследование турбулентных потоков в конструктивных элементах, которые соединяют радиальный вентилятор с нагнетательным воздуховодом.

Вычислительная процедура содержала ряд этапов. Первый этап состоял в формировании расчетной области для конструктивного элемента вентиляционной системы. Отдельной задачей в подготовке исходных данных для численного моделирования потока являлось построение твердотельной геометрической модели конструктивных элементов вентиляционной системы. Создание твердотельных моделей есть достаточно трудоемкая задача, которая выполняется компьютерным моделированием с применением систем автоматизированного проектирования (CAD).

В расчетах брались стандартные параметры для атмосферного давления, температуры и плотности воздушного потока, а также коэффициента кинематической вязкости воздуха.

Начальные условия кроме входного сечения для избыточных давлений и скоростей принимались равными нулю. Во входном сечении начальные значения давлений в первом приближении задавались равными номинальному давлению вентилятора. Поле скоростей на входе диффузора задавалось приближенно на основе рекомендаций [34, 45] для пространственного распределения относительной

скорости в сечении выходного патрубка радиального вентилятора исходя из угла наклона лопаток рабочего колеса.

На рисунке 2.11 показана картина течения в диффузоре без пластины (рисунок 2.11, а) и при ее наличии (рисунок 2.11, б, в). Пластина располагалась на разных расстояниях от боковой стенки. Для визуализации результатов расчета использовались стрелки векторов скорости, изолинии скоростей, различный цвет диапазонов скоростей.

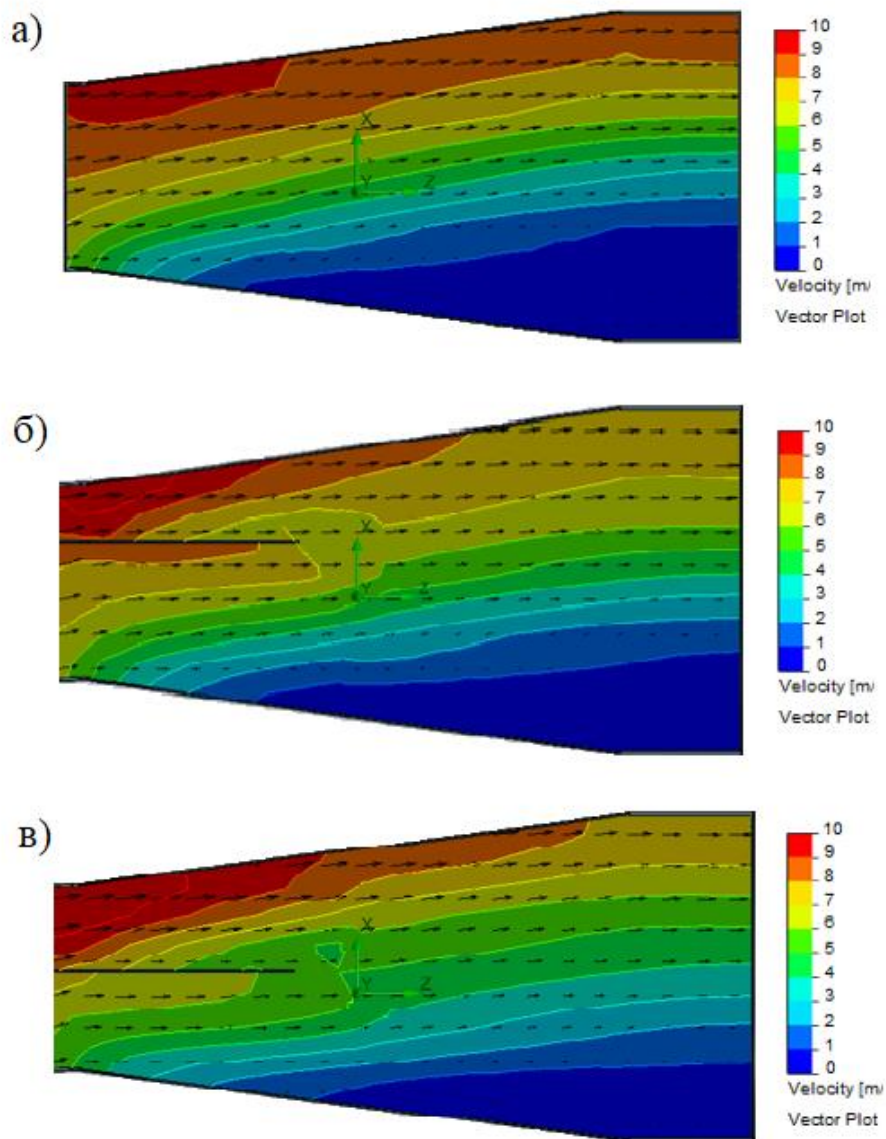


Рисунок 2.11 – Картина течения в диффузоре без пластины и при ее наличии

Численное моделирование турбулентного потока в диффузоре, непосредственно размещенного на выходе радиального вентилятора, убедительно показывает значительную неоднородность структуры воздушного потока. Распределение скоростей является несимметричным и существенно неравномерным. Это вызывает потери энергии, а следовательно, и снижение в целом производительности вентиляционной системы [86, 87, 111].

Сравнение распределений скорости без пластины (рисунок 2.11, а) и при ее наличии (рисунок 2.11, б, в) показывает целесообразность установки пластины для выравнивания поля скоростей. Как можно заметить, эффективность установки пластины заметно зависит от параметров ее размещения по сечению диффузора. Ее размещение в центре (рисунок 2.11, в) оказывает меньшее влияние на неравномерный поток, чем при ее размещении ближе к боковой стенке (рисунок 2.11, б), к которой в большей степени смещается профиль скорости во входном сечении.

Таким образом, численное моделирование показало, что для повышения производительности вентиляционных систем целесообразным является дальнейшее использование методов выравнивания потока на выходе радиальных вентиляторов путем установки конструктивных элементов в виде простой или составной выравнивающей пластин в диффузорах с несимметричным расширением, имеющих разные наклоны боковых стенок.

При проведении численного моделирования не ставилась цель получения количественной оценки влияния формы и параметров размещения конструктивных элементов в выходном патрубке радиального вентилятора на аэродинамические характеристики вентиляционной системы, так как не нельзя достоверно оценить точность вычисления параметров воздушного потока. В тоже время, качественная оценка структуры потока, распределение скоростей в нем позволяют сформировать направления и задачи дальнейших экспериментальных исследований по разработке рекомендаций для повышения производительности вентиляционных систем с количественной оценкой аэродинамических характеристик вентиляторной установки на лабораторном стенде.

2.4 Особенности расчета аэротермодинамических характеристик с учетом сжимаемости воздушной среды

Математические модели нестационарных газодинамических процессов, как правило, разрабатываются с определенным уровнем приближения [1, 69, 83]. В первом приближении принимаются модели с сосредоточенными параметрами и квадратичной зависимостью между перепадом давления и расходом для аэродинамических сопротивлений. Модели второго уровня приближения учитывают сжимаемость среды и соотношение давлений при определении массового расхода через гидравлическое сопротивление. При учете сжимаемости и значительной протяженности систем рассматривают модели третьего уровня приближения, которые включают дифференциальные уравнения в частных производных для элементов системы, требующих обязательного учета основных конструктивных и газодинамических характеристик, как самого объекта моделирования, так и свойств рабочей среды.

Моделирование нестационарных процессов в системах ОВКВ со значительными градиентами давления практически всегда предполагает учет сжимаемости рабочей среды, поскольку данный фактор существенно определяет характерное время протекающего процесса. В моделях первого и второго уровней приближения объемы помещений и частей системы рассматривают как условные емкости и представляются элементами с сосредоточенными параметрами, в которых равномерно распределены давление и плотность среды. Связь между аэротермодинамическими характеристиками устанавливается, в первую очередь, на основе уравнения неразрывности для массовых расходов

$$\frac{V}{nRT} \frac{dp}{dt} = \Sigma G_+ - \Sigma G_-, \quad (2.64)$$

где p – давление в емкости; t – время; V – объем емкости; n – показатель политропы; T – абсолютная температура в емкости; ΣG_+ – сумма втекающих массовых расходов; ΣG_- – сумма вытекающих массовых расходов; R – газовая постоянная для воздуха.

Если длительность нестационарных газодинамических процессов незначительна по сравнению со временем теплообмена рассматриваемых объемов с окружающей средой, то термодинамический процесс можно считать адиабатным, а следовательно, положить $n=k$.

Для учета инерционности рабочей среды в моделях с сосредоточенными параметрами для каналов ОВС рассматривают дополнительно инерционный перепад давлений

$$\Delta P_u = \beta \frac{l}{S} \frac{dG}{dt}, \quad (2.65)$$

где β - квазистационарный коэффициент количества движения, учитывающий неравномерность распределения скорости по сечению канала (для турбулентного режима движения воздушной среды $\beta = 1,03 \dots 1,05$); l и S - длина и площадь поперечного сечения канала.

При расчете нестационарных течений с учетом сжимаемости воздушной среды связь между массовым расходом через аэродинамическое сопротивление и давлениями устанавливается следующей алгоритмической зависимостью [83]

$$G = \begin{cases} \mu f p_1 \sqrt{\frac{2k}{(k-1)RT_1} \left[\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k+1}{k}} \right]}, & \frac{p_2}{p_1} > \sigma_{кр}; \\ \mu f \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{1}{k-1}} p_1 \sqrt{\frac{2k}{(k+1)RT_1}}, & \frac{p_2}{p_1} \leq \sigma_{кр}; \end{cases} \quad (2.66)$$

где T_1 - абсолютная температура на входе; p_1, p_2 - абсолютные давления на входе и выходе; μf - эффективная площадь (μ - коэффициент расхода; f - площадь живого сечения); $\sigma_{кр}$ - критическое отношение давлений

$$\sigma_{кр} = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}}. \quad (2.67)$$

Отмеченные особенности расчета нестационарных газодинамических процессов показывают, что декомпозиция систем должна проводиться, в первую очередь, не по конструктивным и технологическим признакам, а по динамическим характеристикам объектов. Кроме того, динамическая декомпозиция будет определяться и уровнем приближения математических моделей. При этом, существует возможность универсального подхода к декомпозиции при ориентации на модели первого и второго уровней приближения, поскольку система разбивается на элементы с сосредоточенными параметрами, а следовательно, типовыми расчетными можно считать элементы с различными конструктивными и технологическими признаками.

Учитывая вышеизложенное, базовыми элементами динамической декомпозиции будем считать: условные емкости, инерционные участки, активные сопротивления. К первой группе необходимо отнести элементы, в которых можно пренебречь организованным движением рабочей среды. Во вторую группу могут войти участки магистралей и элементы связи систем, по которым осуществляется движение рабочей среды и имеющие заметную протяженность в соотношении с площадью проходного сечения. Третью группу следует составить из местных сопротивлений, напорно-регулирующих устройств, конструктивных участков магистралей, элементов, связывающих между собой условные емкости, а также неплотностей последних. Кроме того, сюда можно включить устройства, осуществляющие отбор или выброс рабочей среды из системы.

В соответствии с принятым подходом к динамической декомпозиции, произвольную систему можно представить из N условных емкостей, каждая из которых имеет номер $i=1 \dots N$ (рисунок 2.12) и характеризуется абсолютным давлением P_i и температурой T_i . Каждую емкость формально свяжем с остальными, в общем случае, через инерционные участки и активные сопротивления, поскольку газодинамические параметры последних могут зависеть от направления потока. По этим соображениям взаимную связь рассматриваем для каждой емкости и с окружающей средой.

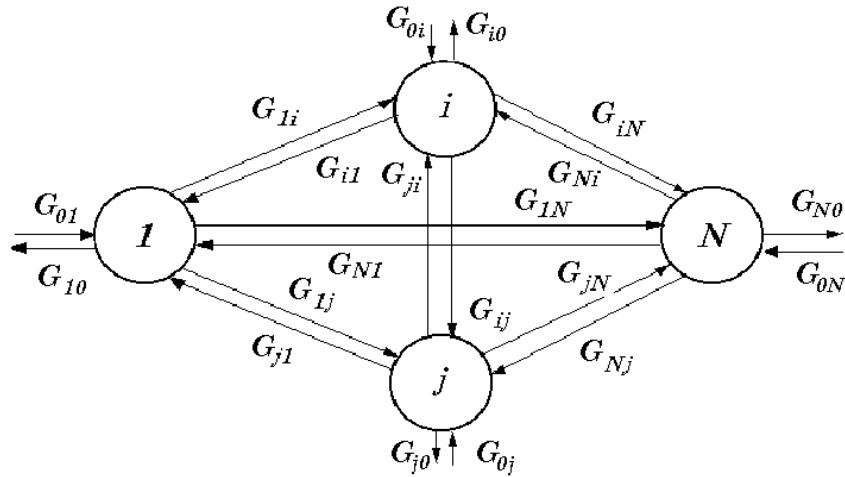


Рисунок 2.12 – Динамическая декомпозиция системы

Для рассмотренного подхода к динамической декомпозиции покажем пример составления обобщенной математической модели нестационарных газодинамических процессов в произвольной системе. Ориентируемся на модели элементов второго уровня приближения. Активное сопротивление, связывающее i -ую и j -ую условные емкости, будем характеризовать эффективной площадью $(\mu f)_{ij}$, если газовый поток перемещается в направлении от i -ой к j -ой емкости, и наоборот, эффективной площадью $(\mu f)_{ji}$, если газовый поток перемещается в направлении от j -ой к i -ой емкости.

Массовый расход газового потока G_{ij} в направлении от i -ой к j -ой емкости согласно (2.66) определим следующей алгоритмической зависимостью

$$G_{ij} = \begin{cases} 0, & \frac{p_j}{p_i} \geq 1; \\ (\mu f)_{ij} p_i \sqrt{\frac{2k_i}{(k-1)RT_i} \left[\left(\frac{p_j}{p_i}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_j}{p_i}\right)^{\frac{k+1}{k}} \right]}, & \frac{p_j}{p_i} > \sigma_{кр}; \\ (\mu f)_{ij} \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{1}{k-1}} p_i \sqrt{\frac{2k}{(k+1)RT_i}}, & \frac{p_j}{p_i} \leq \sigma_{кр}. \end{cases} \quad (2.68)$$

Для каждой емкости справедливо уравнение неразрывности

$$\frac{V_i}{kRT_i} \frac{dP_i}{dt} = \sum_{\substack{j=1 \\ (j \neq i)}}^N G_{ji} - \sum_{\substack{j=1 \\ (j \neq i)}}^N G_{ij} + G_{oi} - G_{i0}, \quad i = \overline{1, N}. \quad (2.69)$$

Массовые расходы G_{oi} и G_{i0} могут являться для системы граничными условиями, а могут определяться как расходы через активные сопротивления представленные неплотностями условных емкостей, устройствами или каналами, посредством которых осуществляется отбор или выброс газовой среды. Если данные расходы обусловлены наличием активных сопротивлений, то они устанавливаются аналогично (2.68), а в рассмотрение вводятся эффективные площади $(\mu f)_{i0}$ и $(\mu f)_{0i}$. Для построения обобщенной модели, независимо от того каким образом устанавливаются расходы G_{oi} и G_{i0} , будем считать их, в общем случае, функцией времени, давления и температуры в условной емкости

$$G_{i0} = f(t, P_i, T_i), \quad i = \overline{1, N}; \quad G_{0i} = f(t, P_i, T_i), \quad i = \overline{1, N}. \quad (2.70)$$

Необходимые в расчетах значения абсолютных температур можно установить из уравнений адиабатического процесса для каждой из емкости

$$T_i = T_i^0 \left(\frac{P_i}{P_i^0} \right)^{\frac{k-1}{k}}, \quad i = \overline{1, N}; \quad (2.71)$$

где T_i^0, P_i^0 – начальные значения абсолютных температур и давлений в емкостях, которые определяются по результатам расчета стационарного режима работы системы.

Таким образом, обобщенную математическую модель нестационарных газодинамических процессов в произвольной системе можно составить из уравнений (2.68-2.71). Система обыкновенных дифференциальных уравнений решается известными численными методами.

Выводы по второму разделу

По результатам проведенных теоретических исследований аэротермодинамических характеристики рабочих процессов вентиляционных систем можно сделать следующие выводы:

1. Разработана математическая модель комбинированной ОВС как объекта автоматического управления температурным режимом в помещении, позволяющая синтезировать САУ воздушным отоплением. Математическая модель построена на основе уравнений баланса тепловых потоков и массовых расходов в вентиляционной системе.

2. Рассмотрены подходы к структурной и параметрической идентификации математических моделей рабочих процессов систем ОВКВ и методы определения параметров для выбранной структуры динамической модели.

3. Обоснована идентификация объектов ОВС в виде передаточных функций апериодических звеньев первого и второго порядков с запаздыванием, представлены возможности автоматизации процессов идентификации в среде пакета прикладных программ MATLAB. Рассмотрены схемные решения установки струйных регулирующих устройств в системах ОВКВ для повышения надежности и долговечности ОВС за счет отсутствия подвижных механических частей.

4. Рекомендована математическая модель аэродинамических характеристик струйного управляемого сопротивления, которая определяет его статическую характеристику как зависимость коэффициента аэродинамического сопротивления от величины проходного сечения дросселя в канале управления.

5. Предложен критерий энергетической эффективности регулирования аэродинамических характеристик вентиляционных систем, позволяющий производить оценку возможности эффективного использования байпасного способа регулирования.

6. Выполнено исследование турбулентных потоков вентиляционных систем в среде программного комплекса SOLIDWORKS (модуль Flow Simulation). Численное моделирование турбулентного потока в диффузоре, непосредственно

размещенного на выходе радиального вентилятора, убедительно показывает значительную неоднородность структуры воздушного потока. Распределение скоростей является несимметричным и существенно неравномерным. Это вызывает потери энергии, а следовательно, и снижение в целом производительности вентиляционной системы.

7. Для повышения производительности вентиляционных систем на основе численного моделирования турбулентных течений обоснована эффективность и показана необходимость дальнейшего использования методов выравнивания потока на выходе радиальных вентиляторов путем установки конструктивных элементов в виде простой или составной выравнивающей пластин в диффузорах с несимметричным расширением, имеющих разные наклоны боковых стенок.

8. Результаты теоретических исследований аэротермодинамических характеристик рабочих процессов отопительно-вентиляционных систем представлены в работах [81, 82, 97, 98, 99, 101].

РАЗДЕЛ 3

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

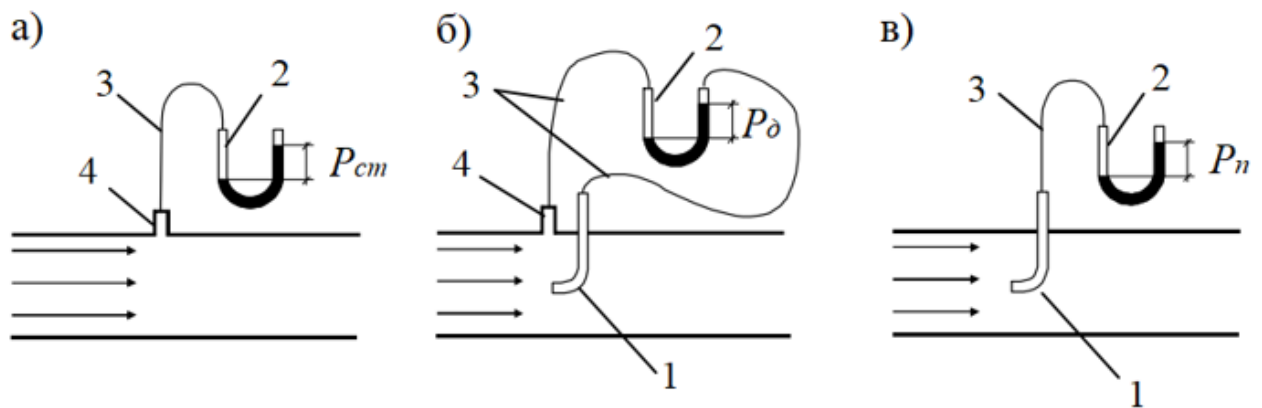
Поставленные задачи диссертационной работы, а также проведенные теоретические исследования характеристик рабочих процессов отопительно-вентиляционных систем обосновали необходимость проведения экспериментальных исследований для рассмотрения следующих вопросов.

Для повышения производительности вентиляционных систем на основе численного моделирования турбулентных течений показана эффективность и обоснована целесообразность дальнейшего использования методов выравнивания потока на выходе радиальных вентиляторов путем установки конструктивных элементов в виде простой или составной выравнивающей пластин в диффузорах с несимметричным расширением, имеющих разные наклоны боковых стенок. Поэтому требуется проведение экспериментальных исследований с целью разработки рекомендаций по выбору геометрических размеров и параметров размещения конструктивных элементов в диффузорах с несимметричным расширением, имеющих разные наклоны боковых стенок.

Также, рассмотрены схемные решения установки струйных регулирующих устройств в системах ОВКВ для повышения надежности и долговечности ОВС за счет отсутствия подвижных механических частей. Кроме того, предложен критерий энергетической эффективности байпасного способа регулирования аэродинамических характеристик вентиляционных систем, позволяющий производить оценку диапазонов эффективного использования регулирующих устройств. Применение данного критерия предполагает наличие аналитических выражений для аэродинамических характеристик вентилятора, которые можно установить аппроксимацией экспериментальных данных. Поэтому требуется разработка экспериментальных стендов и выполнение исследований аэродинамических характеристик вентиляционных систем со струйными регулируемыми устройствами.

3.1 Контрольно-измерительная аппаратура для экспериментальных исследований

Основным измеряемым аэродинамическим параметром является статическое, динамическое и полное давление. Схемы измерения статического давления $P_{ст}$, динамического давления P_{δ} и полного давления P_n представлены соответственно на рисунках 3.1, а, б, в.



1 – трубка полного давления; 2 – манометр;

3 – соединительная трубка; 4 – канал статического давления

Рисунок 3.1 – Схемы измерения давлений

При экспериментальных исследованиях для измерения давления обычно используются разнообразные жидкостные манометры [67, 84]. Самым простым и наиболее распространенным жидкостным манометром является U-образный манометр. Для обеспечения высокой точности при лабораторных измерениях аэродинамических характеристик вентиляционных систем традиционно применяют микроманометры с наклонной трубкой. Микроманометра ММН-2400 с наклонной трубкой показан на рисунке 3.2.

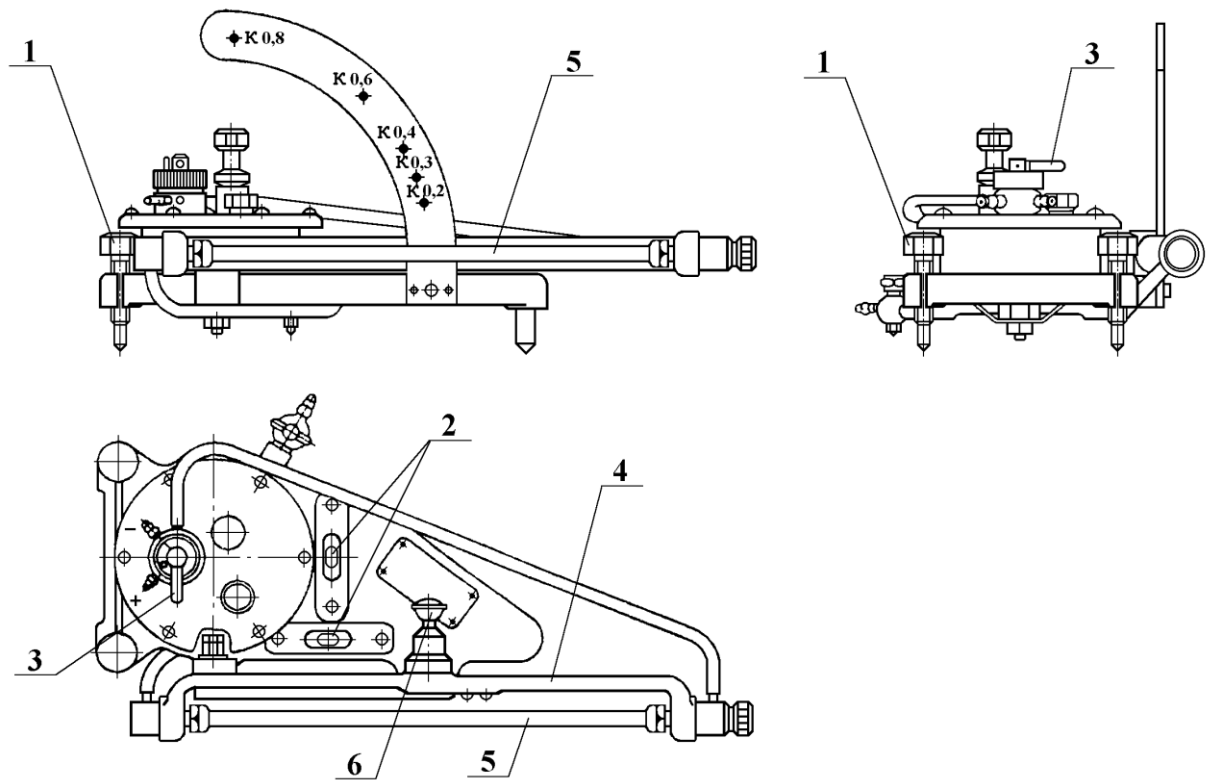
Определение давление P , Па, которое измеряется микроманометром, выполняется согласно выражению

$$P = K_m h_m g, \quad (3.1)$$

где g – ускорение свободного падения, $м/с^2$;

h_m – показания по шкале прибора, $мм$;

K_m – постоянная микроманометра.



1 – регулировочные ножки; 2 – уровни; 3 – трехходовой кран;
4 – кронштейн; 5 – измерительная трубка; 6 – регулятор уровня

Рисунок 3.2 – Микроманометр ММН-2400

Для угла наклона ψ при использовании этилового спирта

$$K_m = 0,81 \sin \psi. \quad (3.2)$$

При выполнении экспериментальных исследований вентиляционных систем и проведении натурных замеров в лабораторных условиях широко используется метод измерения давлений с помощью двухканальной пневмометрической трубки. Данный метод является самым универсальным и наиболее простым.

Двухканальную пневмометрическую трубку принято называть или трубкой Пито-Прандтля, или просто трубкой Пито [31, 67]. Типовая конструкция трубки Пито-Прандтля представлена на рисунке 3.3.

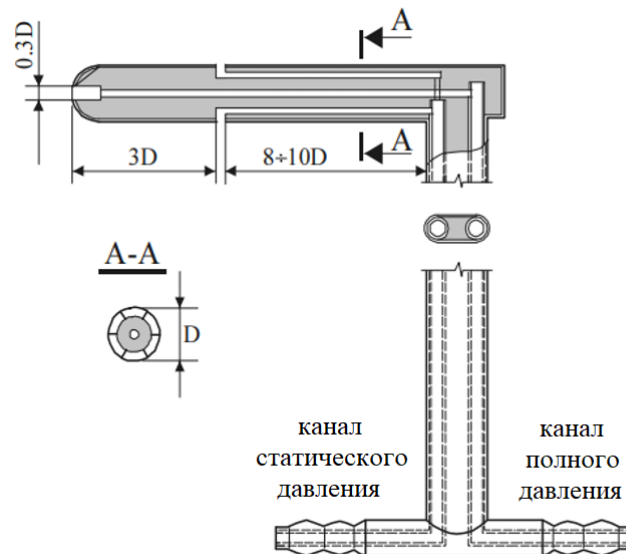


Рисунок 3.3 – Трубка Пито-Прандтля

Жидкостной манометр, подключенный к трубке Пито-Прандтля, будет показывать величину динамического давления P_d , т.е. разности полного и статического давлений. По величине динамического давления находится значение скорости воздушного потока в точке расположения носика трубки и затем расход воздуха L в вентиляционном канале [59]

$$V_0 = \sqrt{\frac{2P_d}{\rho}}. \quad (3.3)$$

$$L = V_0 F, \quad (3.4)$$

где V_0 – средняя скорость потока;

F – площадь поперечного сечения канала.

Для повышения точности величину средней скорости принимают равной среднеарифметическому значению от числа замеров скорости в характерных

точках сечения [67] согласно рисунку 3.4. Рекомендуемое число точек принимается согласно таблице 3.1.

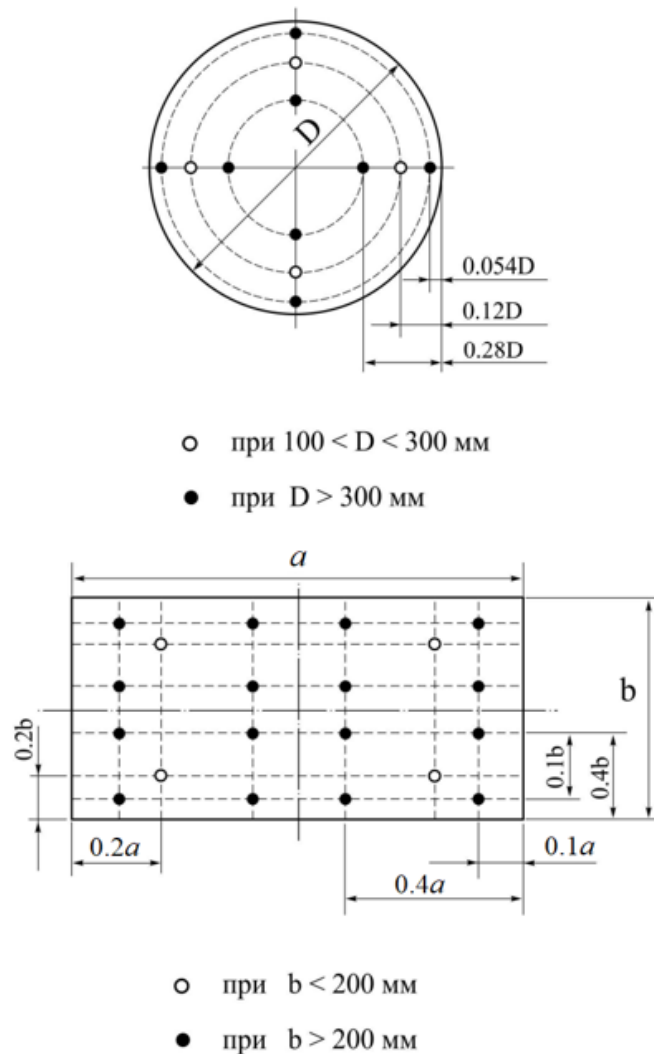


Рисунок 3.4 – Точки для измерения скорости
в вентиляционных каналах круглого и прямоугольного сечений

Таблица 3.1 – Рекомендуемое число точек для измерений

Сечение воздуховода	Круглое		Прямоугольное	
	100...300	более 300	100...200	Более 200
Диаметр (ширина)	100...300	более 300	100...200	Более 200
Число точек	6	8...10	6	16...20

Измерение расхода во всасывающем воздуховоде удобно производить с применением коллектора (рисунок 3.5), который представляет собой

спрофилированный входной участок, обеспечивающий незначительные потери давления. Величина расхода воздуха L в коллекторе определяется по выражению

$$L = \mu_{кол} F_{кол} \sqrt{\frac{2P_{кол}}{\rho}}. \quad (3.5)$$

где $F_{кол}$ – площадь коллектора;

$\mu_{кол}$ – коэффициент расхода коллектора ($\mu_{кол}=0,98\dots 1,0$).

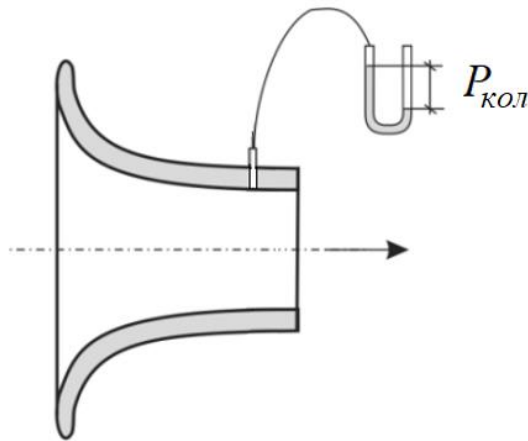


Рисунок 3.5 – Коллектор для измерения расхода

Для измерения аэротермодинамических параметров вентиляционных систем использовался многофункциональный измерительный прибор TESTO–440. Данный прибор позволяет измерять температуру и скорость воздушного потока, оценивать качество воздуха, в том числе, его влажность и концентрацию CO, CO₂, а также ряд других характеристик.

Прибор TESTO–440 вместе с комплектом зондов показан на рисунке 3.6.

Мощность, потребляемая вентилятором, устанавливалась по измерениям параметров электрической сети, к которой был запитан двигатель вентилятора, с использованием прибора К-505 (комплект измерительный). Прибор К-505 показан на рисунке 3.7.

Атмосферное давление измерялось барометром-анероидом БАММ-1.



Рисунок 3.6 – Прибор TESTO-440 и комплект зондов



Рисунок 3.7 – Прибор К-505

3.2 Методика обработки экспериментальных данных, оценка адекватности расчетных зависимостей

Типовая методика обработки экспериментальных данных при лабораторных испытаниях вентиляционных систем детально представлена в литературе [7, 24, 32].

Наиболее вероятное значение измеряемой величины есть ее среднеарифметическое значение

$$\bar{x} = \frac{\sum_{j=1}^m x_j}{m}, \quad (3.6)$$

где m – число параллельных опытов;

x_j – действительное значение измеряемой величины в j -ом опыте.

Среднеквадратичное отклонение результатов измерений

$$S_m = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^m (x_j - \bar{x})^2}{m-1}}. \quad (3.7)$$

Обнаружение грубой погрешности осуществляется с помощью критерия Граббса

$$t_g = |x_k - \bar{x}| / S_m, \quad (3.8)$$

где x_k – значение измеряемой величины, которое подлежит проверке.

Если вычисленное значение критерия Граббса больше табличного, то данное измерение для дальнейшей обработки отбрасывается, а значения \bar{x} и S_m определяются повторно.

Случайная погрешность измерения

$$\Delta x_c = \frac{t_m S_m}{\sqrt{m}}, \quad (3.9)$$

где t_m – критерий Стьюдента для числа опытов m при доверительной вероятности ϑ (значение доверительной вероятности принималось равным $\vartheta = 0,95$).

Суммарная погрешность измерения Δx определяется случайной погрешностью измерения и систематической погрешностью прибора [3, 29, 36]

$$\Delta x = \sqrt{\left(\frac{t_m S_m}{\sqrt{m}}\right)^2 + \left(\frac{\delta t_\infty}{3}\right)^2}, \quad (3.10)$$

где t_∞ – значение критерия Стьюдента при $m \rightarrow \infty$;

δ – систематическая погрешность прибора.

Важно отметить методику обработки косвенно измеряемых данных. Данное обстоятельство касается поставленных в диссертационной работе задач экспериментального исследования аэродинамических характеристик вентиляционной системы с диффузорами с несимметричным расширением и разными наклонами боковых стенок, а также вентиляционной системы со струйными регулирующими устройствами. Такой подход называется косвенным измерением, когда определение искомого значения требуемой физической величины осуществляется на основании результатов проведенных прямых измерений иных физических величин, которые функционально связаны с искомой величиной [70, 72, 118]. Отметим особенности метрологического анализа косвенных измерений.

Пусть косвенно измеряемая величина $y = f(x_1, \dots, x_n)$ является функцией n непосредственно измеряемых параметров $x_1 \dots x_n$. Тогда, найти среднее косвенно измеренной величины можно двумя способами.

Первый подход

$$\bar{y} = f(\bar{x}_1, \dots, \bar{x}_n), \quad (3.11)$$

где $\bar{x}_1, \dots, \bar{x}_n$ – среднеарифметические значения для непосредственно измеренных параметров.

Второй подход. Сначала вычислить для каждого значения аргумента x_j величину $y = f(x_1, \dots, x_n)$, а затем определить ее среднеарифметическое значение

$$\bar{y} = \frac{\sum_{j=1}^m y_j}{m}. \quad (3.12)$$

При выполнении экспериментальных исследований вентиляционных систем в диссертационной работе вычисление среднего значения косвенного измеряемой величины проводилось с использованием первого способа (3.11).

Доверительный интервал ошибки косвенного измерения

$$\Delta y = \sqrt{\sum_{j=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_j} \Delta x_j \right)^2}, \quad (3.13)$$

На основании (3.13) относительная ошибка непрямого измерения

$$\Delta \bar{y} = \frac{\Delta y}{y} = \sqrt{\sum_{j=1}^n \left(\frac{1}{f} \frac{\partial f}{\partial x_j} \Delta x_j \right)^2}. \quad (3.14)$$

Учитывая, что

$$\frac{1}{f} \frac{\partial f}{\partial x_j} \Delta x_j = \Delta x_j \frac{\partial}{\partial x_j} \ln f, \quad (3.15)$$

то имеем

$$\begin{aligned} \Delta \bar{y} &= \sqrt{\sum_{j=1}^n \left(\Delta x_j \frac{\partial}{\partial x_j} \ln f \right)^2} = \\ &= \sqrt{\left(\Delta x_1 \frac{\partial}{\partial x_1} \ln f \right)^2 + \left(\Delta x_2 \frac{\partial}{\partial x_2} \ln f \right)^2 + \dots + \left(\Delta x_n \frac{\partial}{\partial x_n} \ln f \right)^2}. \end{aligned} \quad (3.16)$$

Таким образом, относительная ошибка функции k переменных определяется согласно выражению (3.16). В практике экспериментальных исследований для нахождения относительной погрешности функцию, как правило, предварительно логарифмируют. Далее для каждой переменной находят частные производные и вычисляют их значения.

Таким способом был выполнен расчет погрешностей непосредственно измеряемых и косвенно измеряемых параметров. Оценка погрешностей измерения

основных аэродинамических характеристик вентиляционных систем приведена в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Погрешности измерения

Измеряемый параметр	Величина погрешности
Температура воздуха, °С	0,5
Давление воздушного потока, Па	5
Скорость воздушного потока, м/с	0,05
Расход воздуха, %	1,0
Потребляемая мощность, %	0,5
КПД вентилятора, %	1,7

Адекватность установленных характеристик и расчетных зависимостей проверялась по критерию Фишера [5, 23, 36]

$$F = \frac{S_{ад}^2}{S_{вос}^2}, \quad (3.17)$$

где $S_{ад}^2$ – дисперсия адекватности;

$S_{вос}^2$ – дисперсия воспроизводимости.

Дисперсия адекватности

$$S_{ад}^2 = \frac{\sum_{j=1}^N (y_j - y_{рj})^2}{N - r - 1}, \quad (3.18)$$

где y_j – экспериментальные значения;

$y_{рj}$ – расчетные значения;

N – число сравниваемых значений;

r – число коэффициентов в теоретической зависимости, которые получены по опытным данным.

Дисперсия воспроизводимости

$$S_{\text{еос}}^2 = \sum_{j=1}^N \frac{S_{mj}^2}{N}, \quad (3.19)$$

где S_{mj}^2 – среднеквадратичное отклонение j -го результата.

Установленная характеристика или расчетная зависимость полагается адекватной опытной, если значения критерия Фишера меньше табличного

$$F < F_m. \quad (3.20)$$

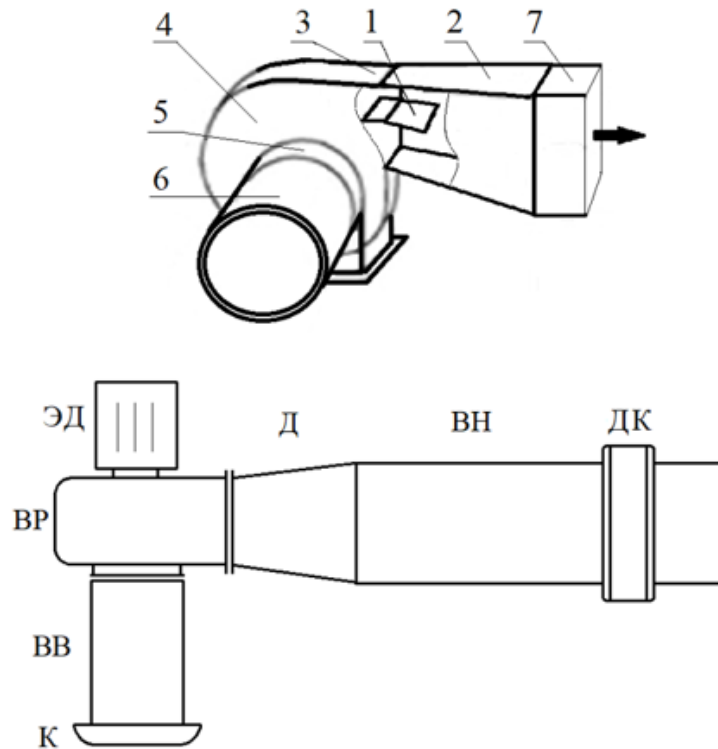
В диссертационной работе проверка адекватности осуществлялась для аппроксимационных характеристик вентилятора. Значения критерия Фишера $F \leq 1,55$ не превышали табличного $F_m \approx 1,81$ при доверительной вероятности $\vartheta = 0,95$, что позволило считать полученные характеристики и зависимости адекватными.

В дальнейших исследованиях оценка адекватности производилась для расчетных аэротермодинамических характеристик ОВС при построении САУ воздушным отоплением.

3.3 Экспериментальные исследования аэродинамических характеристик вентиляционной системы с диффузорами с несимметричным расширением

Для исследования аэродинамических характеристик вентиляционной системы с диффузорами с несимметричным расширением, имеющих разный наклон боковых стенок, разработан экспериментальный стенд. Выравнивание потока на выходе радиального вентилятора осуществлялось размещением в диффузорах конструктивных элементов, в качестве которых применялись простая и составная выравнивающие пластины.

Схема экспериментального стенда, его основные элементы и обозначения показаны на рисунке 3.8. Выравнивающая пластина 1 помещалась в диффузор 2 и частично была погружена в выходной патрубок 3 радиального вентилятора 4.



1 – выравнивающая пластина; 2 – диффузор с несимметричным расширением, имеющий разные углы наклона боковых стенок (Д); 3 – выходной патрубок вентилятора; 4 – радиальный вентилятор (ВР); 5 – входной патрубок вентилятора; 6 – всасывающий воздуховод (ВВ); 7 – нагнетательный воздуховод (ВН)

Рисунок 3.8 – Схема экспериментального стенда

Лабораторный стенд разработан на базе радиального вентилятора ВР 80-75-2,5 с частотой вращения рабочего колеса $n=1450$ об/мин. Объемный расход вентилятора измерялся при помощи коллектора К (см. п. 3.1). Сопротивление вентиляционной системы регулировалось дроссель-клапаном ДК.

Для проведения экспериментов было изготовлено несколько диффузоров с разными наклонами боковых стенок для перехода с поперечного сечения выходного патрубка 175×175 мм на поперечное сечение нагнетательного воздуховода 250×250 мм. Расстояние между поперечными сечениями составляло 354 мм, относительная длина диффузора $\bar{l}_d \approx 2,02$, степень расширения $\bar{F}_d \approx 2,04$. Длина

простой пластины и общая длина составной выравнивающих пластин 155 мм. Пластины были изготовлены из тонколистовой стали, имеющей толщину $b_0=0,45$ мм.

На рисунке 3.9 выполнено сравнение типовых аэродинамических характеристик вентилятора, установленных аппроксимацией экспериментальных данных, при размещении конструктивных элементов в диффузорах с несимметричным расширением, имеющих разные наклоны боковых стенок.

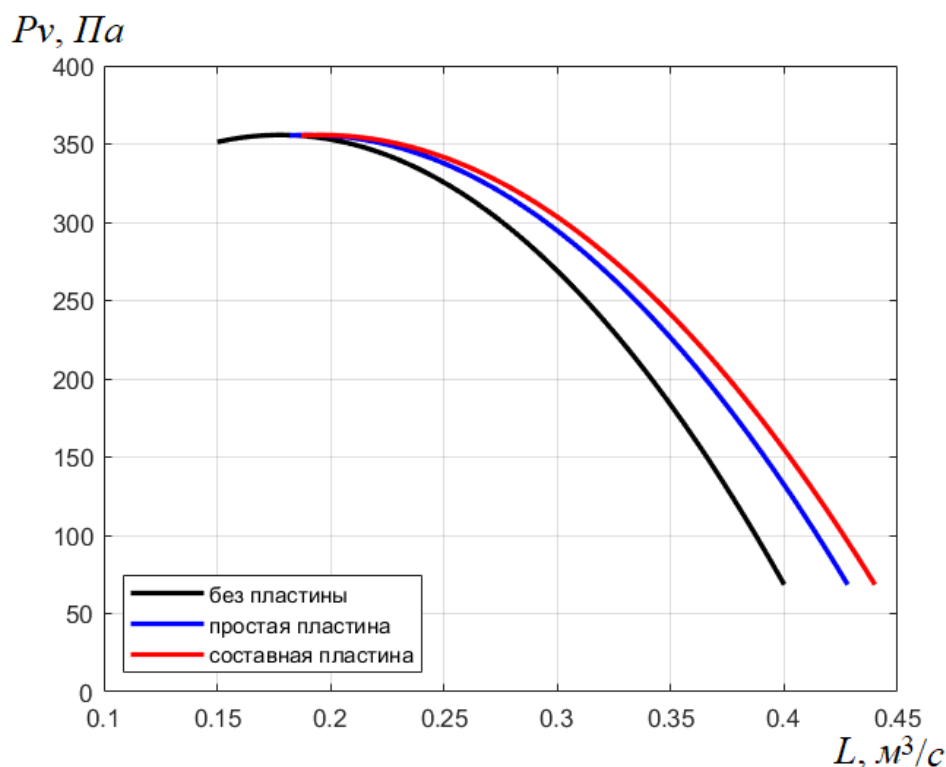


Рисунок 3.9 – Характеристики вентилятора при размещении конструктивных элементов в диффузорах с несимметричным расширением, имеющих разные наклоны боковых стенок

Данные результаты получены для составной пластины, имеющей геометрические размеры и установленной согласно рисунку 3.10, а; для простой пластины, имеющей геометрические размеры и установленной согласно рисунку 3.10, б. При размещении в диффузоре с несимметричным расширением, имеющем разные наклоны боковых стенок, простой пластины повышение производительности составило до 7%, при размещении составной пластины повышение производительности достигало до 10%.

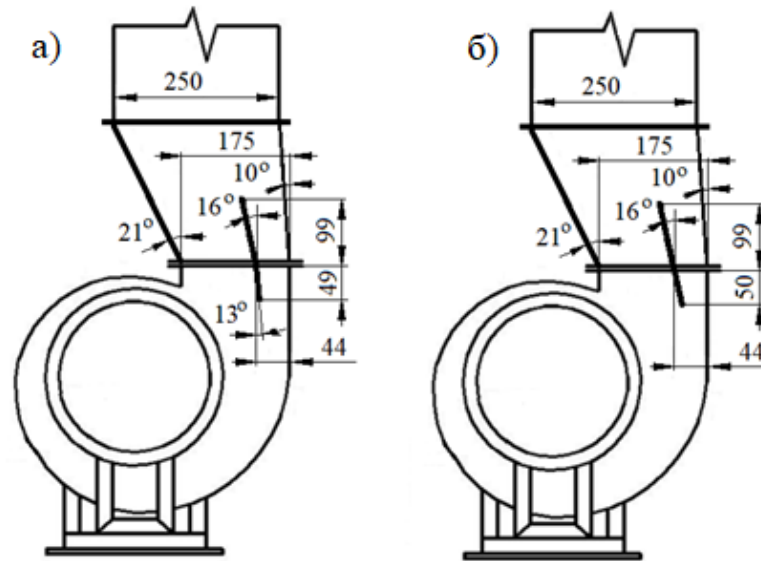


Рисунок 3.10 – Установка выравнивающих пластин
на экспериментальном стенде

Для максимального увеличения производительности вентиляционных систем путем выравнивания потока на выходе радиальных вентиляторов необходимо проведение дальнейших экспериментальных исследований с целью разработки рекомендаций по выбору геометрических размеров и параметров размещения конструктивных элементов в диффузорах с несимметричным расширением, имеющих разные наклоны боковых стенок.

В ходе проведения экспериментальных испытаний проводилась аппроксимация характеристик радиальных вентиляторов полиномом второго порядка с применением программного обеспечения пакета прикладных программ MATLAB. Для полного давления вентилятора и его КПД рассматривались аппроксимационные зависимости представлялись в следующем виде

$$P_v(L) = a + bL + cL^2; \quad (3.21)$$

$$\eta(L) = A + BL + CL^2, \quad (3.22)$$

где a, b, c, A, B, C – коэффициенты аппроксимации.

Для аппроксимации трехчленом аэродинамических характеристик радиальных вентиляторов была разработана программа *approx* с использованием встроенной процедуры *polyfit* пакета прикладных программ MATLAB.

В диссертационной работе проверка адекватности осуществлялась для аппроксимационных характеристик вентилятора. Значения критерия Фишера $F \leq 1,55$ не превышали табличного $F_m \approx 1,81$ при доверительной вероятности $\vartheta = 0,95$, что позволило считать полученные характеристики и зависимости адекватными.

3.4 Экспериментальные исследования аэродинамических характеристик вентиляционных систем со струйными регулирующими устройствами

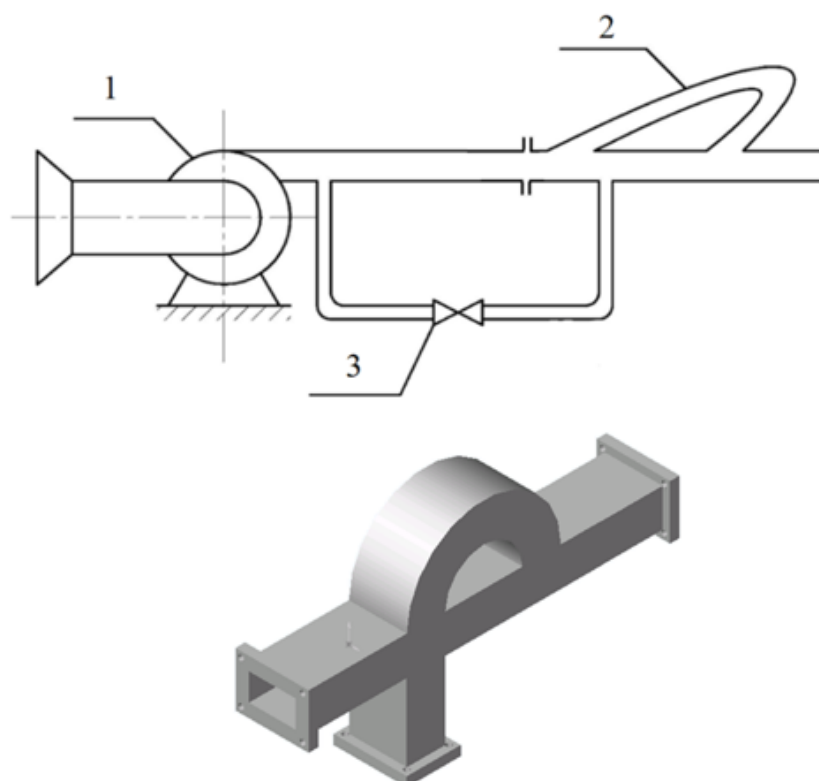
Лабораторные стенды разрабатывались согласно типовым схемам вентиляционных систем со струйными регулирующими устройствами, рассмотренных в разделе 2. Схема вентиляционной системы со струйным регулирующим устройством на выходе вентилятора (в линии нагнетания) и макет струйного устройства показаны на рисунке 3.11. Схема вентиляционной системы со струйным регулирующим устройством на входе вентилятора (в линии всасывания) и макет струйного устройства представлены на рисунке 3.12. На схемах показаны: 1 – вентилятор; 2 – струйное регулирующее устройство; 3 – дроссель.

Для измерения расхода вентилятора L в вентиляционной системе со струйным регулирующим устройством в линии нагнетания применялся коллектор, установленный во всасывающем воздуховоде. Для измерения величины расхода вентилятора L в вентиляционной системе со струйным регулирующим устройством в линии всасывания использовался коллектор, также установленный во всасывающем воздуховоде.

Для определения расхода L_s в вентиляционной системе применялся подход, основанный на ряде замеров скорости в характерных точках мерного сечения. Мерное сечение выбиралось согласно рассмотренным в п. 3.1 рекомендациям. Для замеров скорости использовалась пневмометрическая трубка Пито-Прандтля. По

полученным значениям скоростей находилось их усредненное (среднеарифметическое) значение. Величина расхода устанавливалась по вычисленному усредненному значению скорости. Значение расхода L_b в байпасной линии определялось как разница значений расхода L вентилятора и расхода L_s в системе

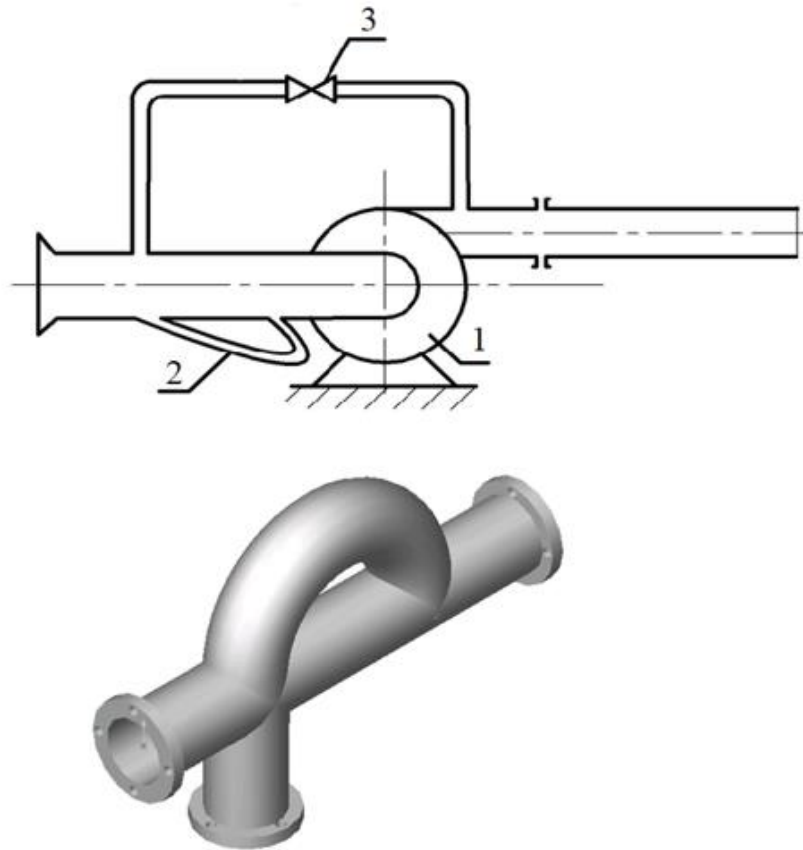
$$L_b = L - L_s. \quad (3.23)$$



1 – вентилятор; 2 – струйное регулирующее устройство; 3 - дроссель

Рисунок 3.11– Струйное регулирующее устройство в линии нагнетания и макет струйного устройства

Значения коэффициентов полинома второго порядка (3.21) и (3.22) аппроксимационных зависимостей для полного давления и КПД вентилятора от расхода составили (единицы измерения в системе СИ): $a=171,7 \text{ Па}$; $b=2,07 \cdot 10^3 \text{ Па}/(\text{м}^3/\text{с})$; $c= - 5,82 \cdot 10^3 \text{ Па}/(\text{м}^3/\text{с})^2$.



1 – вентилятор; 2 – струйное регулирующее устройство; 3 - дроссель
 Рисунок 3.12 – Струйное регулирующие устройство в линии всасывания
 и макет струйного устройства

Величина КПД вентилятора определялась по экспериментальным данным выражением

$$\eta_v = N_{пол} / N_{потр}; \quad (3.24)$$

где $N_{пол}$ – полезная мощность вентилятора;

$N_{потр}$ – мощность, потребляемая вентилятором.

По величине полного давления и расхода вентилятора рассчитывалась его полезная мощность

$$N_{пол} = P_v L. \quad (3.25)$$

По показаниям прибора К-505 (см. комплект измерительный в п. 3.1) выполнялась оценка мощности, потребляемой вентилятором.

Экспериментальные исследования вентиляционных систем со струйными регулирующими устройствами носили, прежде всего, качественный характер и показали эффективность использования струйных устройств для регулирования расхода в системе.

На основании предложенного критерия энергетической эффективности регулирования аэродинамических характеристик вентиляционных систем (2.52) установлено наличие диапазона эффективного применения байпасного способа регулирования в схеме вентиляционной системы со струйным регулирующим устройством на входе вентилятора ВР 80-75-2,5. В диапазоне расходов вентилятора от 0,32 до 0,37 м³/с имело место снижение потребляемой мощности более 5% при расходе в байпасном канале до 0,5 от значения расхода вентилятора.

Выполненные экспериментальные исследования подтверждают целесообразность выбора направления для повышения надежности ОВС за счет использования струйных регулирующих устройств, которые лишены влияния влажности, загрязненности, химической агрессивности рабочей среды, вибраций, резких перепадов температуры.

Кроме нечувствительности к перечисленным выше факторам, данные устройства имеют более высокую надежность и долговечность, а также меньшую материалоемкость, благодаря отсутствию подвижных механических частей.

Выводы по третьему разделу

По результатам экспериментальных исследований аэротермодинамических характеристик рабочих процессов вентиляционных систем можно сделать следующие выводы:

1. Рассмотрена методика обработки опытных данных, а также проверки адекватности расчетных зависимостей аэродинамических характеристик.

2. Разработан экспериментальный стенд и выполнены исследования по влиянию конструктивных элементов для выравнивания потока на выходе радиального вентилятора на его аэродинамические характеристики. Выполненные

исследования показали возможность повышения производительности вентиляционных систем путем размещения конструктивных элементов в диффузорах с несимметричным расширением, имеющих разные наклоны боковых стенок. В качестве конструктивных элементов были рассмотрены простая и составная выравнивающие пластины.

3. Для достижения максимального повышения производительности вентиляционных систем путем выравнивания потока на выходе радиальных вентиляторов необходимо проведение дальнейших экспериментальных исследований с целью разработки рекомендаций по выбору геометрических размеров и параметров размещения конструктивных элементов в диффузорах с несимметричным расширением, имеющих разные наклоны боковых стенок.

4. Выполнена проверка адекватности для аппроксимационных характеристик вентилятора. Значения критерия Фишера $F \leq 1,55$ не превышали табличного $F_m \approx 1,81$ при доверительной вероятности $\vartheta = 0,95$, что позволило считать полученные характеристики и зависимости адекватными.

5. Разработаны экспериментальные стенды и выполнены исследования аэродинамических характеристик вентиляционных систем со струйными регулирующими устройствами, которые показали эффективность их использования для регулирования расхода в системе. На основании предложенного критерия энергетической эффективности регулирования аэродинамических характеристик для параметров лабораторного стенда показано наличие диапазона эффективного применения байпасного способа регулирования в схеме вентиляционной системы со струйным регулирующим устройством на входе вентилятора. В диапазоне расходов вентилятора от $0,32$ до $0,37 \text{ м}^3/\text{с}$ имело место снижение потребляемой мощности более 5% при расходе в байпасном канале до $0,5$ от значения расхода вентилятора.

6. Адекватные аппроксимационные зависимости для полного давления и КПД вентилятора от расхода, а также экспериментально подтвержденный критерий энергетической эффективности байпасного способа регулирования аэродинамических характеристик вентиляционных систем положены в основу дальнейших исследований для повышения эффективности ОВС.

7. Результаты экспериментальных исследований аэротермодинамических характеристик рабочих процессов отопительно-вентиляционных систем представлены в работах [65, 100, 101, 102].

РАЗДЕЛ 4

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОТОПИТЕЛЬНО-ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ СИСТЕМ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕМ ПРОЦЕССОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ

4.1 Повышение производительности вентиляционных систем с радиальными вентиляторами

Численное моделирование турбулентного потока в диффузоре, непосредственно размещенного на выходе радиального вентилятора, убедительно показывает значительную неоднородность структуры воздушного потока. Распределение скоростей является несимметричным и существенно неравномерным. Это вызывает потери энергии, а следовательно, и снижение в целом производительности вентиляционной системы. Для уменьшения потерь давления необходимо обеспечить безотрывное течение в диффузоре и снизить вихреобразование, что возможно выравниванием потока на его входе и выходе. Поэтому важным направлением повышения эффективности ОВС является дальнейшее развитие методов выравнивания потока в элементах соединения воздухопроводов с выходными патрубками радиальных вентиляторов, что обеспечивает повышение производительности вентиляционных систем.

Выполненные в разделе 3 исследования показали возможность повышения производительности вентиляционных систем путем размещения конструктивных элементов в диффузорах с несимметричным расширением, имеющих разные наклоны боковых стенок. В качестве конструктивных элементов были рассмотрены простая и составная выравнивающие пластины. Для достижения максимального повышения производительности вентиляционных систем путем выравнивания потока на выходе радиальных вентиляторов необходимо проведение дальнейших экспериментальных исследований с целью разработки рекомендаций по выбору геометрических размеров и параметров размещения конструктивных

элементов в диффузорах с несимметричным расширением, имеющих разные наклоны боковых стенок.

Геометрические размеры и размещение составной и простой выравнивающих пластин в диффузоре с несимметричным расширением показано соответственно на рисунках 4.1 и 4.2.

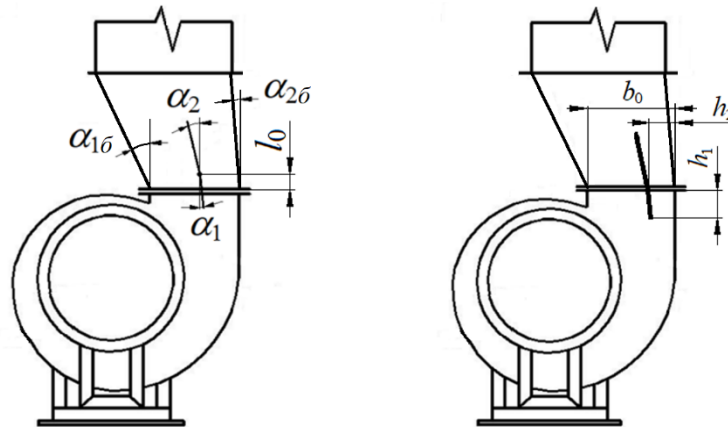


Рисунок 4.1 – Установка составной пластины в диффузоре с несимметричным расширением, имеющем разные наклоны боковых стенок

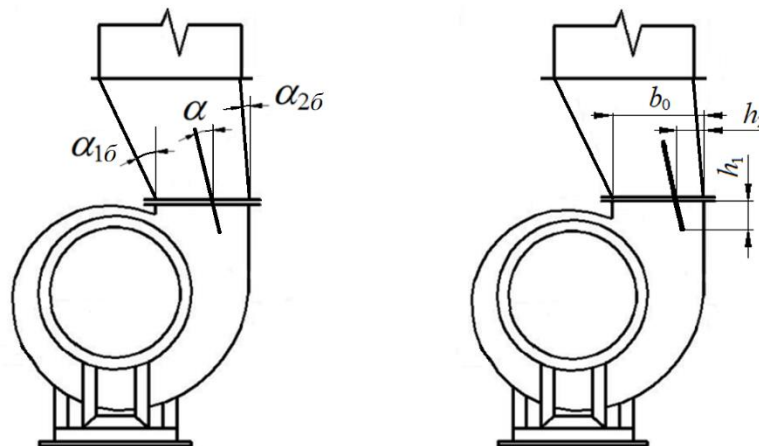


Рисунок 4.2 – Установка составной пластины в диффузоре с несимметричным расширением, имеющем разные наклоны боковых стенок

Положение составной и простой выравнивающей пластины в диффузоре с несимметричным расширением, имеющим разные наклоны боковых стенок, характеризуется рядом геометрических параметров.

Сразу отметим влияние такого геометрического параметра, как расположение точки изгиба составных частей пластины l_0 (рисунок 4.1). Проведенные экспериментальные исследования показали, что в диапазоне значений $l_0 = \pm 0,05b_0$ влияние данного параметра на производительность вентилятора является несущественным, а при больших значениях приводит к заметному снижению влияния составной выравнивающей пластины на повышение производительности. Это согласуется с результатами исследований, проведенными для несимметричного диффузора с прямым боковым каналом [10]. В этой связи, в дальнейших исследованиях было принято выполнять точку изгиба составной пластины на линии присоединения выходного патрубка к диффузору.

Введем следующие обозначения геометрических размеров и параметров размещения составной выравнивающей пластины в диффузоре с несимметричным расширением, имеющим разные наклоны боковых стенок (рисунок 4.1):

α_1 – угол между передней частью пластины и нормалью к поперечному сечению диффузора согласно рисунку 4.1;

α_2 – угол между задней частью пластины и нормалью к поперечному сечению диффузора согласно рисунку 4.1;

h_1 – глубина погружения передней части пластины;

h_2 – расстояние от кожуха вентилятора до точки изгиба пластины согласно рисунку 4.1;

b – суммарная длина наклонных частей составной пластины.

Расположение простой выравнивающей пластины (рисунок 4.2) в диффузоре с несимметричным расширением, имеющим разные наклоны боковых частей, характеризуется аналогичными параметрами h_1 и h_2 , одним углом наклона α пластины к нормали поперечного сечения выходного патрубка радиального вентилятора, а также длиной пластины b .

На рисунках 4.1 и 4.2 обозначены $\alpha_{1\delta}$ и $\alpha_{2\delta}$ – углы наклона соответственно левой и правой боковых стенок диффузора с несимметричным расширением. Боковые стенки диффузора могут быть направлены как в одну сторону от нормали к поперечному сечению выходного патрубка вентилятора, так в и в разные стороны, также одна из стенок может быть прямой, т.е. направленной по нормали (рисунок 4.3).

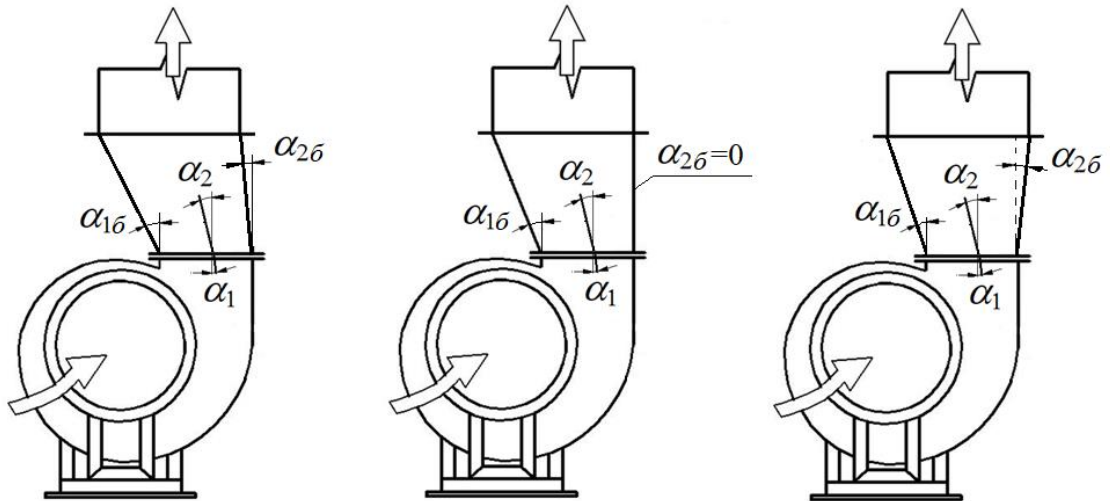


Рисунок 4.3 – Диффузор с несимметричным расширением, имеющий разные наклоны боковых стенок

При разработке рекомендаций по выбору геометрических размеров и параметров размещения конструктивных элементов в диффузорах с несимметричным расширением рассматривались безразмерные параметры:

$$\bar{h}_1 = h_1/b_0, \quad (4.1)$$

$$\bar{h}_2 = h_2/b_0, \quad (4.2)$$

$$\bar{b} = b/b_0, \quad (4.3)$$

где b_0 – характерный размер, в качестве которого принималась длина стороны выходного патрубка вентилятора (рисунки 4.1 и 4.2).

При выполнении лабораторных испытаний оценка рекомендуемых геометрических размеров и параметров размещения конструктивных элементов в диффузорах проводилась для режимов работы вентилятора в зоне его максимального КПД. Разработаны рекомендации по выбору геометрических размеров и параметров размещения конструктивных элементов в диффузорах с несимметричным расширением, имеющих разные наклоны боковых стенок, что обеспечивает повышение производительности вентиляционных систем.

Так, что суммарная длина наклонных частей составной пластины и длина простой пластины рекомендована в диапазоне безразмерного параметра $\bar{b} = 0,7...1,1$.

Оптимальными принято считать диапазоны безразмерных параметров погружения в выходной патрубков и расположения от наружной стороны патрубка: для составной пластины

$$\bar{h}_1 = 0,25...0,35; \bar{h}_2 = 0,2...0,3; \quad (4.4)$$

для простой выравнивающей пластины

$$\bar{h}_1 = 0,3...0,4; \bar{h}_2 = 0,25...0,35. \quad (4.5)$$

При использовании составной выравнивающей пластины в случае наклона в одну сторону боковых стенок диффузора рекомендуемый угол наклона передней части по потоку составляет

$$\alpha_1 = (\alpha_{1\bar{\delta}} + \alpha_{2\bar{\delta}})/4, \quad (4.6)$$

задней по потоку

$$\alpha_2 = (\alpha_{1\bar{\delta}} + \alpha_{2\bar{\delta}})/2; \quad (4.7)$$

в случае наклона в разные стороны боковых стенок

$$\alpha_1 = (\alpha_{1\bar{\delta}} - \alpha_{2\bar{\delta}})/4, \quad (4.8)$$

$$\alpha_2 = (\alpha_{1\bar{\delta}} - \alpha_{2\bar{\delta}})/2. \quad (4.9)$$

При использовании простой выравнивающей пластины в случае наклона в одну сторону боковых стенок диффузора рекомендуемый угол наклона пластины составляет

$$\alpha = (\alpha_{1\delta} + \alpha_{2\delta})/2; \quad (4.10)$$

в случае наклона в разные стороны боковых стенок

$$\alpha = (\alpha_{1\delta} - \alpha_{2\delta})/2. \quad (4.11)$$

В диффузоре с несимметричным расширением, имеющим разные наклоны боковых частей, для диапазона номинальных режимов работы вентилятора при рекомендуемых геометрических размерах и параметрах размещения конструктивных элементов относительное повышение расхода составляет от 6% до 10% при использовании простой выравнивающей пластины и от 8% до 12% при использовании составной выравнивающей пластины.

Необходимо отметить, что при экспериментальных исследованиях аэродинамических характеристик вентиляционных систем с диффузорами с несимметричным расширением, имеющих разные наклоны боковых стенок, не был организован и проведен многофакторный эксперимент по влиянию геометрических размеров и параметров размещения простой и составной выравнивающих пластин на производительность радиального вентилятора. Это было обусловлено большим количеством факторов, оказывающих влияние на выравнивание потока в выходном патрубке вентилятора и присоединенном диффузоре. Учет большинства факторов значительно бы усложнил проведение и повысил трудоемкость экспериментальных исследований. Кроме того, дополнительные сложности вызывает изменение структуры потока внутри и на выходе вентилятора при изменении его рабочих параметров, что приводит к неоднозначному влиянию геометрических размеров и параметров размещения конструктивных элементов на результаты измерений аэродинамических характеристик.

4.2 Методика оценки возможности эффективного использования байпасного способа регулирования аэродинамических характеристик вентиляционных систем

Сформулированный в разделе 2 критерий энергетической эффективности регулирования аэродинамических характеристик вентиляционных систем позволяет предложить методику оценки возможности эффективного использования байпасного способа регулирования по начальному (максимальному) расходу, установленному в системе.

Подставим в критерий (2.48) выражения относительного изменения расхода, полного давления и КПД вентилятора при открытии байпасной линии (см. рисунок 2.7)

$$\frac{\Delta L}{L_0} + \frac{\Delta P_v}{P_0} \leq \frac{\Delta \eta}{\eta_0}. \quad (4.12)$$

Как ранее было обозначено, здесь P_0 , η_0 – значения полного давления и КПД вентилятора при начальном расходе L_0 .

Используя разложение в ряд Тейлора функций $P_v(L)$ и $\eta(L)$ с отбрасыванием членов второго порядка и выше, выразим приращения ΔP_v и $\Delta \eta$ следующим образом

$$\Delta P_v = \left. \frac{\partial P_v}{\partial L} \right|_{L=L_0} \cdot \Delta L; \quad (4.13)$$

$$\Delta \eta = \left. \frac{\partial \eta}{\partial L} \right|_{L=L_0} \cdot \Delta L. \quad (4.14)$$

Проведенные в разделе 3 экспериментальные исследования показали, что достаточную точность (до 5%) обеспечивает аппроксимация зависимостей для полного давления и КПД вентилятора от расхода полиномами второго порядка соответственно (3.21), (3.22).

Определим входящие в уравнения (4.13) и (4.14) производные для функций $P_v(L)=a + bL + cL^2$ и $\eta(L)=A + BL + CL^2$

$$\left. \frac{\partial P_v}{\partial L} \right|_{L=L_0} = b + 2cL_0; \quad (4.15)$$

$$\left. \frac{\partial \eta}{\partial L} \right|_{L=L_0} = B + 2CL_0. \quad (4.16)$$

Подставляя (4.15), (4.16), $P_0 = a + bL_0 + cL_0^2$, $\eta_0 = A + BL_0 + CL_0^2$ в (4.12) и сокращая обе части выражения на ΔL , получаем следующее условие энергетической эффективности байпасного способа регулирования

$$\frac{1}{L_0} + \frac{b + 2cL_0}{a + bL_0 + cL_0^2} \leq \frac{B + 2CL_0}{A + BL_0 + CL_0^2}. \quad (4.17)$$

или другом виде

$$\frac{1}{L_0} + \frac{b + 2cL_0}{a + bL_0 + cL_0^2} - \frac{B + 2CL_0}{A + BL_0 + CL_0^2} \leq 0. \quad (4.18)$$

Таким образом, выполнение условия (4.18) показывает возможность эффективного использования байпасного способа регулирования аэродинамических характеристик вентиляционных систем для заданного начального (максимального) расхода в системе.

Условие (4.18) удобно как для оценки эффективности по заданному расходу, так и для оценки расхода, начиная с которого достигается эффективное байпасное регулирование. Последнее удобно выполнить нахождением точки пересечения с осью абсцисс функции $F_b(L)$, представляющей собой левую часть (4.18),

$$F_b(L) = \frac{1}{L} + \frac{b + 2cL}{a + bL + cL^2} - \frac{B + 2CL}{A + BL + CL^2}. \quad (4.19)$$

Выполним апробацию предложенной методики на примере лабораторного стенда для исследования аэродинамических характеристик вентиляционной системы со струйными регулирующими устройствами (см. п. 3.4).

Аппроксимационные характеристики для аэродинамических характеристик вентилятора в системе СИ (давление – Па, расход – м³/с) имеют вид

$$P_v = 171,7 + 2,07 \cdot 10^3 L - 5,82 \cdot 10^3 L^2; \quad (4.20)$$

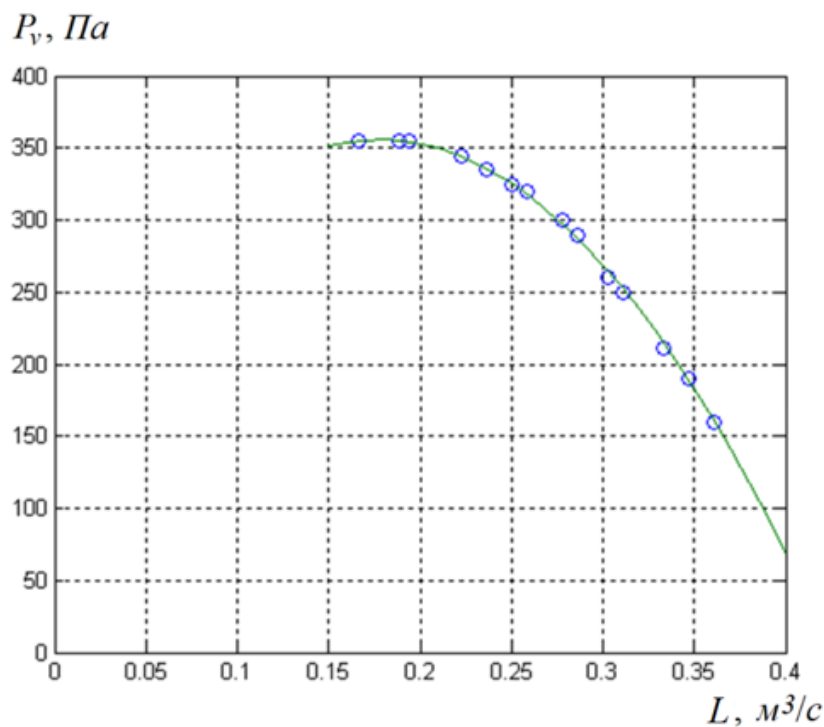
$$\eta = 0,0096 + 6,31 L - 13,3 L^2. \quad (4.21)$$

Для выполнения дальнейших вычислений имеем следующие коэффициенты аппроксимации

$$a=171,7 \text{ Па}; b=2,07 \cdot 10^3 \text{ Па}/(\text{м}^3/\text{с}); c= - 5,82 \cdot 10^3 \text{ Па}/(\text{м}^3/\text{с})^2; \quad (4.22)$$

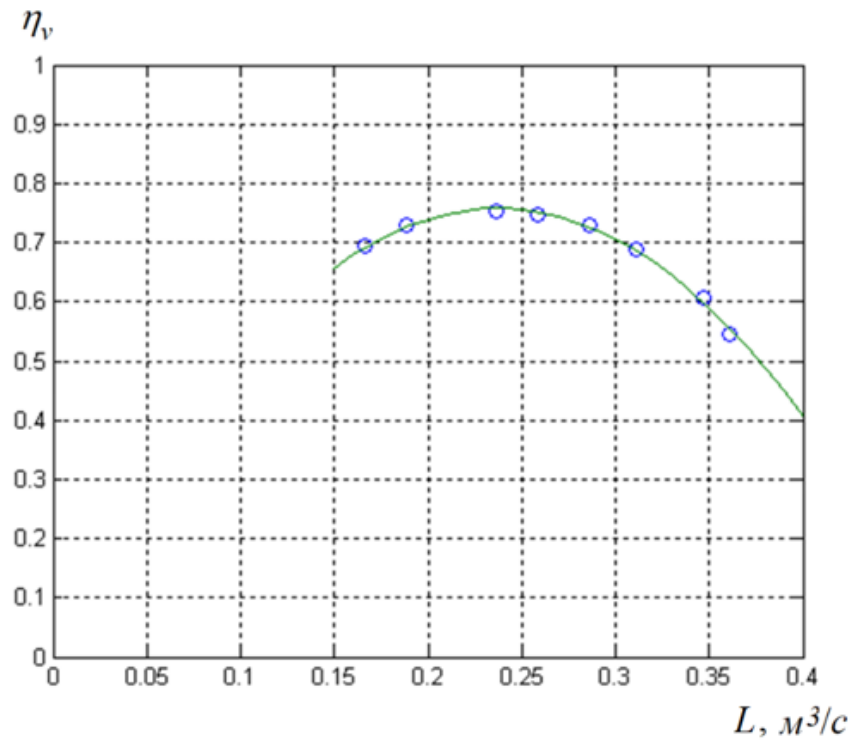
$$A=0,0096; B=6,31 (\text{м}^3/\text{с})^{-1}; C= - 13,3 \cdot 10^3 (\text{м}^3/\text{с})^{-2}. \quad (4.23)$$

Зависимости для полного давления вентилятора и его КПД показаны на рисунках 4.4, 4.5 соответственно.



○ – опытные данные, — – аппроксимация

Рисунок 4.4 – Полное давление вентилятора



○ – опытные данные, — – аппроксимация

Рисунок 4.5 – КПД вентилятора

Проверочный расчет по условию (4.18) подтверждает экспериментальные результаты снижения потребляемой мощности более 5% при расходе в байпасном канале до 0,5 от значения расхода вентилятора, полученные на лабораторном стенде со струйными регулирующими устройствами для диапазона расходов вентилятора от 0,32 до 0,37 $\text{м}^3/\text{с}$.

Определение точки пересечения вспомогательной функции $F_b(L)$ с осью абсцисс (рисунок 4.6) также показывает возможность эффективного байпасного регулирования при расходе от 0,32 $\text{м}^3/\text{с}$ и более.

Таким образом, на основе сформулированного в разделе 2 критерия энергетической эффективности регулирования аэродинамических характеристик вентиляционных систем предложена методика оценки возможности эффективного использования байпасного способа регулирования по начальному (максимальному) расходу в системе. Методика включает процедуру аппроксимации полного давления вентилятора и его КПД полиномами второго порядка.

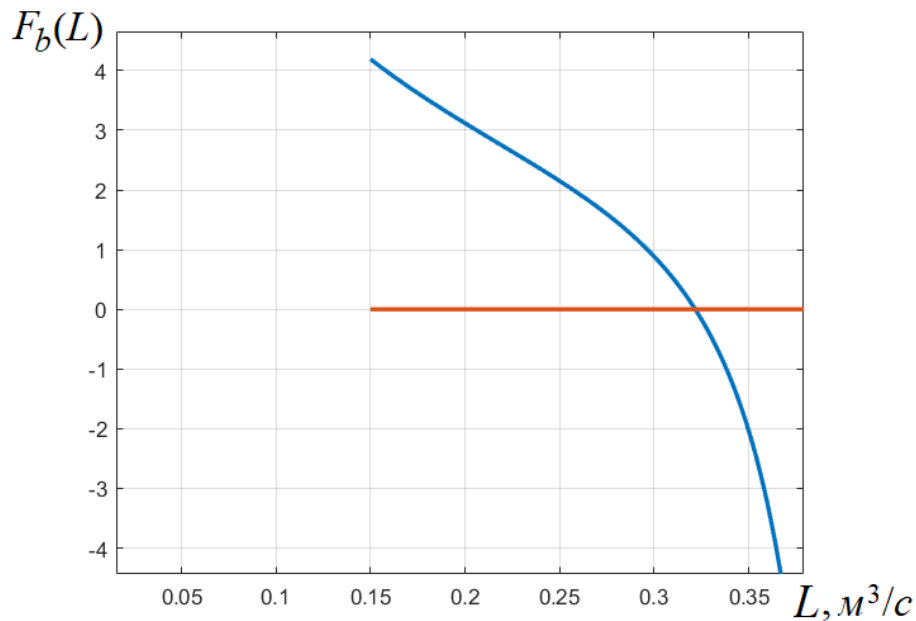


Рисунок 4.6 – К оценке возможности эффективного использования байпасного способа регулирования

4.3 Совершенствование процессов регулирования отопительно-вентиляционных систем на основе адаптивного прогнозирующего управления

Основное направление диссертационной работы – повышение эффективности ОВС за счет совершенствования процессов регулирования аэротермодинамических характеристик. Совершенствование процессов регулирования ОВС может быть достигнуто разработкой САУ, обеспечивающих улучшение показателей качества регулирования параметров ОВС на основе алгоритмов и методов оптимального управления.

Разработанная в разделе 2 математическая модель комбинированной ОВС как объекта автоматического управления температурным режимом в помещении, позволяет синтезировать САУ воздушным отоплением с различными регуляторами расхода и температуры приточного воздуха.

4.3.1 Постановка задачи управления комбинированной отопительно-вентиляционной системой

Вопрос совершенствования процессов регулирования комбинированной ОВС рассмотрен на примере административного помещения, в котором заданный температурный режим в осенне-весенний период поддерживается путем изменения объема и температуры приточного воздуха (рисунок 4.7). Описание рабочего процесса в ОВС и обозначения переменных на рисунке рассмотрены в п. 2.1.1.

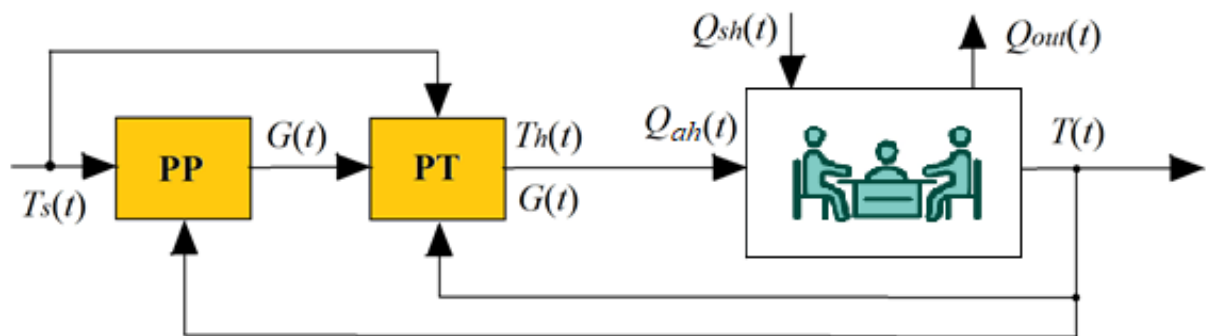


Рисунок 4.7 – К постановке задачи автоматического управления ОВС

Для адаптивного прогнозирующего управления ОВС планируется в общем случае рассматривать различные регуляторы для регулирования расхода и температуры приточного воздуха.

Для параметрической идентификации математической модели аэротермодинамических характеристик рабочих процессов в обслуживаемом помещении предварительно проведены экспериментальные исследования изменения температуры при подаче нагретого приточного воздуха. Результаты измерения температуры T во времени t в значимой (рабочей) зоне с шагом 60 с, выполненные при подаче теплового потока мощностью 2,52 кВт от ОВС в помещение объемом 134,4 м³, представлены на рисунке 4.8.

Согласно обоснованных рекомендаций (см. п. 2.1.2) выполнена структурная идентификация рабочего процесса аperiodическим звеном второго порядка с

запаздываем. Для упрощения процедуры параметрической идентификации полученные экспериментальные данные приводим к безразмерному виду

$$\bar{T}(t) = \frac{T(t) - T(0)}{T_{уст} - T(0)}, \quad (4.24)$$

где $T(0)$, $T_{уст}$ – начальное и установившееся значение температуры в рабочей зоне (для условий проведения эксперимента $T(0)=15,8\text{ }^{\circ}\text{C}$. $T_{уст}=21,1\text{ }^{\circ}\text{C}$).

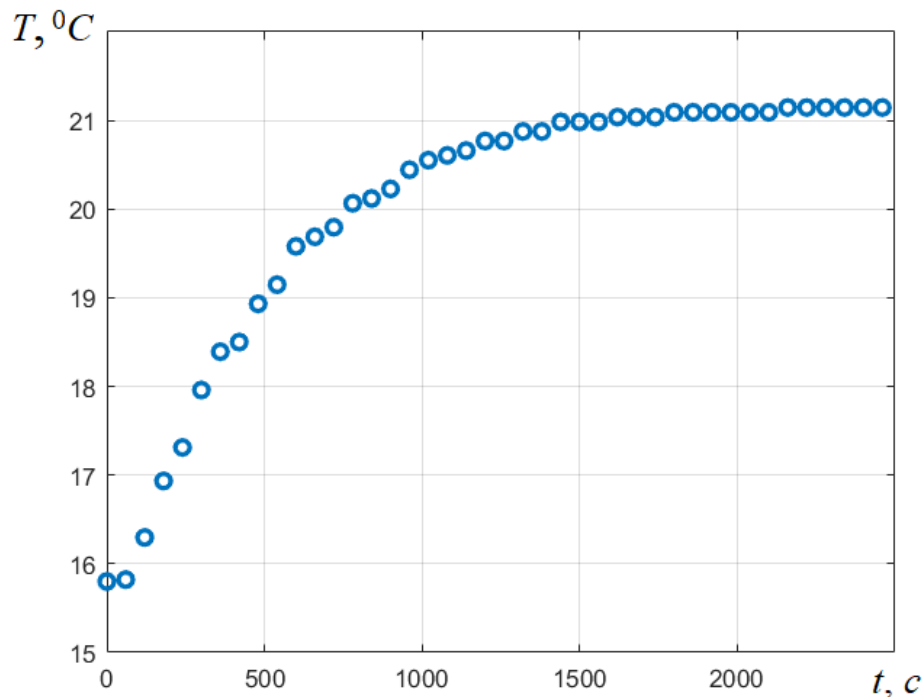


Рисунок 4.8 – Результаты измерения температуры

Изменение безразмерной температуры в значимой (рабочей) зоне показано на рисунке 4.9.

Для полученной зависимости $k = 1$, а задача параметрической идентификации сводится к задаче поиска минимума функции суммы квадратичных отклонений расчетных (2.36) и экспериментальных значений (4.24) для трех переменных τ , T_1 , и T_2 . Результаты расчета в среде пакета прикладных программ MATLAB с помощью встроенной функции *fminsearch* дают следующие результаты: $T_1=25,8\text{ }c$; $T_2=457\text{ }c$; $\tau=49,7\text{ }c$.

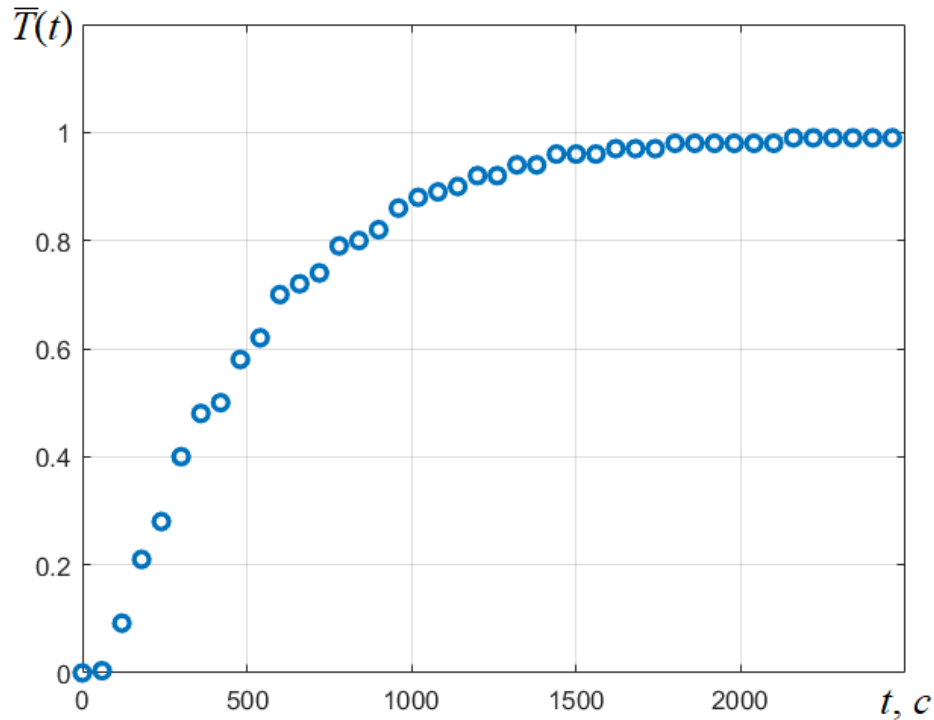


Рисунок 4.9 – Безразмерная температура

Таким образом, передаточная функция для температуры в рабочей зоне рассматриваемого административного помещения по тепловой мощности имеет следующий вид

$$W(s) = \frac{e^{-49,7s}}{(25,8s + 1)(457s + 1)} \quad (4.25)$$

или

$$W(s) = \frac{e^{-49,7s}}{1,179 \cdot 10^4 s^2 + 4,828 \cdot 10^2 s + 1} \quad (4.26)$$

Наличие передаточной функции позволяет оценить динамические характеристики объекта регулирования, в частности, рассчитать переходной процесс согласно аналитического выражения (2.36).

С точки зрения адаптивного прогнозирующего управления передаточная функция (4.25) является прогнозирующей моделью объекта управления для синтеза САУ с использованием MPC-регулятора (см. п. 1.2.1).

4.3.2 Синтез двухконтурной системы автоматического управления воздушным отоплением с МРС-регулятором

Безразмерное отклонение заданной температуры в помещении от стационарного значения T_0 введем аналогично безразмерным отклонениям температуры в помещении (2.11) и температуры наружного воздуха (2.25)

$$\Delta\bar{T}_s(t) = \Delta T_s(t) / (T_0 - T_{out}^0). \quad (4.27)$$

Согласно (2.1) рассогласование безразмерных отклонений заданной температуры и температуры в помещении, преобразованных по Лапласу,

$$\varepsilon(s) = T_s(s) - T(s). \quad (4.28)$$

Поскольку в комбинированной ОВС заданный температурный режим поддерживается путем изменения объема и температуры приточного воздуха, то производим синтез двухконтурной САУ воздушным отоплением и в общем случае рассматриваем различные регуляторы для регулирования расхода и температуры приточного воздуха

$$G(s) = W_{cG}(s) \underline{\varepsilon}(s); \quad (4.29)$$

$$T_h(s) = W_{cT}(s) \underline{\varepsilon}(s), \quad (4.30)$$

где $W_{cG}(s)$, $W_{cT}(s)$ – передаточные функции регулятора расхода и регулятора температуры.

Согласно (4.28-4.30) и рисунка 2.4 получаем структурную схему двухконтурной САУ воздушным отоплением, представленную на рисунке 4.10.

На основании полученной структурной схемы разработана САУ с МРС-регулятором расхода и ПИД-регулятором температуры приточного воздуха, которая представлена блок-диаграммой в среде Simulink пакета прикладных программ MATLAB. Блок-диаграмма двухконтурной САУ воздушным отоплением приведена на рисунке 4.11.

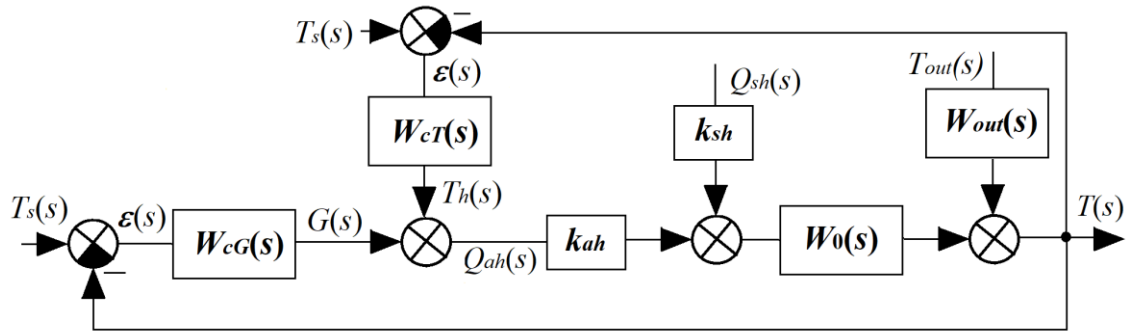


Рисунок 4.10 – Структурная схема двухконтурной САУ

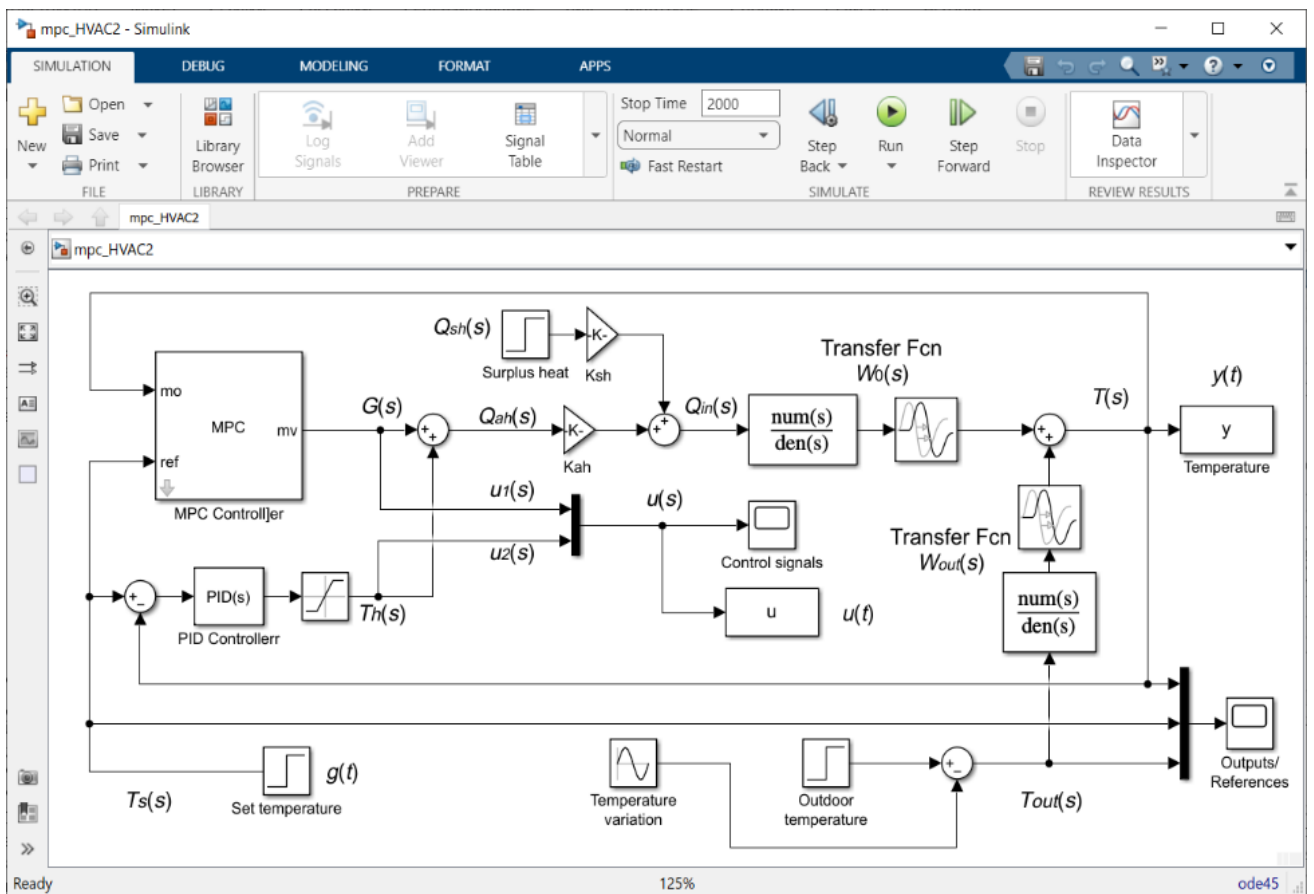


Рисунок 4.11 – Блок-диаграмма

Блок-диаграмма предусматривает моделирование САУ при различных воздействиях и их комбинациях. Предусмотрено исследование системы при воздействии входного сигнала заданной температуры в помещении $T_s(s)$. Также имеется возможность моделирования поведения системы при изменении температуры

наружного воздуха $T_{out}(s)$ как при скачкообразном, так и при колебательном характере ее изменения. Кроме того, предусмотрен анализ воздействия изменения дополнительных теплоизбытков в помещении $Q_{sh}(s)$.

Для синтеза MPC-регулятора в пакете прикладных программ MATLAB использован набор программных инструментов Model Predictive Control Toolbox [115]. С этой целью в командной строке MATLAB предварительно была задана безразмерная передаточная функция объекта управления

```
>> Kah=0.8; plant=tf(Kah, [1.179e4 4.828e2 1], 'IODelay', 49.7);
```

Отметим, что коэффициент k_{ah} согласно (2.16) показывает долю тепlopоступлений от приточной вентиляционной системы VAV в теплоснабжении обслуживаемого помещения при стационарном режиме работы.

Проектирование MPC-регулятора и задание его ограничений осуществлялось следующими командами в главном окне MATLAB

```
>> mpcobj=mpc(plant,1,800,300);
>> mpcobj.MV=struct('Min',-1,'Max',2);
```

Период квантования принят равным $\Delta T = 1$ с, горизонт прогнозирования $N_p=800$ шагов, горизонт управления $N_c=300$ шагов. Минимальное значение управляющего сигнала $u(t)_{min} = -1$ соответствует полному закрытию терминала VAV ($G(t)=0$). Максимальное значение $u(t)_{max} = 2$ отвечает массовому расходу воздуха на выходе терминала VAV, которое в 2 раза больше массового расхода G_0 в условно стационарном режиме работы ОВС.

На рисунке 4.12 приведен скриншот окна MPC Designer, полученный в Simulink пакета прикладных программ MATLAB, где показан результат расчета выходного параметра MV1 для MPC-регулятора. Данный параметр в соответствии с блок-диаграммой (рисунок 4.11) есть управляющий сигнал $u(t)$ на терминал VAV.

Моделирование процессов регулирования аэротермодинамических характеристик ОВС показало, что для эффективного применения MPC-регулятора необходимо рациональное задание его настроечных параметров.

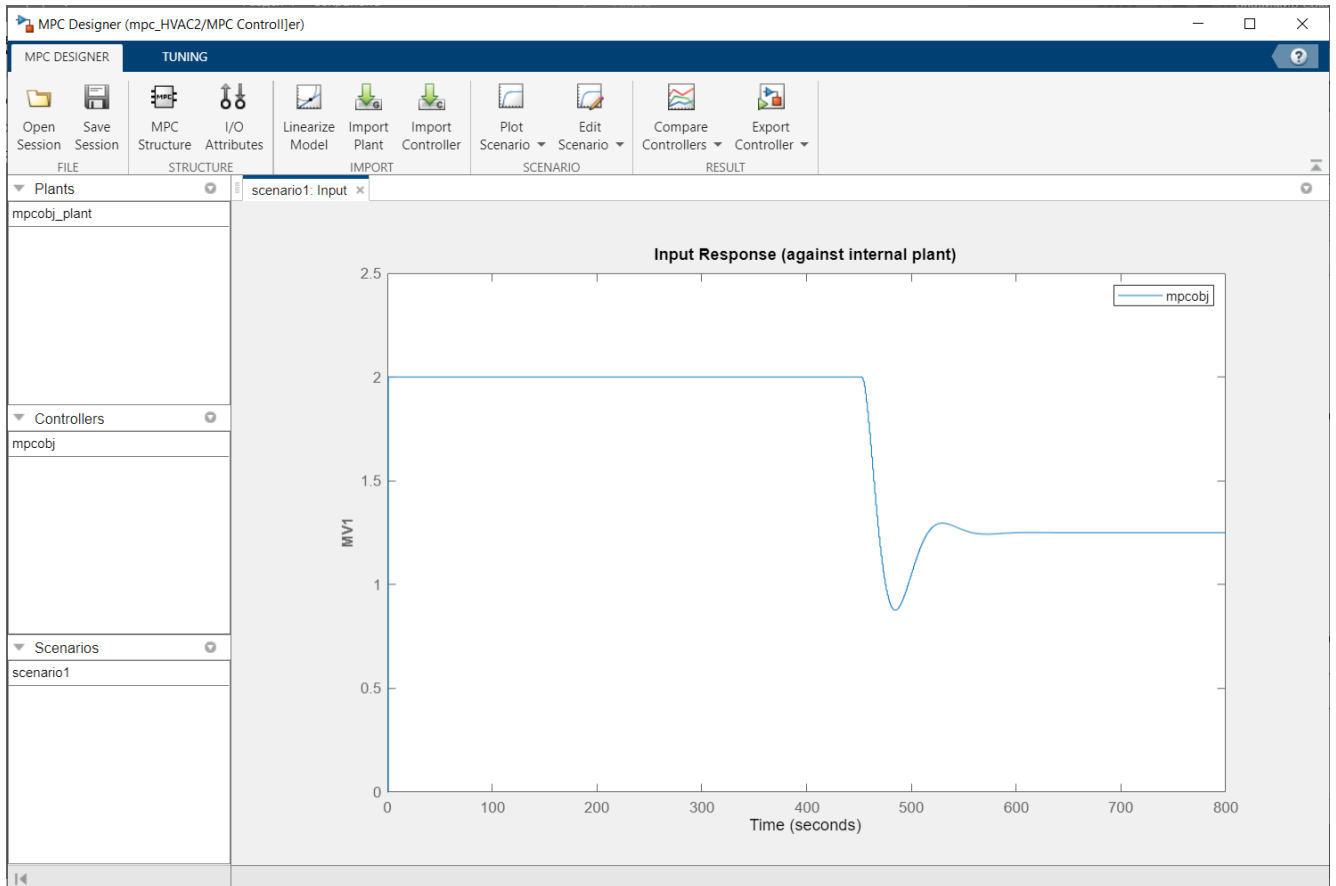


Рисунок 4.12 – Результат расчета MPC- регулятора в MPC Designer

Основными настроечными параметрами MPC-регулятора рассматриваются горизонт предсказания N_p , горизонт управления N_c и период квантования ΔT (рисунок 4.13). Данные параметры оказывают заметное влияние на ход процесса регулирования. От них зависит скорость расчета оптимальных управляющих сигналов и чувствительность управляющей части системы. Время определения последовательности управляющих воздействий устанавливается величиной горизонта предсказания в сочетании с алгоритмом процедуры численной оптимизации. Очевидно, что большой горизонт управления и сложность алгоритма оценки оптимальных значений управляющих сигналов приведут к увеличению числа вычислений на каждом периоде квантования и могут потребовать значительного времени вычислений. Так как критерием оптимизации принимается минимум квадратичной ошибки, то предпочтение следует отдавать сочетанию параметров с меньшим временем перерасчета алгоритма управления при выполнении других равных условий.

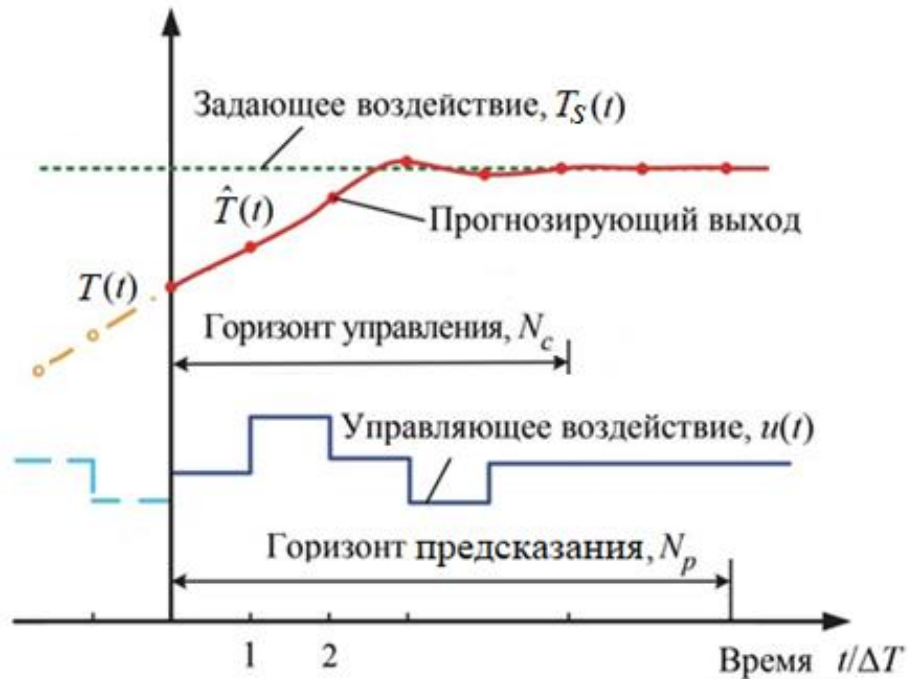


Рисунок 4.13 – Процесс адаптивного прогнозирующего управления

Рабочие процессы в ОВС отличаются достаточно продолжительными переходными характеристиками, которые имеют относительно большое время запаздывания. Это дает основание растянуть на временном интервале адаптивное прогнозирующее управление. Данное обстоятельство позволяет считать эффективным использованием MPC-регуляторов в режиме реального времени для рабочих процессов, протекающих в ОВС.

Программа **mrc** для расчета MPC-регулятора является встроенной процедурой пакета прикладных программ MATLAB.

4.3.3 Исследование переходных процессов в комбинированной отопительно-вентиляционной системе

В среде Simulink пакета MATLAB проведены исследования переходных процессов в двухконтурной САУ воздушным отоплением и выполнен анализ показателей качества регулирования аэротермодинамических характеристик ОВС. В качестве объекта управления было принято ранее рассмотренное (см. п. 4.3.1)

административное помещение объемом $134,4 \text{ м}^3$, для которого на основе экспериментальных данных выполнена параметрическая идентификация математической модели передаточной функцией (4.26). Выбор параметров MPC-регулятора в контуре регулирования расхода приточного воздуха осуществлен согласно п. 4.3.2. В контуре регулирования температуры приточного воздуха рассматривался ПИД-регулятор с передаточной функцией $W_{PID}(s) = 1 + 1/(300s) + s$. На выходе ПИД-регулятора была установлена типовая нелинейность типа «зона насыщения» с ограничениями безразмерных значений минимального и максимального значений выходного сигнала соответственно -1 и $+1$.

На рисунке 4.14 сопоставлена переходная характеристика объекта управления и переходные процессы в двухконтурной САУ с ПИД-регулятором в обоих контурах и в двухконтурной САУ с MPC-регулятором и ПИД-регулятором.

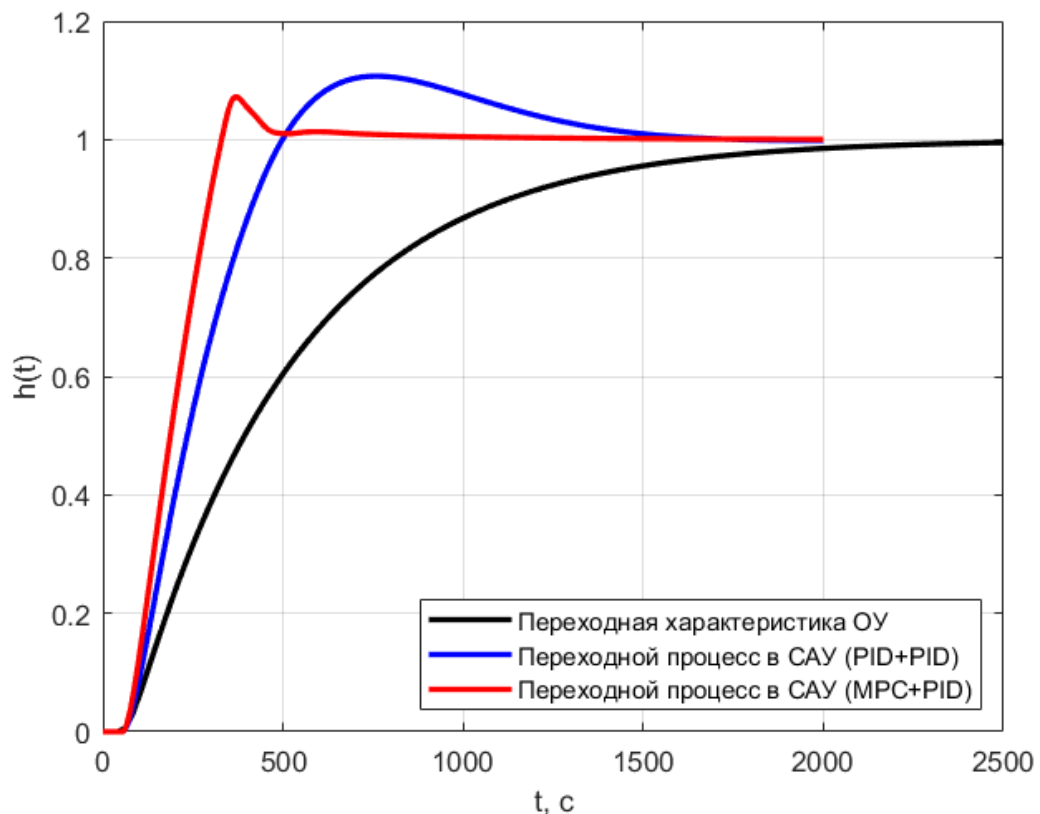


Рисунок 4.14 – Переходные процессы в двухконтурной САУ воздушным отоплением

Комбинированное применение МРС-регулятора для расхода и ПИД-регулятора для температуры приточного воздуха позволяет совершенствовать процессы регулирования аэротермодинамических характеристик ОВС за счет увеличения быстродействия (более чем в 3,5 раза) и уменьшения величины перерегулирования температуры в значимой (рабочей) зоне обслуживаемого помещения.

Совершенствование процессов регулирования двухконтурной САУ воздушным отоплением при совместном использовании МРС-регулятора для расхода и ПИД-регулятора для температуры приточного воздуха позволяет улучшить качество регулирования и снизить эксплуатационные затраты ОВС.

Улучшение качества регулирования за счет увеличения быстродействия и уменьшения величины перерегулирования температуры обеспечивает повышение стабильности контролируемых параметров микроклимата в помещении и, как следствие, технического уровня ОВС.

Снижение эксплуатационных затрат обусловлено повышением энергетической эффективности ОВС, которое достигается за счет уменьшения величины перерегулирования системы. Максимальное снижение перерегулирования существенно снижает «перегрев» в ОВС и не приводит к так называемому «перетопу», когда температура в значимой (рабочей) зоне обслуживаемого помещения поднимается выше заданной. Снижение перегрева обслуживаемого помещения обеспечивает повышение энергетической эффективности ОВС и, как следствие, приводит к снижению эксплуатационных затрат.

Выводы по четвертому разделу

Выполненные в данном разделе теоретические и экспериментальные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Проведены экспериментальные исследования с целью разработки рекомендаций по выбору геометрических размеров и параметров размещения конструктивных элементов в диффузорах с несимметричным расширением, имеющих разные наклоны боковых стенок, для достижения максимального повышения

производительности вентиляционных систем путем выравнивания потока на выходе радиальных вентиляторов.

2. Разработаны рекомендации по выбору геометрических размеров и параметров размещения конструктивных элементов в диффузорах с несимметричным расширением, имеющих разные наклоны боковых стенок. В зоне номинальных режимов работы вентилятора для рекомендуемых геометрических размеров и параметров размещения конструктивных элементов относительное повышение расхода составляет от 6% до 10% при использовании простой выравнивающей пластины и от 8% до 12% при использовании составной выравнивающей пластины.

3. На основе сформулированного критерия энергетической эффективности регулирования аэродинамических характеристик вентиляционных систем предложена методика оценки возможности эффективного использования байпасного способа регулирования по начальному (максимальному) расходу в системе. Методика включает процедуру аппроксимации полного давления вентилятора и его КПД полиномами второго порядка.

4. Показано использование предложенной методики на примере лабораторного стенда для исследования аэродинамических характеристик вентиляционной системы со струйными регулирующими устройствами. Выполненные оценки для параметров лабораторного стенда со струйными регулирующими устройствами подтвердили экспериментальные результаты снижения потребляемой мощности более 5% при расходе в байпасном канале до 0,5 от значения расхода вентилятора для диапазона расходов вентилятора от 0,32 до 0,37 м³/с.

5. Разработана двухконтурная САУ воздушным отоплением административного помещения с MPC-регулятором расхода и ПИД-регулятором температуры приточного воздуха. Для моделирования характеристик рабочих процессов в комбинированной ОВС на основе предложенной структурной схемы двухконтурной САУ в среде Simulink пакета MATLAB разработана блок-диаграмма, при синтезе MPC-регулятора использован набор программных инструментов Model Predictive Control Toolbox.

6. В среде Simulink пакета MATLAB проведены исследования переходных процессов в двухконтурной САУ воздушным отоплением и выполнен анализ показателей качества регулирования аэротермодинамических характеристик ОВС. Переходная характеристика объекта управления сопоставлена с переходными процессами в САУ с ПИД-регулятором в обоих контурах и в САУ с МРС-регулятором и ПИД-регулятором. Комбинированное применение МРС-регулятора для расхода и ПИД-регулятора для температуры приточного воздуха позволяет совершенствовать процессы регулирования аэротермодинамических характеристик ОВС за счет увеличения быстродействия (более чем в 3,5 раза) и уменьшения величины перерегулирования температуры в значимой (рабочей) зоне.

7. Совершенствование процессов регулирования двухконтурной САУ воздушным отоплением при совместном использовании МРС-регулятора для расхода и ПИД-регулятора для температуры приточного воздуха позволяет улучшить качество регулирования и снизить эксплуатационные затраты ОВС.

8. Результаты исследований по повышению эффективности ОВС совершенствованием процессов регулирования опубликованы в работах [65, 80, 81, 82, 100, 101, 102, 113].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании выполненных исследований решена актуальная научно-практическая задача повышения эффективности ОВС совершенствованием процессов регулирования аэротермодинамических характеристик, что обеспечивает улучшение показателей качества регулирования и снижение эксплуатационных затрат.

По результатам исследований сделаны следующие выводы:

1. Разработана математическая модель комбинированной ОВС как объекта автоматического управления температурным режимом в помещении, позволяющая синтезировать САУ воздушным отоплением с различными регуляторами расхода и температуры приточного воздуха. Обоснована идентификация объектов ОВС в виде передаточных функций апериодических звеньев первого и второго порядков с запаздыванием.

2. Показана возможность использования струйных регулирующих устройств в системах ОВКВ для повышения надежности и долговечности ОВС за счет отсутствия подвижных механических частей. Предложен критерий энергетической эффективности регулирования аэродинамических характеристик вентиляционных систем, позволяющий производить оценку возможности эффективного использования байпасного способа регулирования.

3. Для повышения производительности вентиляционных систем на основе численного моделирования турбулентных течений обоснована эффективность и показана целесообразность использования методов выравнивания потока на выходе радиальных вентиляторов путем установки конструктивных элементов в диффузорах с несимметричным расширением, имеющих разные наклоны боковых стенок.

4. Разработаны экспериментальные стенды для проведения исследований по влиянию конструктивных элементов для выравнивания потока на выходе радиального вентилятора на его аэродинамические характеристики; а также по оценке эффективности использования струйных регулирующих устройств. Выполненные исследования показали возможность повышения производительности

вентиляционных систем и наличие диапазонов эффективного использования струйных регулирующих устройств.

5. Разработаны рекомендации по выбору геометрических размеров и параметров размещения конструктивных элементов в диффузорах с несимметричным расширением, имеющих разные наклоны боковых стенок, для повышения производительности вентиляционных систем путем выравнивания потока на выходе радиальных вентиляторов. В зоне номинальных режимов работы вентилятора для рекомендуемых геометрических размеров и параметров размещения конструктивных элементов относительное повышение расхода составляет от 6% до 10% при использовании простой выравнивающей пластины и от 8% до 12% при использовании составной выравнивающей пластины.

6. Предложена методика оценки возможности эффективного использования байпасного способа регулирования аэродинамических характеристик вентиляционных систем по начальному (максимальному) расходу в системе. Методика включает процедуру аппроксимации полного давления вентилятора и его КПД полиномами второго порядка. Выполненные оценки для параметров лабораторного стенда со струйными регулирующими устройствами подтвердили экспериментальные результаты снижения потребляемой мощности более 5% при расходе в байпасном канале до 0,5 от значения расхода вентилятора.

7. Разработана двухконтурная САУ воздушным отоплением с МРС-регулятором расхода и ПИД-регулятором температуры приточного воздуха. В среде Simulink пакета прикладных программ MATLAB проведены исследования переходных процессов в комбинированной ОВС и выполнен анализ показателей качества регулирования аэротермодинамических характеристик. Совместное применение МРС-регулятора для расхода приточного воздуха и ПИД-регулятора для его температуры позволяет совершенствовать процессы регулирования за счет увеличения быстродействия (более чем в 3,5 раза) и уменьшения величины перерегулирования температуры в значимой зоне обслуживаемого помещения, что обеспечивает улучшение качества регулирования и снижение эксплуатационных затрат ОВС.

Основные результаты диссертационной работы использованы и внедрены на ГУП ЛНР «Лугансквода», ЧАО «Луганский завод «Сантехдеталь» при модернизации и обновлении систем инженерного оборудования производственных участков и помещений, в учебном процессе на кафедре «Вентиляция, теплогазо- и водоснабжение» ИСА и ЖКХ ЛГУ им. В. Даля, что подтверждается соответствующими актами (Приложение Б). Ожидаемый годовой экономический эффект за счет снижения эксплуатационных затрат от модернизации ОВС цеха металлоконструкций ЧАО «Луганский завод «Сантехдеталь» составляет 182 тыс. руб.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамович, Г.Н. Прикладная газовая динамика / Г.Н. Абрамович. – Москва: Наука, 1976. – 544 с.
2. Автоматизация систем вентиляции и кондиционирования воздуха / Е.С. Бондарь, А.С. Гордиенко, В.А. Михайлов, Г.В. Нимич. – Киев: «Аванпост-Прим», 2005. – 560 с.
3. Автоматизированные системы теплоснабжения и отопления / С.А. Чистович, В.К. Аверьянов, Ю.Я. Темпель, С.И. Быков. – Ленинград: Стройиздат, 1987. – 248 с.
4. Автоматика и автоматизация систем теплогазоснабжения и вентиляции / А.А. Калмаков, Ю.А. Кувшинов, С.С. Романова, С.А. Щелкунов. – Москва: Стройиздат, 1986. – 479 с.
5. Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. – Москва: Наука, 1976. – 280 с.
6. Алексин, В.А. Математические модели турбулентных течений / В. А. Алексин. – Москва: МГИУ, 2008. – 54 с.
7. Алиев, Т.А. Экспериментальный анализ / Т.А. Алиев. – Москва: Машиностроение, 1991. – 272 с.
8. Альтшуль, А.Д. Гидравлические сопротивления / А.Д. Альтшуль. – Москва: Недра, 1970. – 244 с.
9. Амерханов, Р.А. Теплотехника / Р.А. Амерханов, Б.Х. Драганов. – Москва: Энергоатомиздат, 2006. – 432 с.
10. Андрийчук, В.Н. Улучшение эксплуатационных характеристик вентиляционных систем совершенствованием конструктивных элементов и процессов регулирования: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.03 / Андрийчук Владислав Николаевич. – Луганск, 2023. – 22 с.

11. Андрийчук, К. Н. Математическое моделирование аэродинамических характеристик элементов и систем вентиляции / К. Н. Андрийчук, Н.Д. Андрийчук. – Луганск: ВНУ им. В. Даля, 2005. – 88 с.
12. Андрийчук, К. Н. Моделирование аэродинамических характеристик охлаждающих устройств тепловозов / К. Н. Андрийчук, В.И. Соколов, А.А. Коваленко // Железнодорожный транспорт Украины. – 2005. – № 3/1. – С. 150-153.
13. Андрийчук, К.Н. Системы вентиляции со струйными системами регулирования: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.03 / Андрийчук Константин Николаевич. – Макеевка, 2007. – 21 с.
14. Беккер, А.М. Системы вентиляции / А.М. Беккер. – Москва: Техносфера, Евроклимат, 2005. – 232 с.
15. Бесекерский, В.А. Теория систем автоматического регулирования / В.А. Бесекерский, Е.П. Попов. – Москва: Наука, 1972. – 768 с.
16. Бойков, И.В. Методы идентификации динамических систем / И.В. Бойков, Н.П. Кривулин // Программные системы: теория и приложения. – 2014. – № 5(23). – С. 79-86.
17. Бойков, И.В. Об идентификации нелинейных систем / И.В. Бойков // Метрология. – 1997. – № 2. – С. 52–60.
18. Болдин, В.П. Калориферные установки: учеб. пособие / В.П. Болдин, В.Ю. Кузин, В.В. Сухов. – Нижний Новгород: ННГАСУ, 2022. – 45 с.
19. Вахвахов, Г.Г. Работа вентиляторов в сети / Г.Г. Вахвахов. – Москва: Стройиздат, 1975. – 101 с.
20. Вахвахов, Г.Г. Энергосбережение и надежность вентиляторных установок / Г.Г. Вахвахов. – Москва: Стройиздат, 1989. – 176 с.
21. Вихревые устройства в системах вентиляции / Я.А. Гусенцова, Е.А. Иващенко, А.А. Коваленко [и др.]. – Луганск: ВНУ им. В. Даля, 2006. – 296 с.
22. Временные методические рекомендации по проектированию входных и выходных элементов вентиляторных установок. – Москва: ЦНИИПромзданий, 1976. – 25 с.

23. Герасименко, В.П. Аппроксимация характеристик центробежных компрессоров / В.П. Герасименко, Ю. А. Анимов, Т. М. Нурмухаметов // *Авиационно-космическая техника и технология*. -2003. - № 37(2). – С. 65-69.
24. Грановский, В.А. Динамические измерения: основы метрологического обеспечения / В.А. Грановский. – Ленинград: Энергоатомиздат, 1984. – 394 с.
25. Гримитлин, А.М. Математическое моделирование в проектировании систем вентиляции и кондиционирования / А.М. Гримитлин, Т.А. Дацюк, Д.М. Денисихина. – Санкт-Петербург: АВОК Север-Запад, 2013. – 190 с.
26. Гусенцова, Я.А. Оптимизация технико-экономических характеристик вентиляционных систем / Я.А. Гусенцова, К.Н. Андрийчук, Н.Д. Андрийчук. – Луганск: ВНУ им. В. Даля, 2005. – 52 с.
27. Гусенцова, Я.А. Струйная техника в отопительно-вентиляционных системах: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.23.03 / Гусенцова Яна Алимовна. – Макеевка, 2007. – 36 с.
28. Денисенко, В. В. Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием / В.В. Денисенко. – Москва: Горячая линия–Телеком, 2009. – 608 с.
29. Джонсон, Н. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке: методы планирования эксперимента / Н. Джонсон, Ф. Лион. –Москва: Мир, 1980. – 612 с.
30. Дилигенская, А.Н. Идентификация объектов управления / А.Н. Дилигенская. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т., 2009. – 136 с.
31. Донин Л.С. Справочник по вентиляции в пищевой промышленности / Л.С. Донин. – Москва: Пищевая промышленность, 1977. – 352 с.
32. Дрейпер, Н. Прикладной регрессионный анализ / Н. Дрейпер, Г. Смит. – Москва: Издательский дом «Вильямс», 2007. – 917 с.
33. Дьяконов, В.П. MATLAB. Анализ, идентификация и моделирование систем / В.П. Дьяконов, В.В. Круглов. – Санкт-Петербург: Питер, 2001. – 444 с.
34. Жуковский, С.С. Аэродинамика вентиляции / С.С. Жуковский, В.Й. Лабай. – Львов: НУ «Львовская политехника», 2003. – 372 с.

35. Загузов, И.С. Математические модели в аэрогидромеханике. В 2 частях / И.С. Загузов, К.А. Поляков. – Самара: Самарский университет, 2001.
36. Зажигаев, Л.С. Методы планирования и обработки результатов физического эксперимента / Л.С. Зажигаев, А.А. Кишьян, Ю.И. Романиков. – Москва: Атомиздат, 1978. – 232 с.
37. Иващенко, Н.Н. Автоматическое регулирование / Н.Н. Иващенко. – Москва: Машиностроение, 1977. – 736 с.
38. Идельчик, И.Е. Исследование коротких диффузоров с разделительными стенками. / И.Е. Идельчик // Теплоэнергетика. – 1958. – №8. – С. 21–26.
39. Идельчик, И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И.Е. Идельчик. – Москва: Машиностроение, 1975. – 554 с.
40. Инженерные задачи диффузии примеси в потоке / В.И. Соколов, А.А. Коваленко А.А., Г.С. Калюжный [и др.]. – Луганск: ВУГУ, 2000. – 168 с.
41. Каменев, П.Н. Вентиляция / П.Н. Каменев, Е.И. Тертичник. – Москва: АСВ, 2008. – 624 с.
42. Колодин, А.А. Разработка и исследование регулятора на основе прогнозирующей модели / А.А. Колодин, В.В. Ёлшин // Вест. Самар. гос. ун-та. Сер. технические науки. – 2021. – Т. 29, №1. – С. 36-44.
43. Комиссарчик, В.Ф. Автоматическое регулирование технологических процессов / В.Ф. Комиссарчик. – Тверь: ТГТУ, 2001. – 247с.
44. Кочевский, А.Н. Расчет внутренних течений жидкости в каналах с помощью программного продукта FlowVision / А. Н. Кочевский // Вестник СумГУ. – № 2 (61). – С. 25-36.
45. Кочевский, А.Н. Современный подход к моделированию и расчету течений жидкости в лопастных гидромашинах /А.Н. Кочевский, В.Г. Неня // Вестник СумГУ. – Сумы, 2003. – № 13 (59). – С. 195-210.
46. Кунцевич, В.М. Управление в условиях неопределенности: гарантированные результаты в задачах управления идентификации / В.М. Кунцевич. – Киев: Наук. думка, 2006. – 264 с.

47. Курсовое и дипломное проектирование по вентиляции гражданских и промышленных зданий / В.П. Титов, Э.В. Сазонов, Ю.С. Краснов, В.И. Новожилов. – Москва: Стройиздат, 1985. – 208 с.
48. Лурье, Б.Я. Классические методы теории автоматического управления / Б.Я. Лурье, П.Дж. Энрайт. – Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2004. – 640 с.
49. Льюнг, Л. Идентификация систем. Теория для пользователя / Л. Льюнг. – Москва: Наука, 1991. – 432 с.
50. Макаров, В.Н. Повышение эффективности шахтных центробежных вентиляторов главного проветривания / В.Н. Макаров, В.А. Агушев, Е.И. Ковыров // Горные машины. - Свердловск: НИПИГормаш, 1982. – С. 121-127.
51. Максимов, Г.А. Движение воздуха при работе систем вентиляции и отопления / Г.А. Максимов, В.В. Дерюгин. – Ленинград: Изд-во литературы по строительству, 1972. – 99 с.
52. Марьясин, О.Ю. Управление тепловым режимом зданий с использованием прогнозирующих моделей / О.Ю. Марьясин, А.С. Колодкина // Вест. Самар. гос. ун-та. Сер. технические науки. – 2017. – № 1(53). – С. 122-132.
53. Математическое моделирование и оптимизация тепловой эффективности зданий / А.В. Пуговкин, С.В. Купреков, Д.В. Абушкин и [и др.] // Доклады ТУСУР. – 2010. – № 2(22). – Ч. 1. – С. 293-298.
54. Невельсон, М. И. Центробежные вентиляторы / М. И. Невельсон. – Москва: Госэнергоиздат, 1954. – 339 с.
55. Некущенко, Д.В. Применение расчетного комплекса FLUENT® для моделирования течений вязкой несжимаемой жидкости / Д.В. Некущенко. – Санкт-Петербург: СПбГМТУ, 2005. – 94 с.
56. Нечушкин, Г.М. Новые эффективные устройства для повышения подачи и давления шахтных центробежных вентиляторов главного проветривания. / Г.М. Нечушкин, В.А. Стешенко // Уголь. – 1990. – №2. – С. 32-33.
57. Нимич, Г.В. Современные системы вентиляции и кондиционирования воздуха / Г.В. Нимич, В.А. Михайлов, Е.С. Бондарь. – Киев.: «ИВИК», 2005. – 626 с.

58. Нубарян, С.М. Автоматизация систем теплогазоснабжения и вентиляции / С.М. Нубарян. – Харьков: ХНАГХ, 2007 – 147 с.
59. Основы технической механики жидкостей и газов / А.А. Коваленко, В.И. Соколов, А.Х. Дымнич, П.Е. Уваров; под. ред. А.А. Коваленко А.А. – Луганск: ВУГУ, 1998. - 272 с.
60. Отопление и вентиляция. Учебник для вузов. В 2 частях. Часть 2. Вентиляция / В.Н. Богословский, В.И. Новожилов, Б.Д. Симаков, В.П. Титов; под ред. В.Н. Богословского. – Москва: Стройиздат, 1976. – 439 с.
61. Патент на полезную модель № 225264 Российская Федерация, МПК F24F 7/06 (2006.01), F04D 29/32 (2006.01). Рабочее колесо осевого вентилятора: № 2024105082: заявл. 27.02.2024: опубл. 16.04.2024/ Пронин М.А., Гусенцова Я.А., Андрийчук В.Н., Черникова И.Д. – 6 с.
62. Перекрест, А. Л. Идентификация процессов в системах отопления учебных зданий / А.Л. Перекрест, Т.В. Карайбида // Вестник КрНУ. – 2014. – № 2(85). – С. 61–68.
63. Перекрест, А.Л. Оперативный контроль температурных режимов и управление тепловыми пунктами зданий учебного заведения / А.Л. Перекрест, В.В. Найда, С.С. Романенко // Вестник КрНУ. – 2013. – Вып. 3(80). – С. 35–43.
64. Перекрест, А.Л. Оценка эффективности функционирования систем отопления учебных зданий / А.Л. Перекрест // Электромеханические и энергосберегающие системы. – 2014. — Вып. 2(26). — С. 48-55.
65. Черникова, И.Д. Повышение производительности вентиляционных систем с центробежными вентиляторами / И.Д. Черникова, В.Н. Андрийчук, В.И. Соколов, Н.Д. Андрийчук // Строительство и техногенная безопасность. – Симферополь: КФУ им. В.И. Вернадского, 2023. – № S1. – С. 321-327.
66. Посохин, В.Н. Аэродинамика вентиляции / В.Н. Посохин. – Москва: АВОК-Пресс, 2008. – 209 с.
67. Посохин, В.Н. Вентиляция / В.Н. Посохин, Р.Г. Сафиуллин, В.А. Бройда. – Москва: АСВ, 2020. – 624 с.

68. Пупков, К.А. Методы классической и современной теории автоматического управления. В 5 томах / К.А. Пупков, Н.Д. Егупов. – Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004.
69. Пути совершенствования систем теплоснабжения / Н.Д. Андрийчук, В.И. Соколов, А.А. Коваленко, К.М. Дядичев. – Луганск: ВНУ им. В. Даля, 2003. – 244 с.
70. Рабинович, С.Г. Погрешности измерений / С.Г. Рабинович. – Ленинград: Энергия, 1978. – 262 с.
71. Ратушняк, Г.С. Регулирование аэродинамических потоков в системах вентиляции и аспирации / Г. С. Ратушняк, Р. В. Степанковский. – Винница: ВНТУ, 2015. – 112 с.
72. Рогов, В.А. Методика и практика технических экспериментов / В.А. Рогов, Г.Г. Поздняк. – Москва: Академия, 2005. – 288 с.
73. Рыжков, И.Б. Основы научных исследований и изобретательства / И.Б. Рыжков. – Санкт-Петербург: Лань, 2020. – 224 с.
74. Седов, Л.И. Методы подобия и размерности в механике / Л.И. Седов. – М.: Наука, 1967. – 464 с.
75. Семин, Д.А. Расчет характеристик запирающих крупномасштабных вихревых клапанов / Д.А. Семин. – Луганск: Деп. в УкрНИИНТИ, № 2754-Ук88, 1988. – 20 с.
76. Система моделирования движения жидкости и газа FlowVision. Руководство пользователя. – Москва: ООО «Тесис», 2002. – 262 с.
77. Системы вентиляции и кондиционирования. Теория и практика / В.А. Ананьев, Л.Н. Балугева, А.Д. Гальперин [и др.]. – Москва: Евроклимат, 2003. – 416 с.
78. Системы вентиляции: моделирование, оптимизация / Я.А. Гусенцова, К.Н. Андрийчук, А.А. Коваленко, В.И. Соколов. – Луганск: ВНУ им. В. Даля, 2005. – 206 с.
79. Сканава, А.Н. Отопление / А.Н. Сканава, Л.М. Махов. – Москва: АСВ, 2008. – 576 с.

80. Совершенствование процессов регулирования вентиляционных систем на основе адаптивного прогнозирующего управления / И.Д. Черникова, В.Н. Андрийчук, В.И. Соколов, М.В. Пилавов // Строительство и техногенная безопасность – Симферополь: КФУ им. В.И. Вернадского, 2023. – № S1. – С. 312-320.

81. Соколов, В. И. Идентификация отопительно-вентиляционных систем как объектов автоматического управления / В.И. Соколов, И.Д. Черникова, Г.В. Салуквадзе // Вестник евразийской науки. – 2024. – Т. 16. – № 2. – URL: <https://esj.today/PDF/32SAVN224.pdf>

82. Соколов, В. И. Моделирование двухконтурной системы автоматического управления воздушным отоплением / В.И. Соколов, И.Д. Черникова, Г.В. Салуквадзе // Вестник евразийской науки. – 2024. – Т. 16. – № 1. – URL: <https://esj.today/PDF/33SAVN124.pdf>

83. Соколов, В.И. Аэродинамика газовых потоков в каналах сложных вентиляционных систем / В.И. Соколов. – Луганск: ВУГУ, 1999. – 200 с.

84. Соколов, В.И. Гидравлика / В.И. Соколов, О.С. Кроль, О.В. Епифанова. – Северодонецк: ВНУ им. В. Даля, 2017. – 160 с.

85. Соколов, В.И. Диффузионные процессы в системах вентиляции / В.И. Соколов, О.С. Кроль, О.В. Епифанова. – Северодонецк: ВНУ им. В. Даля, 2018. – 148 с.

86. Соломахова, Т.С. Повышение эффективности радиальных вентиляторов / Т.С. Соломахова // Современные направления развития промышленной вентиляции. МДНТП, – Москва: МДНТП. – 1986. – 68 с.

87. Соломахова, Т.С. Центробежные вентиляторы. Аэродинамические схемы и характеристики: Справочник / Т.С. Соломахова, К.В. Чебышева. – Москва: Машиностроение, 1980. – 176 с.

88. Сотников, А.Г. Системы кондиционирования и вентиляции с переменным расходом воздуха / А.Г. Сотников. – Ленинград: Стройиздат, 1984. – 149 с.

89. Стефанов, Е.В. Вентиляция и кондиционирование воздуха / Е.В. Стефанов. – Санкт-Петербург: АВОК СЕВЕРО-ЗАПАД, 2005. – 400 с.

90. Струйная техника в системах вентиляции / Я.А. Гусенцова, Е.А. Иващенко, А.А. Коваленко [и др.]. – Луганск: ВНУ им. В. Даля, 2007. – 292 с.
91. Судак, В. Системы VAV. Краткое описание / В. Судак, Я. Хендигер. – Краков: SMAУ, 2009. – 80 с. Режим доступа: – URL: http://belimo.com.ua/files/VAV/VAV_book.pdf
92. Табунщиков, Ю.А. Математическое моделирование и оптимизация тепловой эффективности зданий / Ю.А. Табунщиков, М.М. Бродач. – Москва: АВОК-ПРЕСС, 2002. – 194 с.
93. Талиев, В.Н. Аэродинамика вентиляции / В.Н. Талиев. – Москва: Стройиздат, 1979. – 295 с.
94. Теория автоматического управления / Е.Э. Страшинин, А.Д. Заколяпин, С.П. Трофимов, А.А. Юрлова. – Екатеринбург: УФУ, 2019. — 456 с.
95. Франкфурт, М.О. К определению потерь в диффузоре при утончении пограничного слоя с помощью щелевого отсасывания / М.О. Франкфурт // Промышленная аэродинамика. – Москва: Машиностроение, 1973. – Вып. 30. – С. 34–40.
96. Франкфурт, М.О. Экспериментальное исследование диффузоров с щелевым отсасыванием воздуха из пограничного слоя / М.О. Франкфурт // Промышленная аэродинамика. – Москва: Машиностроение, 1973. – Вып. 30. – С. 41–49.
97. Черникова, И.Д. Анализ методов идентификации отопительно-вентиляционных систем / И.Д. Черникова, Г.В. Салуквадзе, В.И. Соколов // Актуальные проблемы урбанизированных территорий Донбасса: материалы IX научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием 18 апреля 2024 г., г. Луганск. – Луганск: ЛГУ им. В. Даля, 2024. – С. 201-202.
98. Черникова, И.Д. Моделирование турбулентных течений в элементах присоединения радиального вентилятора к вентиляционной системе / И.Д. Черникова, Г.В. Салуквадзе, В.И. Соколов // Энергоресурсосбережение в инженерных и энергетических системах зданий и сооружений: элект. сб. науч. тр. V науч.-практ. конф. молодых ученых и студентов. – Макеевка: ФГБОУ ВО «ДОН-НАСА», 2024. – С. 217-222.

99. Черникова, И.Д. Отопительно-вентиляционная система как объект автоматического управления / И.Д. Черникова // Актуальные проблемы урбанизированных территорий Донбасса: материалы IX научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием 18 апреля 2024 г., г. Луганск. – Луганск: ЛГУ им. В. Даля, 2024. – С. 199-200.

100. Черникова, И.Д. Повышение производительности радиального вентилятора совершенствованием конструктивных элементов вентиляционной системы / И.Д. Черникова, Г.В. Салуквадзе, В.И. Соколов // Ресурсосберегающие технологии производства и обработки материалов давлением в машиностроении: Сб. науч. тр. – Луганск: ЛГУ им. В. Даля, 2023. – № 3(44). – С. 65-76.

101. Черникова, И.Д. Совершенствование конструктивных элементов вентиляционных систем для улучшения аэродинамических характеристик вентиляторных установок / И.Д. Черникова, Г.В. Салуквадзе, В.И. Соколов // Вестник ЛГУ им. В. Даля. – Луганск: ЛГУ им. В. Даля, 2023. – № 12(78). – С. 98-104.

102. Черникова, И.Д. Совершенствование конструктивных элементов вентиляционных систем для улучшения аэродинамических характеристик вентиляторных установок / И.Д. Черникова, Г.В. Салуквадзе, М.В. Пилавов // Актуальные проблемы строительства, архитектуры и жилищно-коммунального хозяйства: материалы научно-практической конференции с международным участием 14 декабря 2023 г., г. Луганск. – Луганск: ЛГУ им. В. Даля, 2023. – С. 109-110.

103. Штокман, Е.А. Вентиляция, кондиционирование и очистка воздуха на предприятиях пищевой промышленности / Е.А. Штокман. – Москва: АСВ, 2001. – 564 с.

104. Экк, Б. Проектирование и эксплуатация центробежных и осевых вентиляторов / Б. Экк. – Москва: Госгортехиздат, 1959. – 566 с.

105. Эльтерман, В.М. Вентиляция химических производств / В.М. Эльтерман. – Москва: Химия, 1980. – 288 с.

106. Ahmed, A. Q. Energy saving and indoor thermal comfort evaluation using a novel local exhaust ventilation system for office rooms / A.Q. Ahmed, S. Gao, A.K. Kareem // Applied Thermal Engineering. – 2017. – No 110. – P. 821-834.

107. Effect of the turbulence model on the heat ventilation analysis in a box prototype / Hani Benguesmia, Badis Bakri, Zied Driss [et al.] // *Diagnostyka*. – 2020. – Vol. 21. – No. 3. – P. 55-66.
108. Experimental data-driven model predictive control of a hospital HVAC system during regular use / Emilio T. Maddalena, Silvio A. Müller, Rafael M. dos Santos [et al.] // *Energy & Buildings*. – 2022. – Vol. 271. – 112316.
109. First principal modeling and predictive control of a continuous biodiesel plant / A.S.R. Brásio, A. Romanenko, N.C.P. Fernandes, L.O. Santos // *Journal of Process Control*. – 2016. – Vol. 47. – P. 11-21.
110. Howell, R. Principles of heating ventilating and air conditioning / Ronald H. Howell. – Atlanta: ASHRAE, 2017. – 594 p.
111. Ifa, S. Numerical simulation and experimental validation of the ventilation system performance in a heated room / S. Ifa, Z. Driss // *Air Quality, Atmosphere and Health*. – 2021. – Vol. 14(2). – P. 171-179.
112. Ifa, S. Ventilation system performance in a heated room testing the indoor air quality and thermal comfort / S. Ifa, Z. Driss // *Indoor air quality: Control, health implications and challenges*. – 2022. – P. 77-100.
113. Improvement of HVAC systems based on adaptive predictive control / V. Sokolov, O. Krol, V. Andriichuk [et al.] // *E3S Web of Conferences*. – 2023. – Vol. 420, 07020. URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202342007020>
114. McPherson, M. Subsurface ventilation and environmental engineering / Malcolm J. McPherson. – London: Chapman & Hall, 1993. – 891 p.
115. Model predictive control toolbox. – Режим доступа: – URL: <https://www.mathworks.com/help/mpc/>
116. Pilavov, M. Improvement of Control Processes for VAV Ventilation Systems Using MPC Controller / V. Andriichuk, V. Sokolov // *2023 International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*. – IEEE, 2023. – P. 8-12.
117. Qin, S.J. A survey of industrial model predictive control technology / S.J. Qin, T.A. Badgwell // *Control Engineering Practice*. – 2003. – Vol. 93. – P. 733-764.

118. Sokolov, V. Measurement of Impurity Concentration in Turbulent Flows of Ventilation Systems Channels / V. Sokolov, O. Krol // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 2096. – 012102.

119. SolidWorks. Компьютерное моделирование в современной практике / А.А. Алямовский, А.А. Собачкин, Е.В. Одинцов [и др.]. – Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2005. – 800 с.

120. System identification toolbox. – Режим доступа: – URL: <https://www.mathworks.com/help/ident/>

121. Tufa, L.D. Effect of model plant mismatch on MPC performance and mismatch threshold determination / L.D. Tufa, C.Z. Ка // Procedia Engineering. – 2016. – Vol. 148. – P. 1008-1014.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Патент на полезную модель № 225264
РАБОЧЕЕ КОЛЕСО ОСЕВОГО ВЕНТИЛЯТОРА

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 225264

РАБОЧЕЕ КОЛЕСО ОСЕВОГО ВЕНТИЛЯТОРА

Патентообладатель: *Пронин Максим Александрович (RU)*

Авторы: *Пронин Максим Александрович (RU), Гусенцова Яна Алимовна (RU), Андрийчук Владислав Николаевич (RU), Черникова Ирина Демьяновна (RU)*

Заявка № 2024105082

Приоритет полезной модели 27 февраля 2024 г.

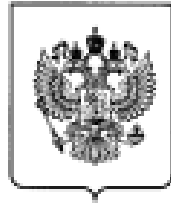
Дата государственной регистрации
в Государственном реестре полезных
моделей Российской Федерации 16 апреля 2024 г.Срок действия исключительного права
на полезную модель истекает 27 февраля 2034 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

документ подписан электронной подписью
Сертификат 4290560418E13642A19693b73e4aa7
Владелец *Зубов Юрий Сергеевич*
Действителен с 18.07.23 по 02.08.2024

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



(19) RU (11)

225 264⁽¹³⁾ U1

(51) МПК

F24F 7/06 (2006.01)

F04D 29/32 (2006.01)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ

(52) СПК

F24F 7/06 (2024.01); F04D 29/32 (2024.01)

(21)(22) Заявка: 2024105082, 27.02.2024

(24) Дата начала отчета срока действия патента:
27.02.2024Дата регистрации:
16.04.2024

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 27.02.2024

(45) Опубликовано: 16.04.2024 Бюл. № 11

Адрес для переписки:
291031, г. Луганск, кв-л Шевченко, 125, кв. 51,
Пронину Максиму Александровичу

(72) Автор(ы):

Пронин Максим Александрович (RU),
Гусенцова Яна Алимовна (RU),
Андрейчук Владислав Николаевич (RU),
Черникова Ирина Демьяновна (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Пронин Максим Александрович (RU)

(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: RU 2787424 C1, 09.01.2023. RU
2689498 C1, 28.05.2019. RU 2677769 C1,
21.01.2019. UA 90040 U, 12.05.2014.

(54) РАБОЧЕЕ КОЛЕСО ОСЕВОГО ВЕНТИЛЯТОРА

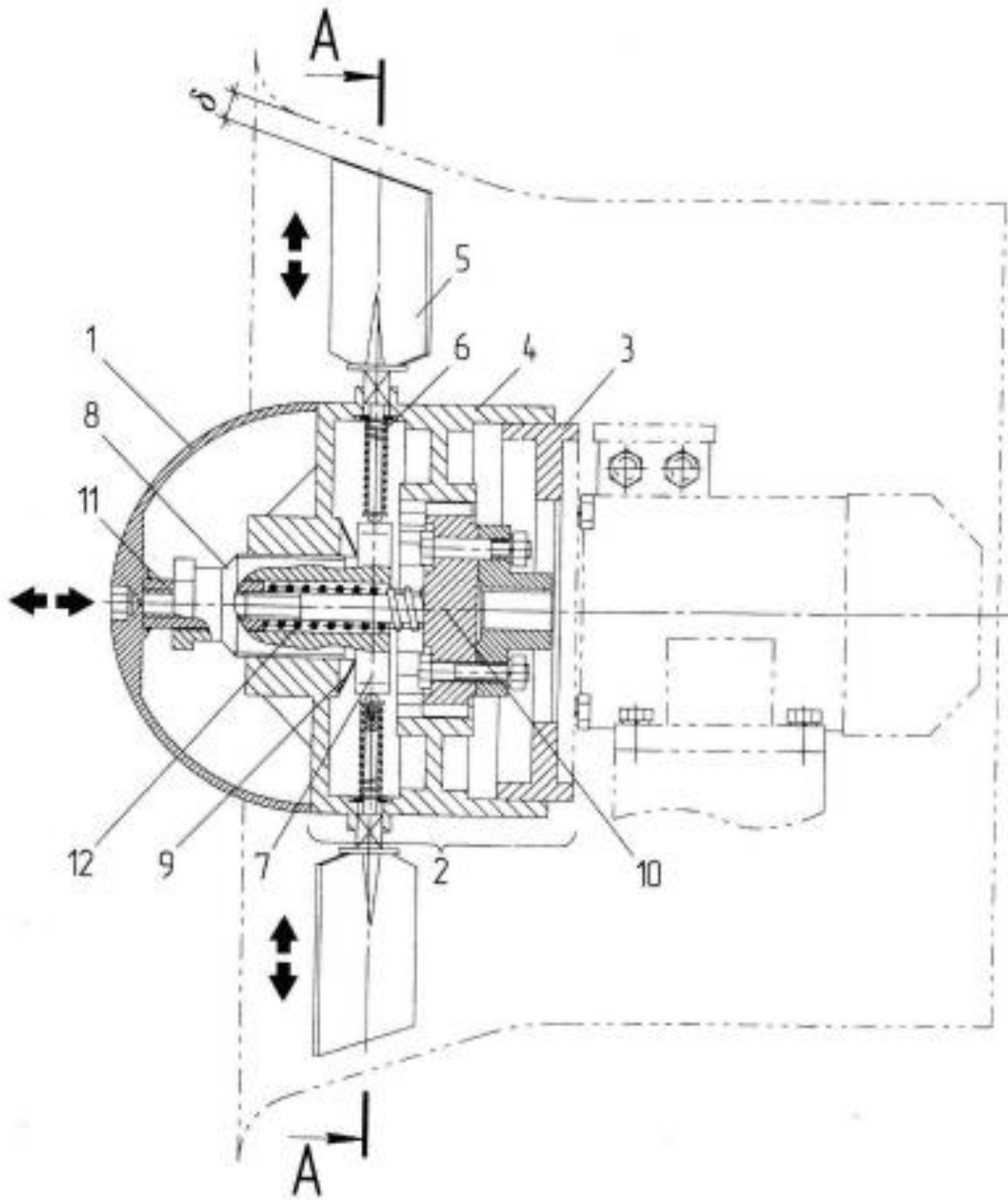
(57) Реферат:

Полезная модель относится к области вентиляции. Рабочее колесо осевого вентилятора содержит кож, телескопическую втулку и подвижные в осевом направлении лопадки. Хвостовики лопаток прижаты витыми пружинами к многошлицевому колесу, которое плотно посажено на регулировочный винт. Регулировочный винт стопорится тарельчатой пружиной. Телескопическая втулка состоит из неподвижной и подвижной секций. Подвижная секция телескопической втулки посредством шлицев сопрягается со сборным валом. На резьбовой конец сборного вала навинчена гайка, которая жестко соединена с кожом и стопорится

винтовой пружиной. За счет стабилизации смещения в резьбе регулировочного винта, вследствие нечувствительности тарельчатой пружины к вибрациям, снижается вероятность отклонения длины лопаток от требуемого значения. Благодаря телескопической конструкции втулки лопадки могут перемещаться вдоль оси колеса, что позволяет обеспечить постоянство величины радиального зазора между колесом и внутренней поверхностью корпуса вентилятора при уменьшении длины лопаток и, как следствие, постоянство КПД вентилятора на переменных режимах.

RU 225264 U1

RU 225264 U1



RU 225264 U1

RU 225264 U1

Фиг. 1

Полезная модель относится к области устройств для вентиляции, а именно к устройствам для вентиляции с принудительной циркуляцией воздуха, и может быть использована в конструкциях осевых вентиляторов для обычных сред.

Известно рабочее колесо осевого вентилятора, содержащее кок, втулку и подвижные в осевом направлении лопасти, хвостовики которых посредством витых пружин прижаты к многокулачковому колесу, плотно посаженному на регулировочный винт, стопоримый контргайкой (см. пат. Украины №90040, МПК (2006.01) F24F 7/06, опубл. 12.05.2014, Бюл. №9) - прототип.

К недостаткам известного рабочего колеса следует отнести высокую вероятность отклонения длины лопаток от требуемого значения, обусловленную низкой надежностью стопорения регулировочного винта из-за возможности раскручивания контргайки от вибраций, имеющих место в процессе работы вентилятора, а также снижение КПД вентилятора при уменьшении длины лопаток вследствие увеличения интенсивности вторичных течений из-за увеличения радиального зазора между колесом и внутренней поверхностью корпуса вентилятора.

В основу полезной модели поставлена задача усовершенствования рабочего колеса путем стабилизации сил трения в резьбе регулировочного винта и обеспечения постоянства величины радиального зазора между колесом и внутренней поверхностью корпуса вентилятора, что приведет к снижению вероятности отклонения длины лопаток от требуемого значения и постоянству КПД вентилятора при уменьшении длины лопаток.

Поставленная задача достигается тем, что в рабочем колесе осевого вентилятора, содержащем кок, втулку и подвижные в осевом направлении лопасти, хвостовики которых посредством витых пружин прижаты к многокулачковому колесу, плотно посаженному на регулировочный винт, согласно полезной модели, регулировочный винт стопорится тарельчатой пружиной, а втулка имеет телескопическую конструкцию, состоящую из неподвижной секции и подвижной секции, сопрягаемой посредством шлицев со сборным валом, на резьбовой конец которого навинчена жестко соединенная с коком гайка, стопоримая витой пружиной.

Предлагаемое рабочее колесо за счет стабилизации сил трения в резьбе регулировочного винта вследствие нечувствительности тарельчатой пружины к вибрациям, а также благодаря телескопической конструкции втулки, позволяющей перемещать лопасти вдоль оси колеса, обеспечивая постоянство величины радиального зазора между колесом и внутренней поверхностью корпуса вентилятора, характеризуется меньшей вероятностью отклонения длины лопаток от требуемого значения и постоянством КПД вентилятора при уменьшении длины лопаток.

Суть полезной модели объясняется иллюстративным материалом, где на фиг. 1 изображен продольный разрез рабочего колеса осевого вентилятора, а на фиг. 2 - разрез А-А на фиг. 1.

Рабочее колесо содержит кок 1, телескопическую втулку 2, состоящую из неподвижной секции 3 и подвижной секции 4, и подвижные в осевом направлении лопасти 5, хвостовики которых посредством витых пружин 6 прижаты к многокулачковому колесу 7, плотно посаженному на регулировочный винт 8, стопоримый тарельчатой пружиной 9. Подвижная секция 4 телескопической втулки 2 посредством шлицев сопрягается со сборным валом 10, на резьбовой конец которого навинчена жестко соединенная с коком 1 гайка 11, стопоримая витой пружиной 12.

Рабочее колесо осевого вентилятора функционирует следующим образом.

Вращение от сборного вала 10 через подвижную секцию 4 телескопической втулки

2 передается на лопатки 5, взаимодействующие с перемещаемой средой. Регулирование
длины лопаток 5 осуществляется с помощью регулировочного винта 8,
поворачивающего многокулачковое колесо 7, к которому посредством витых пружин
6 прижаты хвостовики лопаток 5. Фиксация длины лопаток 5 обеспечивается
5 стопорением регулировочного винта 8 тарельчатой пружиной 9. Постоянство величины
радиального зазора между колесом и внутренней поверхностью корпуса вентилятора
S достигается путем осевого перемещения подвижной секции 4 телескопической втулки
2 относительно ее неподвижной секции 3 за счет навинчивания или отвинчивания гайки
11 посредством вращения кока 1. Фиксация величины радиального зазора между
10 колесом и внутренней поверхностью корпуса вентилятора S обеспечивается стопорением
гайки 11 витой пружиной 12.

Выполнение колеса в соответствии с предлагаемым техническим решением позволит
снизить вероятность отклонения длины лопаток от требуемого значения и обеспечить
постоянство КПД вентилятора при уменьшении длины лопаток.

15

(57) Формула полезной модели

Рабочее колесо осевого вентилятора, содержащее кок, втулку и подвижные в осевом
направлении лопатки, хвостовики которых посредством витых пружин прижаты к
многокулачковому колесу, плотно посаженному на регулировочный винт, отличающееся
20 тем, что регулировочный винт стопорится тарельчатой пружиной, а втулка имеет
телескопическую конструкцию, состоящую из неподвижной секции и подвижной секции,
сопрягаемой посредством шлицев со сборным валом, на резьбовой конец которого
навинчена жестко соединенная с коком гайка, стопоримая витой пружиной.

25

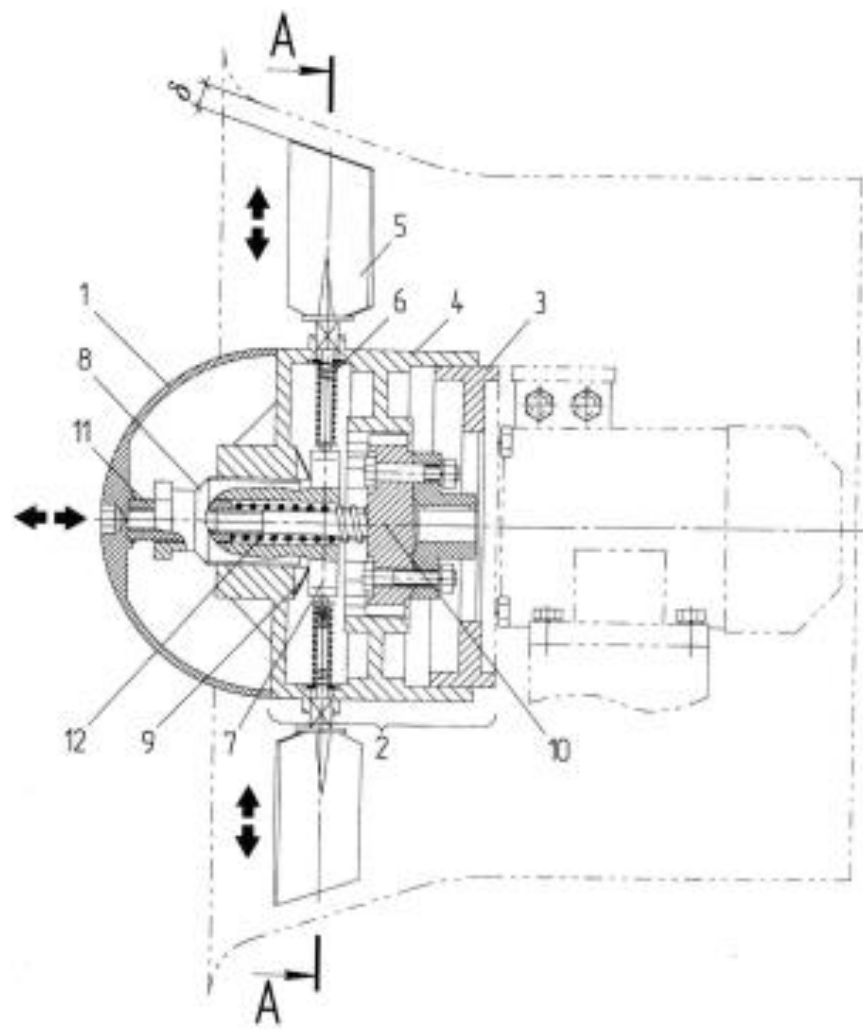
30

35

40

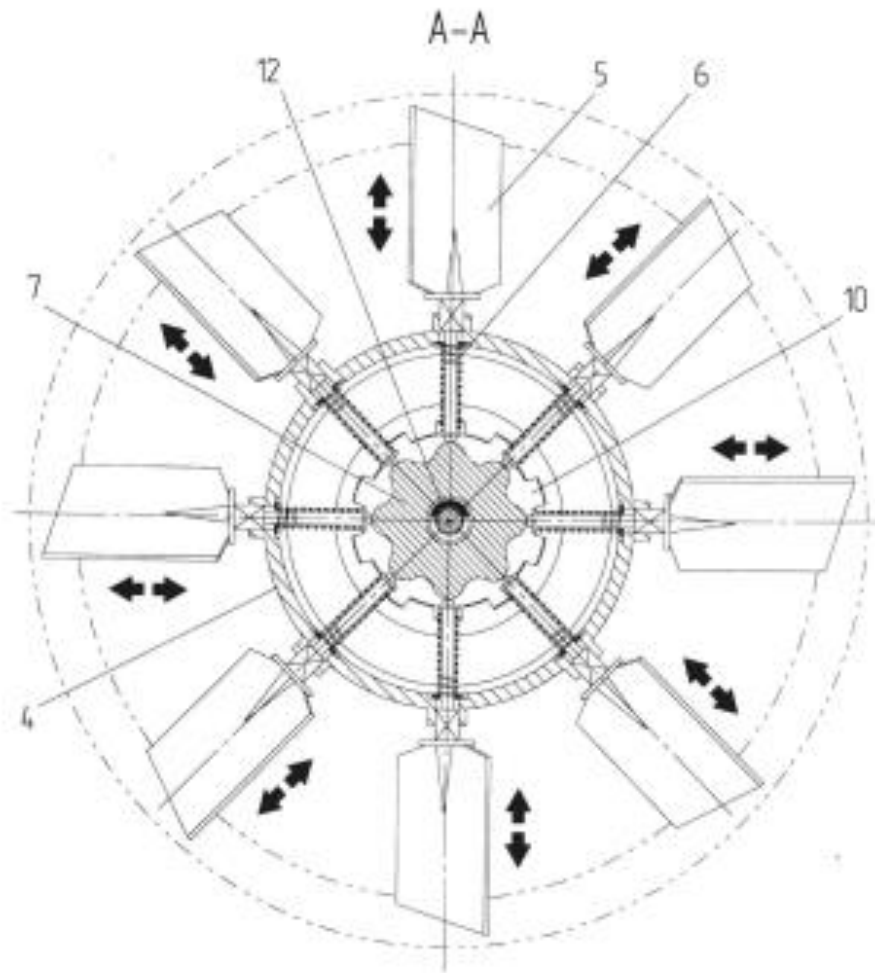
45

1



Фиг. 1

2



Фиг. 2

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

**Акты внедрения результатов
диссертационной работы**



**ГОСУДАРСТВЕННОЕ УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
ЛУГАНСКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ
«ЛУГАНСКВОДА»**

г. Луганск, Российская Федерация, Луганская Народная Республика, 291047
 кв. Пролетариата Донбасса, 166
 приемная тел: +7 (8572) 34-14-03, факс: +7(8572) 50-36-98
 E - mail: office@lugvoda.com WEB: www.lugvoda.com

13.06.2024 № 01/2382
 На № _____ от _____

«УТВЕРЖДАЮ»

Генеральный директор
 ГУП ЛНР «Лугансквода»

Р.Н. Каража

« 13 » 06 2024 г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов диссертационной работы
 Черниковой Ирины Демьяновны
 «Повышение эффективности отопительной-вентиляционных
 систем совершенствованием процессов регулирования
 аэротермодинамических характеристик»

Комиссия в составе председателя – Мовчана С.В., заместителя генерального директора, и членов: Сундеева А.С., главного инженера, и Овсиенко В.В., заместителя главного инженера, составила настоящий акт по факту использования и внедрения на ГУП ЛНР «Лугансквода» результатов диссертационной работы И.Д. Черниковой на тему «Повышение эффективности отопительной-вентиляционных систем совершенствованием процессов регулирования аэротермодинамических характеристик».

ГУП ЛНР «Лугансквода» были переданы:

- математическая модель комбинированной отопительно-вентиляционной системы как объекта автоматического управления температурным режимом в помещении для синтеза систем автоматического управления воздушным отоплением с регулированием расхода и температуры приточного воздуха;
- критерий энергетической эффективности регулирования аэродинамических характеристик вентиляционных систем, позволяющий

производить оценку возможности эффективного использования байпасного способа регулирования;

- методы выравнивания потока на выходе радиальных вентиляторов путем установки конструктивных элементов в диффузорах с несимметричным расширением для повышения производительности вентиляционных систем;

- двухконтурная система автоматического управления воздушным отоплением с MPC-регулятором расхода и ПИД-регулятором температуры приточного воздуха, обеспечивающая улучшение показателей качества регулирования аэротермодинамических характеристик.

На основе представленных материалов комиссия установила следующее:

1. В диссертационной работе решена актуальная научно-практическая задача повышения эффективности ОВС совершенствованием процессов регулирования аэротермодинамических характеристик, что обеспечивает улучшение показателей качества регулирования и снижение эксплуатационных затрат.

2. Практическая значимость исследования заключается в следующем.

Разработана структурная схема комбинированной отопительно-вентиляционной системы и на ее основе блок-диаграмма в среде Simulink пакета прикладных программ MATLAB для моделирования системы автоматического управления воздушным отоплением.

Предложена методика оценки возможности эффективного использования байпасного способа регулирования аэродинамических характеристик вентиляционных систем по начальному (максимальному) расходу в системе.

Разработаны рекомендации по выбору геометрических размеров и параметров размещения конструктивных элементов в диффузорах с несимметричным расширением для выравнивания потока на выходе радиальных вентиляторов, что повышает производительность вентиляционных систем.

Разработана двухконтурная система автоматического управления воздушным отоплением с MPC-регулятором расхода и ПИД-регулятором температуры приточного воздуха, обеспечивающая повышение эффективности отопительно-вентиляционных систем.

3. Результаты диссертационной работы И.Д. Черниковой «Повышение эффективности отопительно-вентиляционных систем совершенствованием процессов регулирования аэротермодинамических характеристик» внедрены и используются на ГУП ЛНР «Лугансквода» при модернизации инженерного оборудования производственных участков и помещений, при разработке мероприятий по обновлению и развитию материально-технической базы предприятия.

Председатель комиссии

С.В. Мовчан

Члены комиссии:

А.С. Сундеев

В.В. Овсиенко

ЧАСТНОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«Луганский завод «САНТЕХДЕТАЛЬ»

ЛНР, 291020, г. Луганск, ул. Руднева, 50
Код ЕГРЮЛ: 61122846 ИНН9402004040
Р/с 40702810609400323642 ПАО «ПРОМСВЯЗЬБАНК»
г. Москва БИК 044525555



ЧАСТНОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«Луганский завод «САНТЕХДЕТАЛЬ»

Тел.: (8572) 59 94 07
Тел:+7(959)148 66 97
Тел./факс: (8572) 934 514
e-mail: std-lg@mail.ru

исх. № 06/04 от «14» 06 2024 г.
на № _____ от « » _____ 2024 г.

«УТВЕРЖДАЮ»

Председатель правления
ЧАО «Луганский завод
«Сантехдеталь»

В.Г. Андреев
«14» 06 2024 г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов диссертационной работы
Черниковой Ирины Демьяновны
«Повышение эффективности отопительной-вентиляционных
систем совершенствованием процессов регулирования
аэротермодинамических характеристик»

Комиссия в составе председателя – Лазарева Д.А., зам председателя правления и членов комиссии: Камбиева А.С., начальника цеха металлоконструкций и Смоляковой М.А., главного экономиста, рассмотрев диссертационную работу Черниковой И.Л. «Повышение эффективности отопительной-вентиляционных систем совершенствованием процессов регулирования аэротермодинамических характеристик», установила:

1. Диссертационная работа посвящена решению актуальной научно-практической задачи повышения эффективности отопительно-вентиляционных систем совершенствованием процессов регулирования аэротермодинамических характеристик, что обеспечивает улучшение показателей качества регулирования и снижение эксплуатационных затрат.

2. Научную новизну и практическое значение составляют следующие результаты: математическая модель комбинированной отопительно-вентиляционной системы как объекта автоматического управления температурным режимом в помещении для синтеза систем автоматического управления воздушным отоплением с регулированием расхода и температуры приточного воздуха; критерий энергетической эффективности регулирова-

ния аэродинамических характеристик вентиляционных систем; методы выравнивания потока на выходе радиальных вентиляторов путем установки конструктивных элементов в диффузорах с несимметричным расширением, что обеспечивает повышение производительности вентиляционных систем; двухконтурная система автоматического управления воздушным отоплением с МРС-регулятором расхода и ПИД-регулятором температуры приточного воздуха, позволяющая улучшить показатели качества регулирования аэротермодинамических характеристик отопительно-вентиляционных систем; методика оценки возможности эффективного использования байпасного способа регулирования аэродинамических характеристик вентиляционных систем по начальному (максимальному) расходу в системе; рекомендации по выбору геометрических размеров и параметров размещения конструктивных элементов в диффузорах с несимметричным расширением для выравнивания потока на выходе радиальных вентиляторов.

3. Результаты и выводы диссертационной работы использованы и внедрены на ЧАО «Луганский завод «Сантехдеталь» при совершенствовании существующего технологического оборудования, при разработке мероприятий по модернизации и обновлению инженерного оборудования производственных участков и помещений.

4. Диссертационная работа Черниковой И.Д. «Повышение эффективности отопительно-вентиляционных систем совершенствованием процессов регулирования аэротермодинамических характеристик» является самостоятельным законченным исследованием, результаты которого представлены в виде научно-обоснованных рекомендаций, инженерных методик расчета, конструктивных и схемных решений, выполненных на современном научно-техническом уровне.

5. Ожидаемый годовой экономический эффект за счет снижения эксплуатационных затрат от модернизации отопительно-вентиляционной системы цеха металлоконструкций составляет 182 тыс. руб.

Председатель комиссии

Члены комиссии:

Д.А. Лазарев

А.С. Камбиев

М.А. Смолякова

«УТВЕРЖДАЮ»
 Ректор ФГБОУ ВО
 «Луганский государственный
 университет имени
 Владимира Даля»



проф. В.Д. Рябичев

« 14 » 06 2024 г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов диссертационной работы
 Черниковой Ирины Демьяновны
 «Повышение эффективности
 отопительно-вентиляционных систем совершенствованием
 процессов регулирования аэротермодинамических характеристик»,
 представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук
 по специальности 2.1.3 – Теплоснабжение, вентиляция,
 кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение

Комиссия в составе председателя – Ремень В.И., к.т.н., доц., заместителя директора института строительства, архитектуры и жилищно-коммунального хозяйства Луганского государственного университета имени Владимира Даля (ИСА и ЖКХ ЛГУ им. В. Даля), и членов: Копец К.К., к.т.н., доц., заведующей кафедрой вентиляции, теплогазо- и водоснабжения ИСА и ЖКХ ЛГУ им. В. Даля, и Андрийчука В.Н., к.т.н., старшего преподавателя кафедры вентиляции, теплогазо- и водоснабжения ИСА и ЖКХ ЛГУ им. В. Даля, составила данный акт по факту использования в ЛГУ им. В. Даля результатов и выводов исследований, выполненных в диссертационной работе Черниковой И.Д. «Повышение эффективности отопительно-вентиляционных систем совершенствованием процессов регулирования аэротермодинамических характеристик».

При подготовке бакалавров по направлению 08.03.01 – Строительство, профиль «Теплогазоснабжение и вентиляция», магистров по направлению 08.04.01 – Строительство, магистерская программа «Теплогазоснабжение населенных мест и предприятий» в ходе проведения лекционных, лабораторных и практических занятий, выполнения курсовых проектов и работ, выпускных квалификационных работ, проведения научно-

исследовательской работы студентов в 2022/2023, 2023/2024 учебных годах были внедрены в учебный процесс следующие результаты диссертационной работы:

- математическая модель комбинированной отопительно-вентиляционной системы как объекта автоматического управления температурным режимом в помещении для синтеза систем автоматического управления воздушным отоплением с регулированием расхода и температуры приточного воздуха;

- критерий энергетической эффективности регулирования аэродинамических характеристик вентиляционных систем, позволяющий производить оценку возможности эффективного использования байпасного способа регулирования;

- методы выравнивания потока на выходе радиальных вентиляторов путем установки конструктивных элементов в диффузорах с несимметричным расширением, что обеспечивает повышение производительности вентиляционных систем;

- двухконтурная система автоматического управления воздушным отоплением с МРС-регулятором расхода и ПИД-регулятором температуры приточного воздуха, обеспечивающая улучшение показателей качества регулирования аэротермодинамических характеристик отопительно-вентиляционных систем.

С использованием представленных материалов усовершенствованы учебно-методические комплексы дисциплин «Теоретические основы создания микроклимата в помещении», «Насосы, вентиляторы и компрессоры в системах теплогазоснабжения и вентиляции», «Вентиляция», «Кондиционирование воздуха и холодоснабжение зданий», «Теплотехнические и газодинамические процессы в технике», разработано методическое и программное обеспечение для выполнения курсовых проектов и работ, выпускных квалификационных работ, для проведения научно-исследовательской работы студентов.

Председатель комиссии

Ремень В.И.

Члены комиссии:

Копец К.К.

Андрийчук В.Н.