

На правах рукописи

ЧЕРНИКОВА ИРИНА ДЕМЬЯНОВНА

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

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Макеевка – 2024

Работа выполнена на кафедре «Вентиляция, теплогазо- и водоснабжение» ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля»

**Научный
руководитель:**

Пилавов Манолис Васильевич,
доктор технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля», профессор кафедры
«Вентиляция, теплогазо- и водоснабжение»

**Официальные
оппоненты:**

Боровков Дмитрий Павлович,
доктор технических наук,
ООО «Проектно-технологическое бюро
проектно-строительного объединения
Волгоградгражданстрой», заместитель
директора по науке

Ангелюк Илья Павлович,
кандидат технических наук, доцент,
ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет
имени В.И. Вернадского», доцент кафедры
«Инженерные системы в строительстве»

**Ведущая
организация:**

ФГБОУ ВО «Донецкий национальный
технический университет»

Защита состоится «___» ____ 2025 года в 10-00 часов (по местному времени) на заседании диссертационного совета 24.2.484.01 при ФГБОУ ВО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» по адресу: 286123, Российская Федерация, ДНР, г.о. Макеевский, г. Макеевка, ул. Державина, д. 2, зал заседаний ученого совета. Тел. факс: +7(856) 343-7033, e-mail: 24.2.484.01@donnasa.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» по адресу: 286123, Российская Федерация, ДНР, г.о. Макеевский, г. Макеевка, ул. Державина, д. 2 (<http://dennasa.ru>).

Автореферат разослан «___» ____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Удовиченко Злата Викторовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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., Порохин В.Н., Свищунов 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 аэродинамических 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 аprobация 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 текущих 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 очно-заочная 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 научометрических 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 страниц, 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, изложена научная новизна, теоретическая и практическая значимость, методология и методы исследования, приведены положения, выносимые на защиту диссертации, обоснована достоверность полученных результатов, даны сведения об апробации научных исследований и опубликованных научных работах, представлена информация по структуре и объему диссертации.

В первом разделе выполнен анализ современных подходов к разработке и проектированию систем ОВКВ, который показал, что повышение эффективности ОВС требует совершенствования процессов регулирования аэродинамических характеристик на основе разработки научно обоснованных технических решений и рекомендаций.

Отмечено, что 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. Поэтому, обеспечить снижение эксплуатационных затрат возможно, прежде всего, уменьшением энергопотребления и повышением надежности оборудования, элементов и устройств систем ОВКВ.

Показано, что важным резервом уменьшения энергопотребления является сокращение потребляемой мощности путем снижения потерь энергии, связанных с процессами регулирования аэродинамических характеристик ОВС. Это может быть достигнуто разработкой САУ воз-

душным отоплением, обеспечивающих рациональное использование энергоресурсов за счет улучшения показателей качества регулирования ОВС 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 факторами, 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 воздуховодов с выходными патрубками радиальных вентиляторов, что обеспечивает повышение производительности вентиляционных систем.

На основании выполненного анализа состояния проблемы, научных работ по вопросам повышения эффективности ОВС сформулированы цель и соответствующие задачи исследования, приведенные в начале автореферата.

Во втором разделе разработана математическая модель комбинированной ОВС как объекта автоматического управления температурным режимом в помещении. Рассмотрена комбинированная ОВС, построенная на основе приточной вентиляционной системы VAV (от английского названия «Variable Air Volume» – переменный объем воздуха), которая имеет возможность дополнительного нагрева или охлаждения приточного воздуха. Схема ОВС переменного расхода воздуха с регулированием его температуры приведена на рисунке 1.

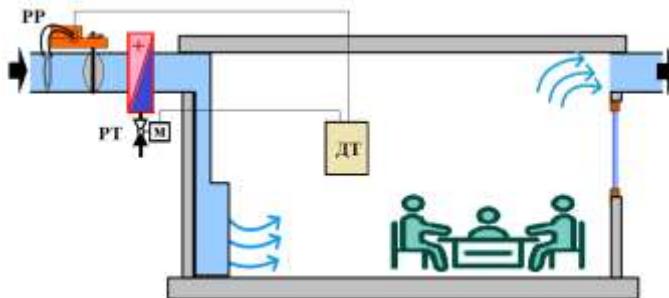


Рисунок 1 – Схема комбинированной ОВС переменного расхода воздуха с регулированием его температуры

Входным (управляющим) сигналом является заданная температура (закон изменения ее во времени t) в значимой (рабочей) зоне обслуживающего помещения $T_s(t)$. По расхождению $\varepsilon(t)$ заданной температуры $T_s(t)$ и температуры в значимой (рабочей) зоне $T(t)$, контролируемой датчиком температуры ΔT ,

$$\varepsilon(t) = T_s(t) - T(t) \quad (1)$$

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 по расхождению температур $\varepsilon(t)$ изменяет температуру приточного воздуха $T_h(t)$, который непосредственно поступает в обслуживаемое помещение. В дальнейшем температуру в наиболее значимой (рабочей) зоне $T(t)$ называем температурой в помещении.

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

$$Q_{ah}(t) = cG(t)[T_h(t) - T(t)], \quad (2)$$

где c – теплоемкость воздуха.

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

$$Q_{in}(t) = Q_{ah}(t) + Q_{sh}(t). \quad (3)$$

Обозначим теплопотери как $Q_{out}(t)$ и определим суммарные теплоизбытки $\Delta Q(t)$ (теплодифицит при отрицательном знаке)

$$\Delta Q(t) = Q_{in}(t) - Q_{out}(t). \quad (4)$$

В относительно длительном промежутке времени ОВС может находиться 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 . Для данного режима теплопоступления Q_{in}^0 равны теплопотерям Q_{out}^0 и обозначены через Q_0 , т.е. $Q_{in}^0 = Q_{out}^0 = Q_0$.

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

$$Q_{in}^0 = Q_{ah}^0 + Q_{sh}^0. \quad (5)$$

Для математического описания рабочих процессов в комбинированной ОВС в рассмотрение введены безразмерные отклонения переменных: температур в помещении и наружного воздуха, температуры и массового расхода приточного воздуха, а также теплопоступлений, теплоизбытоков и теплопотерь

$$\Delta \bar{T}(t) = \Delta T(t) / (T_0 - T_{out}^0); \quad (6)$$

$$\Delta \bar{T}_{out}(t) = \Delta T_{out}(t) / (T_0 - T_{out}^0); \quad (7)$$

$$\Delta \bar{T}_h(t) = \Delta T_h(t) / (T_h^0 - T_0); \quad (8)$$

$$\Delta \bar{G}(t) = \Delta G(t) / G_0; \quad (9)$$

$$\Delta \bar{Q}_{in}(t) = \Delta Q_{in}(t) / Q_0; \quad (10)$$

$$\Delta \bar{Q}_G(t) = \Delta Q_{ah}(t) / Q_{ah}^0; \quad (11)$$

$$\Delta \bar{Q}_{sh}(t) = \Delta Q_{sh}(t) / Q_{sh}^0; \quad (12)$$

$$\Delta \bar{Q}_{out}(t) = \Delta Q_{out}(t) / Q_0; \quad (13)$$

а также их преобразований по Лапласу: $T_s(s)$, $T(s)$, $T_{out}(s)$, $T_h(s)$, $G(s)$, $Q_{in}(s)$, $Q_G(s)$, $Q_{sh}(s)$, $Q_{out}(s)$, где s – переменная Лапласа.

Математическая модель комбинированной ОВС как объекта автоматического управления представлена структурной схемой, приведенной на рисунке 2. Структурная схема включает передаточную функцию $W_0(s)$ для температуры в помещении по общим теплопоступлениям, а также передаточную функцию $W_{out}(s)$ для температуры в помещении по температуре наружного воздуха. На схеме коэффициенты передач

$$k_{ah} = \frac{Q_{ah}^0}{Q_0}; \quad k_{sh} = \frac{Q_{sh}^0}{Q_0}; \quad k_{ah} + k_{sh} = 1. \quad (14)$$

Разработанная 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.

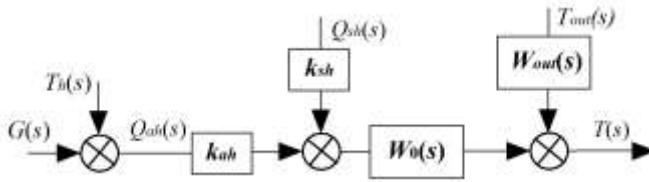


Рисунок 2 – Структурная схема комбинированной ОВС как объекта автоматического управления

Передаточные функции $W_0(s)$ и $W_{out}(s)$ устанавливаются либо на основе аналитических подходов, либо с использованием экспериментальных методов идентификации динамических систем.

Рассмотрены подходы к структурной и параметрической идентификации математических моделей рабочих процессов систем ОВКВ и методы определения параметров для выбранной структуры динамической модели. Несмотря на сложность математического описания, процессы в системах ОВКВ они имеют общие черты. Данные системы инерционны и являются объектами с саморегулированием, т.е. регулируемая переменная стабилизируется на некотором значении, переходные процессы в них имеют не колебательный вид и характерное запаздывание. 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 ОВС. Данные устройства лишены влияния влажности, загрязненности, химической агрессивности рабочей среды, вибраций, резких перепадов температуры. Кроме нечувствительности к перечисленным выше факторами, струйные устройства имеют более высокую надежность и долговечность, а также меньшие габариты и материалоемкость, благодаря отсутствию подвижных механических частей.

Для управления струйными устройствами, установленными перед вентилятором, организуется байпасный подвод воздуха, т.е. его расход через частично открытый обводной канал. При использовании радиальных вентиляторов с лопатками, загнутыми назад, в ряде случаев достигается повышение энергетической эффективности регулирования вентиляционной системы в целом. Для оценки возможности эффективного использования байпасного способа регулирования по начальному (максимальному) расходу в системе предложен критерий энергетической эффективности регулирования аэродинамических характеристик вентиляционных систем, который представлен в следующем виде

$$\Delta \bar{L} + \Delta \bar{P}_v \leq \Delta \bar{\eta}, \quad (15)$$

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, давления и КПД вентилятора при открытии байпасной линии; P_0 , η_0 – значения полного давления и КПД вентилятора при начальном расходе L_0 .

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.

Численное моделирование турбулентных течений проводилось в модуле Flow Simulation программного комплекса SOLIDWORKS. При описании турбулентного течения применялась стандартная $k-\varepsilon$ модель турбулентности, в основу которой положен анализ изменения кинетической энергии k турбулентности и скорости ее диссипации ε . Для расчета дополнительных турбулентных напряжений использовалась концепция турбулентной вязкости с определением кинематического коэффициента турбулентной вязкости ν_{turb} по «связке» Прандтля-Колмогорова. Численное моделирование показало, что для выравнивания потока в диффузорах с несимметричным расширением, имеющих разные наклоны боковых стенок, целесообразной является установка конструктивных элементов в виде простой или составной выравнивающих пластин.

В третьем разделе 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. Предложена методика проведения экспериментов и обработка опытных данных. При этом были решены следующие задачи: проектирование и изготовление экспериментальных установок; подбор контрольно-измерительной и регистрирующей аппаратуры; непосредственное проведение экспериментов, оценка погрешности эксперимента, оценка погрешностей измерения, обработка экспериментальных данных; проверка адекватности аппроксимационных зависимостей для расчета аэродинамических характеристик.

Выполнены экспериментальные исследования по повышению производительности вентиляционных систем путем размещения конструктивных элементов в диффузорах с несимметричным расширением, имеющих разные наклоны боковых стенок. Экспериментальный стенд спроектирован на базе радиального вентилятора ВР 80-75-2,5 (рисунок 3). В

качестве конструктивных элементов рассматривались простая и составная выравнивающие пластины. Согласно рис.3 выравнивающая пластина 1 устанавливалась в диффузоре 2 с частичным погружением в выходной патрубок 3 вентилятора 4. Для проведения экспериментов было изготовлено несколько диффузоров с разными наклонами боковых стенок для перехода с поперечного сечения выходного патрубка 175x175 мм на поперечное сечение нагнетательного воздуховода 250x250 мм. Расстояние между поперечными сечениями составляло 354 мм, относительная длина диффузора 2,02, степень расширения 2,04. Длина простой пластины и общая длина составной выравнивающих пластин 155 мм. На рис. 3 сопоставлены типовые аэродинамические характеристики вентилятора, полученные аппроксимацией экспериментальных данных, при наличии простой и составной выравнивающих пластин с базовой с характеристикой вентилятора без пластины в диффузоре.

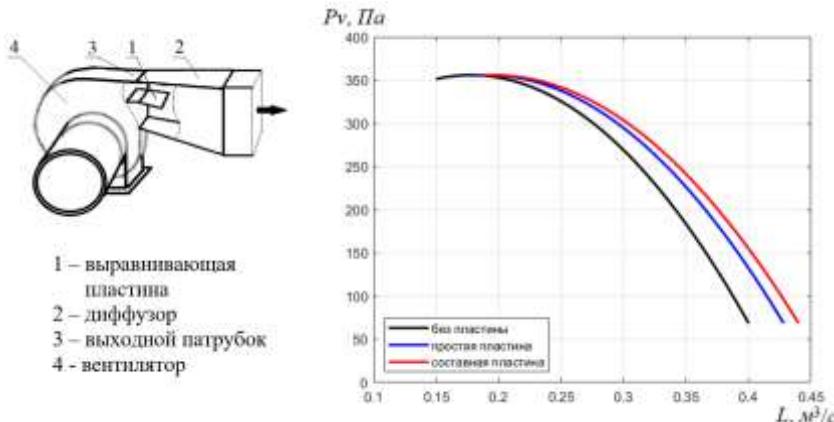


Рисунок 3 – Аэродинамические характеристики вентилятора без пластины, при наличии простой и составной выравнивающих пластин

Оценка адекватности аппроксимационных зависимостей для расчета аэродинамических характеристик радиального вентилятора проводилась по критерию Фишера. Значения экспериментального 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.

Четвертый раздел посвящена повышению эффективности ОВС.

Разработаны рекомендации по выбору геометрических размеров и параметров размещения конструктивных элементов в диффузорах с несимметричным расширением, имеющих разные наклоны боковых сте-

нок, для повышения производительности вентиляционных систем путем выравнивания потока на выходе радиальных вентиляторов.

При использовании составной выравнивающей пластины в случае наклона в одну сторону боковых стенок рекомендуемый угол наклона передней части по потоку составляет $\alpha_1=(\alpha_{1\delta}+\alpha_{2\delta})/4$, задней по потоку $\alpha_2=(\alpha_{1\delta}+\alpha_{2\delta})/2$; в случае наклона в разные стороны боковых стенок $\alpha_1=(\alpha_{1\delta}-\alpha_{2\delta})/4$, $\alpha_2=(\alpha_{1\delta}-\alpha_{2\delta})/2$, где $\alpha_{1\delta}$ и $\alpha_{2\delta}$ – углы наклона соответственно левой и правой боковых стенок диффузора согласно рисунку 4. Также даны рекомендации по размерам частей пластины, параметров ее погружения в выходной патрубок вентилятора и расположения в плоскости патрубка. Рассмотрены рекомендуемые размеры и параметры размещения простой выравнивающей пластины.

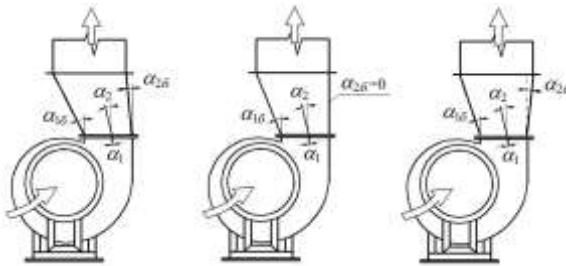


Рисунок 4 – Установка составной выравнивающей пластины в диффузоре с несимметричным расширением и разными наклонами боковых стенок

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.

Предложена методика оценки возможности эффективного использования байпасного способа регулирования аэродинамических характеристик вентиляционных систем. Методика включает процедуру аппроксимации полного давления вентилятора $P_v(Q)$ и его КПД $\eta_v(Q)$ полиномами второго порядка

$$P_v(L)=a + bL + cL^2; \quad (16)$$

$$\eta(L)=A + BL + CL^2, \quad (17)$$

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

На основании (16, 17) критерий (15) преобразован к условию, на основании которого можно выполнить как оценку эффективности байпасного регулирования по заданному начальному (максимальному) расходу

L_0 в системе, так и оценку расхода, начиная с которого достигается эффективное байпасное регулирование,

$$\frac{1}{L_0} + \frac{b + 2cL_0}{a + bL_0 + cL_0^2} - \frac{B + 2CL_0}{A + BL_0 + CL_0^2} \leq 0. \quad (18)$$

Использование предложенной методики показано на примере лабораторного стенда для экспериментального исследования аэродинамических характеристик вентиляционных систем со струйными регулирующими устройствами. Выполненные оценки подтвердили экспериментальные результаты снижения потребляемой мощности более 5% при расходе в байпасном канале до 0,5 от значения расхода вентилятора.

Разработанная математическая модель комбинированной ОВС как объекта автоматического управления (рисунок 2) позволяет синтезировать САУ воздушным отоплением с различными регуляторами расхода и температуры приточного воздуха. Введем безразмерное отклонение заданной температуры в помещение от стационарного значения T_0 аналогично безразмерным отклонениям температуры в помещении (6) и температуры наружного воздуха (7)

$$\Delta \bar{T}_s(t) = \Delta T_s(t) / (T_0 - T_{out}^0), \quad (19)$$

а также согласно (1) рассогласование безразмерных отклонений заданной температуры и температуры в помещении, преобразованных по Лапласу,

$$\varepsilon(s) = T_s(s) - T(s). \quad (20)$$

В двухконтурной САУ воздушным отоплением в общем случае рассматриваем различные регуляторы для регулирования расхода и температуры приточного воздуха

$$G(s) = W_{cG}(s) \varepsilon(s); \quad (21)$$

$$T(s) = W_{cT}(s) \varepsilon(s), \quad (22)$$

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

На основании (20-22) и рисунка 2 получена структурная схема двухконтурной САУ воздушным отоплением (рисунок 5).

Построена САУ воздушным отоплением с MPC-регулятором расхода и ПИД-регулятором температуры приточного воздуха. Для моделирования САУ в среде Simulink пакета прикладных программ MATLAB разработана блок-диаграмма, приведенная на рисунке 6. Для синтеза MPC-регулятора в MATLAB использован набор программных инструментов Model Predictive Control Toolbox.

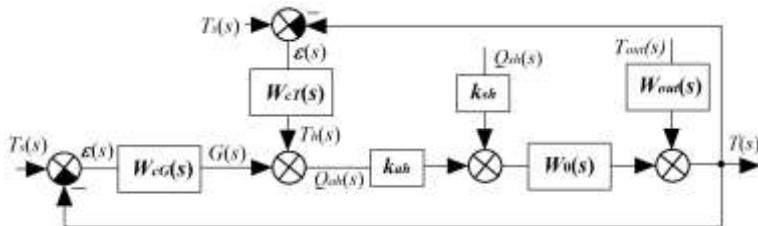


Рисунок 5 – Структурная схема двухконтурной САУ воздушным отоплением

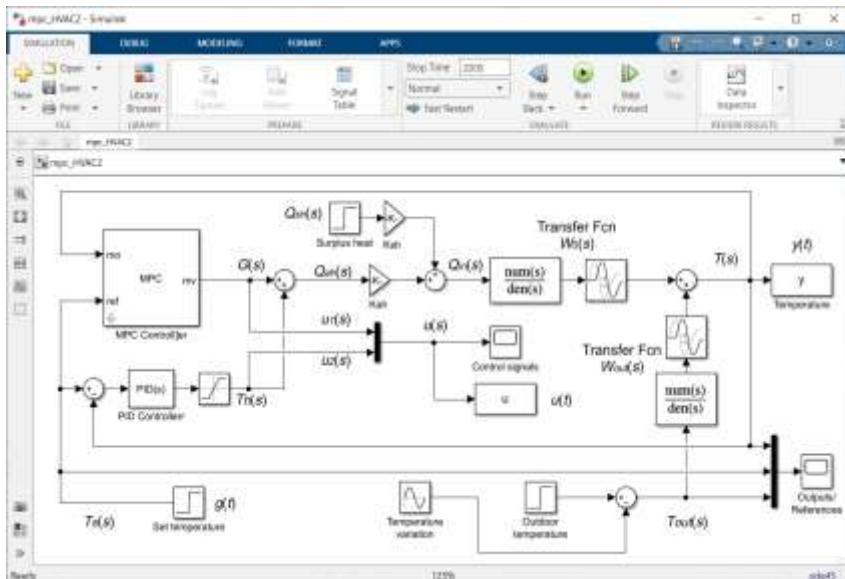


Рисунок 6 – Блок-диаграмма САУ в среде Simulink

Блок-диаграмма предусматривает моделирование САУ при различных воздействиях и их комбинации. Прежде всего, предусмотрено исследование системы при воздействии входного сигнала заданной температуры в помещении $T_d(s)$. Имеется возможность моделирования поведения системы при изменении температуры наружного воздуха $T_{out}(s)$ как при скачкообразном, так и при колебательном характере ее изменения. Также, предусмотрен анализ воздействия изменения дополнительных теплоизбытков в помещении $Q_{sh}(s)$.

В среде Simulink пакета прикладных программ MATLAB проведены исследования переходных процессов в комбинированной ОВС и выпол-

нен анализ показателей качества регулирования аэротермодинамических характеристик ОВС. Для объекта управления, в качестве которого рассматривалось административное помещение объемом 134,4 м³, на основе экспериментальных данных выполнена параметрическая идентификация передаточной функцией

$$W_0(s) = \frac{e^{-49.7s}}{(25,8s+1)(457s+1)}. \quad (23)$$

Для MPC-регулятора принимался период квантования $\Delta T = 1$ с, горизонт прогнозирования $N_p = 800$ шагов, горизонт управления $N_c = 300$ шагов, минимальное значение управляющего сигнала задавалось -1, максимальное значение 2. Рассматривался ПИД-регулятор с передаточной функцией $W_{PID}(s) = 1 + 1/(300s) + s$. На выходе ПИД-регулятора подсоединенна типовая нелинейность типа «зона насыщения».

На рисунке 7 сопоставлена переходная характеристика объекта управления с переходными процессами в САУ с ПИД-регулятором в обоих контурах и в САУ с MPC-регулятором и ПИД-регулятором. Совместное применение MPC-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.

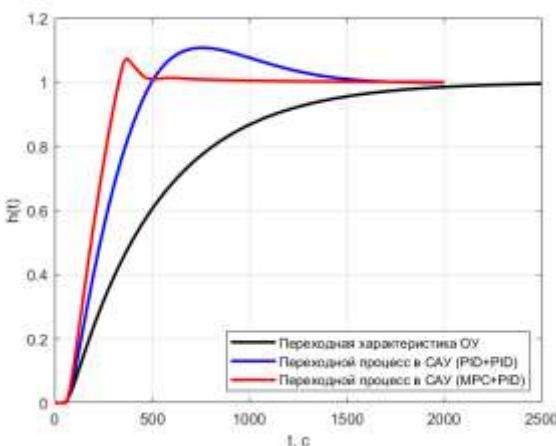


Рисунок 7 – Переходные процессы в САУ

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании выполненных исследований решена актуальная научно-практическая задача повышения эффективности ОВС совершенствованием процессов регулирования аэродинамических 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 от-

носительное 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 аэромеханических 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. Ожидаемый годовой экономический эффект за счет снижения эксплуатационных затрат от модернизации ОВС цеха металлоконструкций ЧАО «Луганский завод «Сантехдеталь» составляет 182 тыс. руб.

Список опубликованных работ по теме диссертации

Публикации в рецензируемых научных изданиях:

1. 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> (Разработана математическая модель комбинированной ОВС)

2. 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> (*Обоснована идентификация объектов ОВС в виде передаточных функций апериодических звеньев первого и второго порядков с запаздыванием*)

3. **Черникова, И.Д.** 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 – 2023. – № S1. – С. 312-320. (*Рассмотрен алгоритм адаптивного прогнозирующего управления вентиляционной системой с использованием MPC-регулятора*)

4. **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. – 2023. – № S1. – С. 321-327. (*Разработаны рекомендации по размещению конструктивных элементов в диффузорах с несимметричным расширением*)

Публикации в других изданиях:

5. **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. – 2023. – № 12(78). – С. 98-104. (*Проведено численное моделирование турбулентных течений в диффузорах с неравномерным полем скоростей в начальном сечении*)

6. **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. (*Разработан экспериментальный стенд и методика обработки опытных данных для исследований по влиянию конструктивных элементов на характеристики радиального вентилятора*)

Патент

7. Патент на полезную модель № 225264 Российской Федерации, 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. (*Разработана телескопическая конструкция втулки рабочего колеса*)

Доклады на научных конференциях:

8. Sokolov, V. Improvement of HVAC systems based on adaptive predictive control / V. Sokolov, O. Krol, V. Andriichuk, **I. Chernikova**, T. Shevtsova // E3S Web of Conferences. – 2023. – Vol. 420, 07020. URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202342007020>
9. **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.
10. **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 открытой международной очно-заочной науч.-практ. конф. молодых ученых и студентов. – Макеевка: ФГБОУ ВО «ДОННАСА», 2024. – С. 217-222.
11. **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.
12. **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.

АВТОРЕФЕРАТ

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

ЧЕРНИКОВА ИРИНА ДЕМЬЯНОВНА

Подписано в печать 22.01.2025 г.

Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура Times.

Печать лазерная. Усл. печ. лист 1,0.

Тираж 100 экз. Изд. № 01487 .

**Издательство
Луганского государственного университета
имени Владимира Даля**

Адрес издательства: 291034, г. Луганск, кв. Молодежный, 20а

Тел.: +7(959) 138-34-80

E-mail: izdat.lguv.dal@gmail.com