

## **ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА**

на диссертационную работу Никулина Вячеслава Сергеевича  
«Управление вредными выбросами в малоэмиссионной камере сгорания  
газотурбинного двигателя на основе нейросетевых технологий»,  
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук  
по специальности 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими  
процессами и производствами

### **Актуальность темы**

Одной из актуальных задач в развитии систем управления камерами сгорания авиационных газотурбинных двигателей является обеспечение возможности измерения концентраций вредных выбросов оксидов азота в полетных режимах. Применяемые в настоящее время подходы ориентированы на результаты стационарных испытаний и не позволяют учитывать изменения внешних условий и динамику процессов в реальном времени, что снижает экологическую и эксплуатационную эффективность газотурбинных установок.

Диссертационная работа Никулина Вячеслава Сергеевича посвящена актуальной задаче снижения эмиссии оксидов азота в авиационных газотурбинных двигателях за счет создания и реализации методов и систем автоматического управления, использующих нейросетевые модели и виртуальные измерители. Автором разработана система управления выбросами, предложены алгоритмы перераспределения топлива между диффузионным и гомогенным коллекторами камеры сгорания для минимизации выбросов оксидов азота, представлены новые адаптивные виртуальные измерители температуры и эмиссии оксидов азота, построенные на основе нейросетевых моделей. Разработанные решения обеспечивают повышение устойчивости процессов горения, снижение интегральных выбросов оксидов азота и сохранение эксплуатационных характеристик двигателя без необходимости внесения изменений в конструкцию камеры. Проведённое моделирование и экспериментальная верификация подтвердили эффективность предложенного подхода, что обуславливает актуальность и высокую практическую значимость выполненной работы в контексте повышения экологической безопасности авиационного транспорта.

### **Оценка структуры и содержания работы**

Диссертационная работа Никулина В.С. состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и 7 приложений. Общий объем

диссертации составляет 189 страниц, основная часть работы описана на 175 страницах. Список источников содержит 128 наименований.

Во введении обоснована актуальность темы, определены цель работы, задачи и ее теоретическая и практическая значимость, представлены методы исследования, сформулированы научная новизна и основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен полноценный обзор научных работ, соответствующих теме исследования. Приведено описание особенностей малоэмиссионных камер сгорания газотурбинных двигателей (ГТД), их конструкции, принципы работы и проблемы, связанные с выбросами вредных веществ. Проанализированы диапазоны устойчивой работы камеры сгорания и механизмы образования вредных веществ, включая оксиды азота. Приведены требования к выбросам оксидов азота в соответствии с международными стандартами. Выполнен обзор математических моделей эмиссии оксидов азота и предложены пути их совершенствования для применения в условиях реального времени. На основании проведенного анализа сформулированы основные проблемы в системах управления выбросами, цели и задачи исследования.

Вторая глава посвящена описанию метода управления концентрацией эмиссии оксидов азота в малоэмиссионной камере сгорания на основе оценки состояний «виброгорения» и «бедного срыва пламени» с применением нейросетевых технологий. Детально описан алгоритм перераспределения топлива между диффузионным и гомогенным коллекторами для минимизации выбросов вредных веществ при сохранении устойчивости горения. Приведена разработанная автором модифицированная система автоматического управления выбросами оксидов азота камеры сгорания газотурбинных двигателей. Представлена структура адаптивных виртуальных измерителей температуры и концентрации оксидов азота.

Третья глава посвящена моделированию разработанных методов управления выбросами оксидов азота и виртуальных измерителей в среде Matlab Simulink в различных эксплуатационных условиях, включая нормальные режимы, воздействие флуктуационных и импульсных помех, деградацию элементов и отказы измерительных каналов. Полученные результаты моделирования подтверждают эффективность предложенного подхода к управлению выбросами.

В четвёртой главе изложены результаты внедрения полученных методов и подходов в процесс испытаний газотурбинного двигателя на специализированном стенде, подтвердившие практическую реализуемость и эффективность разработанных методов и алгоритмов.

В заключении сформулированы выводы по проделанной работе и перечислены основные результаты исследования.

В приложениях представлены акты о внедрении результатов, программные модули для реализации методов управления, свидетельства о регистрации программных продуктов.

Диссертация и автореферат написаны грамотным и понятным языком, имеют логичную структуру. Основные положения диссертационного исследования изложены в достаточном количестве публикаций, среди которых 7 опубликованы в научных изданиях из перечня ВАК (в том числе, 3 статьи проиндексированы международной базой Scopus); получено 1 свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ.

### **Научная новизна диссертационной работы**

К основным научным результатам, полученным в диссертации, следует отнести:

1. Метод интеллектуального управления процессами горения в малоэмиссионной камере сгорания авиационных газотурбинных двигателях, реализующий динамическое перераспределение топлива между коллекторами камеры сгорания на основе измерений суммарного уровня накопленных выбросов оксидов азота в процессе взлётно-посадочного цикла, с обеспечением устойчивости горения и предотвращением перехода в опасные режимы вибрационного горения и срыва пламени.

2. Адаптивные виртуальные измерители температуры горения, базирующийся на принципах нейро-нечеткого подхода, и эмиссии оксидов азота на основе нейросетевого моделирования с учетом адаптации к изменяющимся режимам работы газотурбинного двигателя.

3. Алгоритмы перераспределения подачи топлива между диффузионным и гомогенным коллекторами камеры сгорания с учетом переходных режимов работы камеры сгорания, обеспечивающие снижение эмиссии оксидов азота при одновременном поддержании устойчивости процесса горения в условиях флуктуационных, импульсных помех, деградации элементов системы управления и отказов измерителей.

### **Достоверность и обоснованность полученных результатов**

Достоверность полученных результатов, изложенных в диссертации, обеспечивается корректностью постановки задачи, подробным анализом предложенных алгоритмов, экспериментальной верификацией разработанных виртуальных измерителей и методов перераспределения топлива на сертификационном стенде газотурбинного двигателя повышенной тяги. Основные положения исследования апробированы в рамках российских и

международных научных конференций. Все выдвигаемые научные положения подтверждены экспериментальными исследованиями. Выводы логически вытекают из материалов исследований и в полном объеме отражают поставленные задачи.

Автореферат Никулина В.С. занимает 20 страниц текста. Содержание автореферата соответствует диссертации.

Опубликованные работы в полной мере отражают основные положения и содержание диссертации.

### **Практическая значимость полученных автором результатов**

Практическая значимость диссертационной работы заключается в разработке и внедрении интеллектуальной системы управления выбросами оксидов азота малоэмиссионной камеры сгорания авиационного газотурбинного двигателя повышенной тяги, реализующей перераспределение подачи топлива на основе адаптивных виртуальных измерителей температуры и концентрации  $\text{NO}_x$ . Разработанные алгоритмы прошли апробацию на сертификационном стенде газотурбинного двигателя повышенной тяги на предприятии АО «ОДК-СТАР» в г. Пермь, что подтверждено актами о внедрении. Результаты внедрения показали снижение интеграла эмиссии оксидов азота на 4,5% в нормальных условиях по отношению к исходной функциональной схеме и до 81% при комплексном эксперименте с учетом возмущений и отказов контура расхода топлива.

Выполнена адаптация методов и алгоритмов построения измерителей в учебном процессе ПНИПУ, что подтверждено актом о внедрении.

### **Замечания**

1. В диссертационной работе недостаточно убедительно приведено обоснование новизны способа построения адаптивных виртуальных измерителей температуры и эмиссии оксидов азота. Также не совсем ясно, в чем заключается и как измеряется «жесткое реальное время». В тексте диссертации и автореферата следовало бы ввести четкую формулировку данного термина.

2. При разработке нейросетевых моделей для оценки температуры горения и эмиссии оксидов азота хотелось бы видеть более подробное обоснование выбора структуры сети и методов её обучения применительно к условиям реальной эксплуатации. Не приведены метрики обучения/тестирования: Loss, F1-мера, кросс-валидация.

3. Отдельные положения текста могли бы быть дополнены более чётким сравнением эффективности предложенных методов с существующими

аналогами, что позволило бы нагляднее продемонстрировать преимущества разработанных решений. Так, например, в разделе 1.5 не рассмотрены способы снижения выбросов на основе современных каталитических технологий, также отсутствует анализ преимуществ и ограничений нейросетевых и нейро-нечетких подходов по сравнению с физическими/модельными методами.

4. В тексте диссертации требовалось бы более детально исследовать утверждение о значимости снижения вычислительной сложности алгоритмов в сопоставлении с требованиями по точности полученных результатов и сравнением с существующим (исходным) алгоритмом.

5. Для построения нейро-нечеткого измерителя температуры камеры сгорания на базе ANFIS-сети является ли достаточным и оправданным применение ограниченного набора из девяти нечетких правил с треугольными функциями принадлежности? Обеспечивает ли данная конфигурация достаточную полноту аппроксимации и устойчивость оценок в условиях изменчивости параметров.

6. По графикам 2.10-2.12 нельзя сделать вывод о минимальных значениях параметров  $T$ ,  $P$ ,  $Gt$ , хотя данную информацию можно получить из таблиц 2.1-2.2.

7. Текст диссертации содержит технические неточности в обозначениях и формулировках (стр. 28, 44, 47,51, 55-56, 63), стилистические ошибки и опечатки.

Сделанные замечания не снижают научной и практической ценности проведенного диссертационного исследования и не влияют на общую положительную оценку.

### **Заключение**

Диссертационная работа Никулина В.С. соответствует паспорту научной специальности 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами. Автореферат соответствует содержанию диссертации.

Практические результаты, полученные при проведении диссертационного исследования, и полнота их освещения в научных публикациях автора позволяют считать, что диссертация Никулина Вячеслава Сергеевича «Управление вредными выбросами в малоэмиссионной камере сгорания газотурбинного двигателя на основе нейросетевых технологий» представляет собой завершённое научно-квалификационное исследование, обладающее как теоретической значимостью, так и практической ценностью.

Диссертационная работа отвечает требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, а также требованиям «Порядка присуждения ученых степеней в ПНИПУ», предъявляемым к кандидатским диссертациям, на соискание ученых степеней, а ее автор Никулин Вячеслав Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности по специальности 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами.

Официальный оппонент:  
доктор технических наук,  
доцент, ведущий научный сотрудник  
ФГБУ науки «Институт проблем  
управления им. В.А. Трапезникова  
Российской академии наук»

15.05.2025



Гергет Ольга Михайловна

Подпись Гергет Ольги Михайловны заверяю

Подпись

ЗАВЕ

ВЕД. ИНЖЕНЕР

ЗАЛОЖНЕВА Л.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт проблем управления имени В.А. Трапезникова Российской академии наук»

**Должность:** Ведущий научный сотрудник

**Почтовый индекс, адрес организации:** 117997, ГСП-7, г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 65 стр.1

**Телефон:** +7 (495) 334-89-10

**Адрес электронной почты:** [olgagerget@mail.ru](mailto:olgagerget@mail.ru)

**Наименование научной специальности, по которой была защищена докторская диссертация:** 05.13.17 – «Теоретические основы информатики».