



ОТЗЫВ

официального оппонента **Вениаминова Андрея Викторовича**
на диссертационную работу **Ваганова Михаила Александровича**
на тему «**Контроль процессов горения газообразных углеводородов методами оптической спектроскопии**», представленную на соискание
ученой степени доктора технических наук по специальности 2.2.8 – Методы
и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и
природной среды (технические науки)

1. Актуальность диссертации

Основной объем вредных выбросов в атмосферу техногенного характера составляют продукты сжигания топлива на предприятиях энергетики и промышленного производства, при этом затраты на топливо составляют значительную часть их бюджета. Исходя из этого, в условиях роста цен на энергоносители и обострения экологических проблем все более высокие требования предъявляются к системам оптимизации использования энергии органического топлива.

В большинстве случаев принцип действия систем контроля и оптимизации сжигания топлива основан на измерении температуры, расхода газа и воздуха, концентрации продуктов горения в составе дымовых газов и т.п. Такие системы недостаточно эффективны и характеризуются большой инерционностью и недостаточной чувствительностью.

В диссертационной работе М.А. Ваганова сформулировано противоречие между требованиями к снижению негативного воздействия теплоэнергетических объектов на окружающую среду, в первую очередь за счет оптимизации режимов горения газообразных углеводородов, и несовершенством существующих методов и средств контроля, обусловленным недостаточной достоверностью проводимого контроля.

Это противоречие представляет собой важную научно-техническую проблему хозяйственного значения, и на её решение направлено диссертационное исследование М.А. Ваганова, что подчеркивает его актуальность и современность.

2. Содержание работы и научные результаты

Диссертация состоит из Введения, пяти глав, Заключения, списка используемой литературы и семи приложений.

Во **Введении** обоснована актуальность диссертационного исследования, определены цель и задачи, решаемые в работе, указаны научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы.

В первой главе выполнен обзор задач, методов и технических средств контроля процессов горения в энергетике. Отмечено, что методы спектроскопии являются наиболее чувствительными и информативными и могут быть успешно применены для контроля процессов горения газообразных углеводородов с целью повышения его достоверности. На основе проведенного обзора и его критического анализа автор сформулировал задачи диссертационного исследования.

Во **второй главе** дано математическое описание спектрального прибора как информационной измерительной системы и приведены результаты разработки математических моделей дифракционного спектрального прибора и многоканального оптического спектрометра, что составляет **первый научный результат, выносимый на защиту**.

При математическом описании спектрального прибора, которое выполнялось в два этапа, основной автором был сделан акцент на определение связи между спектром математическим и физическим, т.е. получаемым в результате измерения. На первом этапе была описана линейная подсистема спектрального прибора, вычисляющая комплексный спектр анализируемого сигнала. На втором этапе был описан процесс преобразования комплексного спектра детектирующей системой прибора для

получения энергетического спектра как результата спектрального измерения в оптическом диапазоне. Показано, что полная аппаратная функция прибора, являющаяся его исчерпывающей характеристикой, может быть представлена совокупностью аппаратных функций его отдельных узлов. Приведены результаты разработки математических моделей предложенных спектральных приборов, позволяющие определить связь между их входом и выходом для комплексных и энергетических спектров излучения.

В третьей главе предложен универсальный спектроскопический метод контроля процессов горения газообразных углеводородов, что составляет **второй выносимый на защиту научный результат.**

Разработанный спектроскопический метод контроля основан на регистрации, анализе и сопоставлении множества спектроскопических параметров, полученных как при раздельном, так и при комбинированном применении различных методов оптической спектроскопии. Предложенный метод отличается тем, что описывает процедуру контроля, технические средства и спектроскопические параметры в рамках единого математического аппарата, и позволяет существенно повысить достоверность проводимого контроля за счет того, что решение о состоянии процесса горения принимается на основе измерения первичного параметра – спектральной характеристики излучения пламени.

В рамках разработанного метода автор математически обосновывает связь погрешностей спектральных измерений с вероятностями ошибок первого и второго рода, используя среднеквадратичную погрешность в качестве критерия, определяющего точность измерения.

На базе того же критерия автор рассматривает вопрос выбора спектрального прибора для конкретного случая контроля, который предлагает выполнить на основе результата их сравнения по такому параметру, как результативность. Под результативностью автор понимает то, что применяемый прибор должен обладать характеристиками, при которых обеспечивается заданная достоверность проводимого контроля. На

основании этого автором впервые вводятся такие информационные характеристики спектрального прибора контроля, как количество информации, регистрируемое спектральным прибором в единицу времени, минимальное количество информации, необходимое для обеспечения заданной достоверности контроля, и информационный КПД, и математически обосновывается их связь со среднеквадратической погрешностью прибора. Введенные информационные характеристики могут служить критериями при сравнении приборов контроля разного типа, позволяют выбрать соответствующий прибор при заданных допустимых вероятностях ошибок контроля и оценить согласованность отдельных приборов при совместном их применении.

Результатами моделирования обосновывается, что для обеспечения достоверности спектроскопического контроля оптимальным правилом принятия решения будет являться то, которое позволит минимизировать вероятность ошибки первого рода при ограничении сверху ошибки второго рода. Кроме того, автор предлагает ввести дополнительные ограничения пределов, в которых должны находиться результаты измерений контролируемых параметров, и определяет оптимальную область допускаемых их значений, которая обеспечивает заданные требования к вероятностям ошибок контроля, а, следовательно, и к достоверности самого контроля. На основе полученного граничного условия, задающего эту оптимальную область, и исходя из заданных допустимых вероятностей ошибок контроля, можно выбрать применяемый спектральный прибор, минимальные характеристики которого обеспечат требуемую достоверность проводимого контроля.

В четвертой главе приведены результаты технической реализации приборов контроля на базе разработанных оптических спектральных приборов с применением волоконно-оптической системы передачи сигналов, и рассматриваются вопросы улучшения их характеристик, что составляет **третий научный результат, выносимый на защиту.**

Принцип технической реализации оптического спектрометра на базе узкополосной фильтрации в параллельных каналах впервые был изложен в патентах автора на полезную модель РФ № 86734 и № 100241. В многоканальном спектрометре, благодаря особенностям его принципа действия, для передачи излучения можно использовать жгут волокон, что повышает чувствительность прибора более чем на 15% относительно спектрометров других типов. Повышение его разрешающей способности может быть достигнуто путем применения спектрально-селективного элемента; на это техническое решение также получен патент на полезную модель РФ № 188637. В дифракционном спектральном приборе повышение разрешающей способности достигается за счет применения дифракционной решетки нового типа, топология которой перераспределяет интенсивность дифрагированного света в высшие порядки, что позволяет повысить разрешающую способность прибора более чем на 20% по сравнению с традиционной решеткой. На программу для расчета параметров штрихов дифракционной решетки получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021668476.

В четвёртой главе автор также приводит результаты исследований энергетических потерь и искажений сигналов, возникающих при их передаче по оптическому волокну. Показано, что применение одномодового волокна приводит к ухудшению разрешающей способности прибора более чем на 30%, применение многомодового – более чем на 60%. Приведены результаты разработки методики коррекции этих потерь и искажений, учет и корректировка которых при проектировании спектральных приборов контроля позволяют улучшить их характеристики в отличие от аналогов.

В пятой главе приведены результаты экспериментальных исследований спектроскопических параметров, характеризующих процесс горения газообразных углеводородов, что составляет **четвертый научный результат, выносимый на защиту.**

В работе М.А. Ваганова установлены новые зависимости спектроскопических параметров в спектре излучения, возникающего при горении пропана, от режимов горения при раздельном и комбинированном применении эмиссионной спектроскопии и лазерно-искровой спектрометрии. Показано, что процесс горения пропана может быть охарактеризован множеством параметров, сформированных двумя методами оптической спектроскопии. Продемонстрирована возможность применения разработанных дифракционного прибора и многоканального спектрометра для контроля горения газообразных углеводородов.

В работе приведена разработанная методика подготовки и проведения спектроскопического контроля процессов горения газообразных углеводородов, позволяющая его проводить с требуемой достоверностью при применении приборов с минимально необходимыми характеристиками, что составляет **пятый научный результат, выносимый на защиту**.

Автором приведены результаты проверки разработанного спектроскопического метода контроля и экспериментальной отработки методики его подготовки и проведения на примере горения пропана методами эмиссионной спектроскопии и лазерно-искровой спектрометрии (ЛИЭС). Установлено, что наибольшие вероятности ошибок сопутствуют контролю методом эмиссионной спектроскопии, а наименьшие – одновременному применению эмиссионного и ЛИЭС. Кроме того, результаты экспериментов показали, что одновременное применение двух методов спектроскопии для контроля одного и того же процесса – горения пропана позволяет не только повысить достоверность контроля, но и дает возможность прогнозировать направление изменения соотношения газ–воздух, что повышает его оперативность.

В качестве практического примера в **пятой главе** продемонстрирована возможность применения метода эмиссионной спектроскопии для контроля процесса горения газообразного топлива на реальном промышленном объекте. Показано, что применение спектроскопического метода контроля

позволяет оптимизировать сжигание природного газа путем более достоверного определения коэффициента избытка воздуха и снизить его расход до 3%, что очень существенно при больших масштабах производства.

В **Заключении** дана итоговая оценка научных результатов, выносимых на защиту, обозначена их теоретическая и практическая значимость.

Список использованной литературы включает 202 наименования.

В **приложениях** приведены копии актов внедрения и использования, патентов, свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

3. Научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов

Автором получены следующие основные научные результаты, обладающие новизной, теоретической и практической значимостью:

Научная новизна и теоретическая значимость предложенного математического описания спектрального прибора и математических моделей дифракционного прибора и многоканального спектрометра состоят в том, что в отличие от традиционного описания спектральных приборов, они разработаны с применением математического аппарата на основе теории линейных систем, теории сигналов и методов матричного анализа, который в оптической спектроскопии раньше не применялся. Это позволяет выполнить последовательный анализ прохождения сигнала через все функциональные узлы прибора и учесть влияние его конструктивных особенностей и внешних условий на результат спектрального анализа.

Научная новизна разработанного универсального спектроскопического метода контроля состоит в том, что он основан на регистрации, анализе и сопоставлении множества спектроскопических параметров, полученных как при раздельном, так и при комбинированном применении различных методов оптической спектроскопии. Метод позволяет существенно повысить достоверность проводимого контроля за счет того, что решение о состоянии

процесса горения принимается на основе измерения первичного параметра – спектра излучения, испускаемого непосредственно очагом горения. *Теоретическая значимость метода* обусловлена теоретическим описанием процедуры контроля, приборов и параметров, характеризующих контролируемый процесс горения, выполненным на базе единого математического аппарата, что позволяет, исходя из заданных допустимых вероятностей ошибок контроля, сформировать требования к минимально необходимым характеристикам приборов, обеспечивающих требуемую достоверность контроля и выполнить сравнение спектральных приборов контроля разного типа по их результативности. *Практическая значимость* спектроскопического метода контроля процессов горения состоит в том, что он позволяет проводить контроль с повышенной достоверностью по сравнению с существующими методами, что приводит не только к сокращению расходов топлива, но и к снижению негативного воздействия работы теплоэнергетических объектов на окружающую среду.

Новизна и практическая значимость *предложенной технической реализации спектральных приборов* контроля с применением волоконно-оптической системы передачи анализируемых сигналов обусловлена тем, что в отличие от известных аналогов они позволяют создавать приборы контроля с улучшенными техническими и эксплуатационными характеристиками. Новизна применяемых технических решений подтверждена патентами РФ.

Научная новизна исследований спектроскопических параметров в спектре излучения процесса горения газообразных углеводородов заключается в установлении *новых зависимостей* от режимов горения при раздельном и комбинированном применении эмиссионной спектроскопии и лазерно-искровой спектрометрии, что позволяет с большей достоверностью и оперативностью проводить контроль процессов горения по сравнению с существующими методами контроля. Практическая значимость *установленных зависимостей* состоит в том, что на их основе может быть организована процедура контроля методами эмиссионной спектроскопии или

лазерно-искровой спектрометрии любых объектов, в технологических процессах которых применяется сжигание газообразных углеводородов.

Научная новизна и практическая значимость разработанной методики подготовки и проведения спектроскопического контроля заключаются в том, что она разработана на основе спектроскопического метода контроля и позволяет проводить контроль процессов горения с требуемой достоверностью при применении приборов с минимально необходимыми для этого характеристиками.

Рецензируемая работа по новизне, теоретической и практической значимости имеет высокий, соответствующий современным требованиям, уровень. Практическую ценность результатов подтверждают 6 актов внедрения и использования, полученные от следующих организаций: ООО «Севзаптехника», АО «Кнауф Петроборд», ООО «Теплоэнергосервис ДКМ», ООО «ПГ «Фосфорит», АО «НИИ ТМ» и ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения».

Результаты диссертации могут быть востребованы во всех отраслях промышленности, где возникает необходимость контроля и оптимизации режимов горения газообразных углеводородов.

4. Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций

Обоснованность и достоверность научных положений, результатов исследований, выводов и рекомендаций подтверждается корректным использованием современных аналитических и расчетных методов, адекватностью применяемых физических и математических моделей, хорошей сходимостью теоретических и экспериментальных результатов.

Обоснованность и достоверность всех результатов, сформулированных в качестве выносимых на защиту положений, подтверждаются публикациями автора в ведущих отечественных и зарубежных изданиях и результатами их

обсуждения на многочисленных российских и международных конференциях, проводимых как в России, так и за рубежом.

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 64 *печатных работах*: в одной монографии, 15 статьях в изданиях из перечня ВАК (в том числе 13 по научной специальности), 29 статьях в изданиях из реферативных баз Scopus и Web of Science, 8 статьях в сборниках докладов конференций, семи отчетах о выполнении НИР, трёх патентах на полезную модель РФ (№ 86734, 100241, 188637) и одном свидетельстве о государственной регистрации программ для ЭВМ (№ 2021668476).

5. Замечания по содержанию и оформлению диссертации

1. В главе 1 недостаточно полно рассмотрены технические средства контроля процессов горения, используемые в настоящее время на промышленных объектах, и их технические характеристики.
2. Моделирование влияния зависимости значений контролируемых спектроскопических параметров и погрешностей измерений на достоверность проводимого контроля, результаты которого приведены в п. 3.5, было выполнено только для случая контроля по двухсторонним пределам; для полноты следовало привести результаты и для случая контроля по односторонним пределам.
3. Сравнительный анализ разработанных спектральных приборов и выпускаемых серийно спектрометров, результаты которого приведены в таблице 4.1 главы 4, неполон; не рассмотрены спектрометры отечественного производства.
4. На рисунке 4.29 представлен программный код разработанного алгоритма, позволяющего рассчитать энергетические потери оптического излучения; следовало бы привести алгоритм в графическом виде.

6. Общая оценка диссертации

Отмеченные выше недостатки не снижают ценности проведенных М.А. Вагановым исследований, не имеют принципиального характера и не затрагивают основных положений и научных результатов работы.

Диссертация М.А. Ваганова представляет собой законченную научную работу, в котором на высоком научно-техническом уровне решена актуальная проблема оптимизации горения газообразного углеводородного топлива путем разработки и внедрения спектроскопического метода контроля, характеризующегося высокой достоверностью и позволяющего создавать и внедрять системы контроля процессов горения газообразных углеводородов с улучшенными характеристиками.

Основные результаты диссертационной работы получены в рамках выполнения научно-исследовательских работ по грантам РФФИ и РНФ. Часть НИР выполнялась под руководством М.А. Ваганова: НИР РФФИ № АААА-Б17-217062020050-5, НИР РФФИ № АААА-А17-117041110152-4, НИР РНФ № АААА-А19-119091290050-1, НИР РФФИ № АААА-А20-120011590133-2.

Автореферат диссертации в достаточной мере отражает содержание работы, научные положения и выводы, сформулированные в работе.

Постановка задач и цели исследования, основное содержание и полученные результат диссертационной работы М.А. Ваганова соответствуют научной специальности 2.2.8 – Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды.

Материал диссертации изложен в логической последовательности, отвечающей требованиям проведения научных исследований, имеет целостность и внутреннее единство содержания. Выводы обоснованы и четко отражают результаты проведенных исследований.

7. Заключение

Считаю, что по актуальности выбранной темы, степени обоснованности научных положений, выводов и результатов, полученных лично автором, их достоверности и научной новизне диссертация «Контроль процессов горения газообразных углеводородов методами оптической спектроскопии» соответствует требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям и изложенным в пп. 9-11, 13 Постановления Правительства РФ от 24 сентября 2013 (ред. От 26.09.2022) г. № 842 «О порядке присуждения ученых степеней», а ее автор Ваганов Михаил Александрович заслуживает присуждения степени доктора технических наук по специальности 2.2.8 – Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды (технические науки).

Официальный оппонент:

Ведущий научный сотрудник Центра «Оптические информационные технологии» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО», доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник

07.03.2023



А.В. Вениаминов

Подпись Вениаминова А.В.
удостоверяю
Менеджер ОПС
Пономарева О.В.

