

На правах рукописи

Астапов Владислав Николаевич

**МЕТОДЫ И ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА СИСТЕМ
КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ КОМПАУНДИРОВАНИЕМ
НЕФТЕПРОДУКТОВ**

Специальность 05. 13. 05 Элементы и устройства
вычислительной техники и систем управления

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Самара 2009

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева»

Научный консультант:

Заслуженный деятель науки и техники РФ
д.т.н., профессор

Конюхов Н.Е.

Официальные оппоненты:

Косолапов Александр Михайлович, д.т.н., профессор
Стеблев Юрий Иванович, д.т.н., профессор
Шакурский Виктор Константинович, д.т.н., профессор

Ведущее предприятие: ФГУП «Научно-исследовательский институт физических измерений», г. Пенза

Защита состоится «17» октября 2009 г. в 10 час
на заседании диссертационного совета Д212.215.05 Самарского
государственного аэрокосмического университета по адресу:
443086, г.Самара, Московское шоссе, 34, корпус 3а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Самарского
государственного аэрокосмического университета

Автореферат разослан «___» _____ 2009 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д.т.н., профессор

Калентьев А.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Исходя из особенностей топливно-энергетического баланса страны, технологическая структура мощностей переработки нефти в рассматриваемый период формировалась без достаточного развития процессов, повышающих качество продукции. Существенно отстает от требований времени развитие технологических процессов получения товарных бензинов, обеспечивающих качество моторных топлив.

Процесс компаундирования (смешения) нефтепродуктов является завершающим и наиболее ответственным в формировании не только качества, но и себестоимости товарной продукции.

Техническая реализация оптимального компаундирования требует решения целого ряда задач комплексной автоматизации объекта и автоматического контроля качества товарного бензина. Поэтому целесообразно анализаторы качества продукта использовать в замкнутом контуре автоматического управления смешением товарных бензинов. Однако существующие устройства контроля качественных параметров бензина являются лабораторными приборами, требующими пробоотборки образцов бензинов из технологической трубы. Разработанные в последнее время устройства экспрессного анализа октанового числа бензинов на основе измерения диэлектрической проницаемости «АС-98», спектрометрии ZX-440 (США) и др. являются также лабораторными и имеют существенный недостаток: в них отсутствует идентификация типа бензина по калибровкам. Автоматический анализатор нефтепродуктов М 412 на основе спектрофотометра имеет проточные ячейки для непосредственного встраивания в поток, однако идентификация отсутствует. Автоматический портативный анализатор IROX 2000 имеет встроенный плотномер и реализована функция идентификации на основе кластерного анализа, но данный октаномер является также лабораторным.

Разработанные в диссертации устройства контроля качества, в отличие от существующих октаномеров, работают с бензинами различных типов и легко встраиваются в трубопровод, т.е. определяют автоматически калибровочную модель, по которой определяют октановое число бензина.

Объектом управления в рассматриваемой системе является процесс смешения, в котором смешением (компаундированием) нескольких компонентов получают товарный бензин нужного качества. Из-за наличия в математической модели смешения неопределенных параметров для улучшения качества управления используется адаптивная подстройка модели.

Эффективность процесса достигается за счет сокращения расходов дорогостоящих составляющих бензина и исключения случаев получения продукта со значительным запасом качества.

К проблемам производства бензинов высокого качества в России относятся: разработка и внедрение интеллектуальных датчиков встроенного контроля (ДВК),

способных контролировать качество и технологические параметры нефтепродуктов в технологическом процессе.

Работа является гармоничным развитием диссертации автора на соискание ученой степени кандидата технических наук и посвящена исследованию и разработке комплекса технических средств, в том числе устройств контроля качества и контроля технологических параметров нефтепродуктов, математических моделей и методов, для реализации адаптивной системы управления процессом приготовления товарных бензинов, проведенных автором, по программе «Конверсия и высокие технологии» в научно-исследовательских лабораториях Самарского государственного аэрокосмического университета.

Цель диссертационной работы – обобщение и развитие теории электрофизических методов контроля и математического моделирования процесса получения товарных бензинов для повышения эксплуатационных характеристик технических средств систем управления технологическими процессами как крупной научной проблемы, имеющей важное хозяйственное значение, внедрение которой вносит значительный вклад в развитие экономики страны.

В соответствии с поставленной целью решались следующие задачи:

1. Анализ существующих систем приготовления товарных бензинов в нефтеперерабатывающей промышленности с использованием устройств встроенного контроля качества нефтепродуктов в технологическом процессе компаундирования товарных бензинов.

2. Экспериментальные и теоретические исследования акустических, электродинамических и оптико-акустических характеристик углеводородных топлив с позиций выявления их взаимосвязей с требуемыми показателями качества и идентификацией товарных бензинов в процессе измерения октанового числа.

3. Разработка комплекса технических средств для управления процессом непрерывного компаундирования нефтепродуктов, включающих в себя поточные октаномеры и устройства контроля реологических параметров нефтепродуктов в потоке.

4. Предложена математическая модель смешения бензинов (октанового числа) и решена задача идентификации октановых чисел компонентов смешения в адаптивной системе компаундирования.

5. Метрологический анализ погрешностей предложенных устройств встроенного контроля октанового числа.

6. Проведены исследование динамических характеристик адаптивной системы управления и сравнительный анализ производительности станции смешения.

Методы исследований. В исследовании электрофизических характеристик углеводородных топлив использовались: физика электродинамических, квантово-механических и акустических процессов. В настоящей работе используются теория термодинамики растворов, а именно термодинамические функции и термодинамические свойства компонентов, методы линейной алгебры, методы решения экстремальных задач применительно к решению задач теории

управления, методы теории автоматического управления. Для получения результатов использовалось цифровое и натурное моделирование и проведение опытно-промышленных испытаний устройств контроля качества углеводородных топлив и других технологических параметров.

Научная новизна диссертационной работы состоит в следующем:

1. Впервые разработана нелинейная математическая модель смешения бензиновых компонентов типа «компонентный состав - октановое число», которая адаптирована к использованию в системе управления производственным процессом.

2. При решении задачи оптимизации процесса смешения товарных бензинов разработан способ адаптивного управления, на основе математических алгоритмов эллипсоидального оценивания параметров линейной регрессии при линейных ограничениях на вектор входных переменных. Используется для идентификации октановых чисел компонентов смешения в адаптивной системе компаундирования.

3. Реализован комплексный метод измерения октанового числа и идентификации типа товарных бензинов, который позволяет повысить точность определения октанового числа бензина и иметь стационарную калибровочную модель по классам бензинов.

4. Разработан метод определения октанового числа на основе реакций холоднопламенного окисления (РХПО), претендующий на замену моторной установки, так как калибруется на гостированных эталонных смесях и может использоваться для отработки рецептуры смешения товарных бензинов.

5. Разработан оптико-акустический метод определения октанового числа и схема лазерного оптико-акустического (ЛОА) октаномера и методика его калибровки. Предложен генетический алгоритм для определения концентрации (доли) компонентов смешения на основе ЛОА-октаномера при решении задачи оптимизации смешения товарных бензинов.

6. Предложены новые принципы построения адаптивной системы компаундирования с датчиками встроенного контроля качества и технологических параметров в процессе смешения товарных бензинов.

Практическую ценность работы составляют:

1. Разработанный комплекс технических средств адаптивной системы непрерывного компаундирования нефтепродуктов с учетом мировых тенденций развития устройств контроля на основе многопроцессорного контроллера «Интеграл-1АК», в котором реализованы два запатентованных изобретения на устройство и один патент на способ адаптивного управления процессом смешения жидкостей, реализованный в виде математического и программного обеспечения.

2. Созданные действующие образцы октаномера «АС-98», внесенного в Госреестр за №7899 от 12.05.2000г., опытный образец «АС-2004» и реакторный октаномер «Ока-1».

3. Способ отработки рецептур смешиваемых товарных бензинов с применением реакторного октаномера «Ока-1».

3. Применение лазерного оптико-акустического октаномера в адаптивных системах компаундирования товарных бензинов.

4. Метод определения октанового числа и идентификации товарных бензинов, используемый в октаномере нового поколения «АС-2004».

5. Схемы и конструкции встраиваемых в технологический поток устройств контроля качества и других технологических параметров топлив.

На защиту выносятся:

1. Результаты исследований, связывающие показатели качества топлив с электрофизическими параметрами углеводородных топлив.

2. Методология построения устройств измерения октановых чисел, плотности, вязкости бензинов и других качественных параметров топлив с использованием различных электрофизических способов.

3. Методы идентификации товарных бензинов на основе электрофизических параметров.

4. Математическая модель смешения бензиновых компонент и ее адаптация к использованию в системе управления производственным процессом.

5. Структурные схемы, алгоритмы и конструкции комплекса технических средств адаптивной системы управления технологическим процессом компаундирования товарных бензинов.

Реализация работы: Разработанный в диссертационной работе реакторный октаномер «ОКА-1» внедрен в ОНИЛ-2 СГАУ для научно-экспериментальных исследований. Был осуществлен мелкосерийный выпуск октаномера «АС-98», включенного в государственный реестр приборов и внедренного на нефтезаводах, нефтебазах и коммерческих фирмах России. Результаты исследований, положивших основу разработки октаномера нового поколения «АС-2004», использованы в учреждении «Теплотехническая лаборатория» (испытательный центр «ЯнтарИТ» г. Калининграда) в качестве «Дополнения к инструкции по эксплуатации октанометра «АС-98». Результаты работы используются в учебном процессе СГАУ при выполнении курсовых и дипломных работ, а также при чтении лекций по курсам, связанным с элементами автоматики, системами контроля и управления и при изучении курса по микропроцессорной технике. Устройство для измерения уровня нефтепродуктов в емкости «Квант-У» внедрено на предприятии ООО «ОЛВИ» в опытную эксплуатацию. Акты внедрения в приложении Б.

Апробация работы Основные результаты работы докладывались на научно-технической конференции «Применение вычислительной техники и математических методов в научных и экономических исследованиях», Украина, Шацк, 10-14 сентября 1991 г.; на IV региональной научно-технической конференции «Новые высокие технологии в нефтегазовой отрасли и проблемы экологии», г. Самара, 12-13 марта 1997 г.; на семинаре «Вклад ученых СГАУ и СамГТУ в энергосбережение Самарской области», секция электроэнергетики, нефтехимии, г. Самара, 26-29 января 2000 г.; на VII международной научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы приборостроения, информатики и экономики», г. Сочи, 3-6 октября 2005г.

Разработанный в диссертации октаномер «АС-98» экспонировался на всероссийских и международных выставках в различных городах России, в частности на Международном аэрокосмическом салоне «МАКС-2000» в г. Жуковском, во Всероссийском выставочном центре на выставке «Двигатели - 2000» в г. Москве, на международной выставке «Эврика – 2000» в г. Брюсселе, специализированных выставках по профилю «Топливо, энергетика и химиндустрия» в г. Кириши, Самаре, Калининграде, Тольятти в 1999, 2000 г.г. В 1998 году по материалам разработки прибора измерения октанового числа бензинов, при содействии творческого коллектива, в конкурсе научно-технических работ нефтекомпании «ЮКОС» автору присуждена первая премия.

Публикации По результатам исследований и разработок опубликованы 42 печатных работы, в том числе 2 монографии, получено 18 патентов РФ, 1 авторское свидетельство СССР.

Структура и объем работы Работа состоит из введения, семи глав, заключения, списка литературы и приложения. Основное содержание работы изложено на 340 страницах текста: 7 глав, 66 рисунков, 18 таблиц. Список литературы состоит из 255 наименований, приложение - на 16 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении показана актуальность темы диссертации, дан анализ состояния проблемы, показаны научная новизна, практическая ценность работы и основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведены краткий анализ товарных бензинов как объекта контроля и анализ показателей качества. Обобщены требования, предъявляемые к автомобильным бензинам - основному продукту нефтеперерабатывающих заводов.

Современные автомобильные бензины, как правило, представляют собой смеси компонентов, получаемых различными технологическими процессами. Оценка качества компонентов и товарных бензинов при их получении на нефтеперерабатывающих заводах осуществляется стандартными лабораторными методами по показателям физико-химических свойств, нормируемых соответствующими документами (ГОСТ, ТУ, СТП, условиями контрактов).

Проведенные исследования показали основные тенденции развития устройств контроля и управления технологическими процессами: среди прочих это – разработка и внедрение интеллектуальных датчиков встроенного контроля качества и технологических параметров, составляющих системы автоматического управления.

Дан обзор методов управления компаундированием в условиях нестохастически заданной неопределенности. В данном случае неопределенностью являются октановые числа Q_i , смешиваемых компонентов, так как октановые числа компонентов точно неизвестны, известны лишь их интервальные оценки.

Полученные результаты анализа могут служить основой для проведения исследования и разработки устройств контроля качества и технологических

параметров бензина для адаптивной системы управления процессом компаундирования товарных бензинов.

Во второй главе проведен анализ акустических характеристик жидких углеводородных сред и их взаимосвязь с электрофизическими параметрами. В результате исследования поведения ультразвука в жидких средах и особенно в растворах, сформулированы требования для разработки устройств контроля качества углеводородных топлив с использованием зависимостей акустических характеристик от реофизических параметров нефтепродуктов.

Установлено, что молекулярная скорость звука R обладает аддитивными свойствами и устанавливает общую связь в поведении звука для всех жидкостей.

Зависимость величины R от молекулярного веса выражается уравнением

$$R = \alpha M + \beta, \quad (1)$$

где α и β - постоянные для данного гомологического ряда величины и M – молекулярный вес.

Описанные свойства молекулярной скорости звука делают эту величину ценной для физико-химических исследований. Пользуясь конститутивными свойствами R , можно применять акустические измерения для подтверждения предполагаемой структуры органических соединений. Предложено использовать данные о поглощении звука в углеводородных жидкостях для классификации жидкостей. В приложении к углеводородным топливам данные свойства можно применять для идентификации товарных бензинов по их составу для проведения калибровки октанометров.

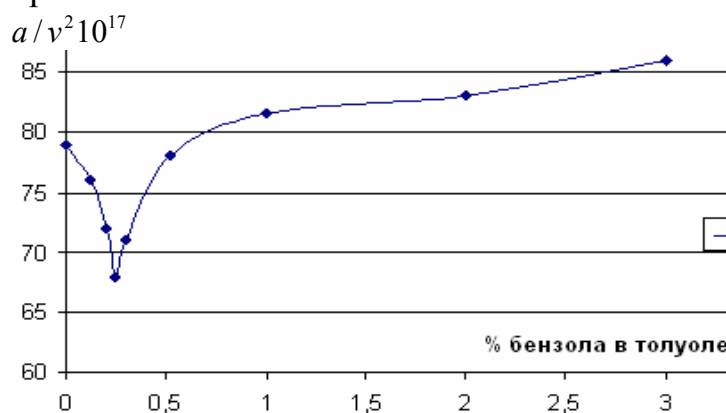


Рис.1. Влияние малых добавок бензола на поглощение звука в толуоле

Для октанометрии большой интерес представляет влияние малых добавок посторонних веществ на коэффициент поглощения звука в данном веществе. Как показывают измерения, добавка постороннего вещества в количестве, составляющем доли процента, заметно уменьшает поглощение звука.

Как видно из рис.1, добавка приблизительно 0.25% бензола к толуолу снижает коэффициент поглощения звука в последнем на 12 – 13%.

Дан анализ электродинамических характеристик углеводородных топлив. Электродинамические свойства материалов и сред определяются диэлектрической и магнитной проницаемостью, а также удельной электрической проводимостью. Рассмотрены электродинамические параметры углеводородных сред и их взаимосвязь в широком частотном диапазоне, а именно зависимости

электропроводности и диэлектрической проницаемости товарных бензинов от частоты синусоидального тока, пропускаемого через датчик с бензином.

Полная удельная проводимость \dot{G} любого вещества в синусоидальном электрическом поле данной частоты может быть представлена уравнением

$$\dot{G} = \chi_0 + \varepsilon \omega \cos \varphi \cdot \operatorname{tg} \varphi + j \varepsilon \omega \cos \varphi, \quad (2)$$

$j \varepsilon \omega \cos \varphi$ - реактивная часть;

χ_0 - проводимость, обусловленная движением в электрическом поле «свободных» ионов;

$\varepsilon \omega \cos \varphi \operatorname{tg} \varphi$ - проводимость, обусловленная колебаниями атомов и молекул (дипольных ассоциатов) раствора в переменном электрическом поле;

ε - действующее значение диэлектрической проницаемости;

φ - угол потерь, возникающий за счет поляризации атомов и молекул раствора в электрическом поле.

Общий тангенс угла потерь для плохо проводящих электрический ток жидкостей

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\chi_0}{\varepsilon \omega}. \quad (3)$$

В этой связи совокупные признаки электропроводности, тангенса угла потерь и диэлектрической проницаемости, в зависимости от частоты электромагнитных колебаний с коррекцией на температуру, являются важными априорными факторами, так как изменение электропроводности и тангенса угла потерь в квазистационарной части частотного спектра связано с составом продукта.

Данные исследования позволяют установить критерий принадлежности товарных бензинов к тому или иному типу. Одним из таких критериев можно считать наблюдаемое для каждого типа товарного бензина различие электропроводностей на низких и высоких частотах. При этом бензины различаются как по уровню электропроводности, так и по приращению на единицу частоты.

Таблица 1. Экспериментальные данные в усл.ед. (мВ) для бензинов АИ-92

Бензин	АИ – 92				
	1	2	3	4	5
№ образца					
При $f_2=100$ кГц (ε_2) мВ	1863	1854	1837	1883	1839
При $f_1=1$ кГц (ε_1) мВ	182	181	180	184	180
$\eta = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}$	$0,9769 \times 10^{-1}$	$0,9762 \times 10^{-1}$	$0,9798 \times 10^{-1}$	$0,9771 \times 10^{-1}$	$0,9787 \times 10^{-1}$

Другой не менее важный критерий – изменение электропроводности и диэлектрической проницаемости товарных бензинов от частоты электромагнитных колебаний.

Данные опытов для бензинов АИ – 92 приведены в табл. 1. Где ε_1 и ε_2 величина в у.ед. (в мВ), характеризующая электропроводность и диэлектрическую проницаемость образца бензина в датчике октаномера.

При практическом исследовании реальных бензинов было установлено, что они обладают существенной удельной активной проводимостью. Поэтому при измерении октанового числа бензина необходимо вводить компенсацию активной проводимости бензина в пределах $0 \div 500 \text{ нСим/м}$.

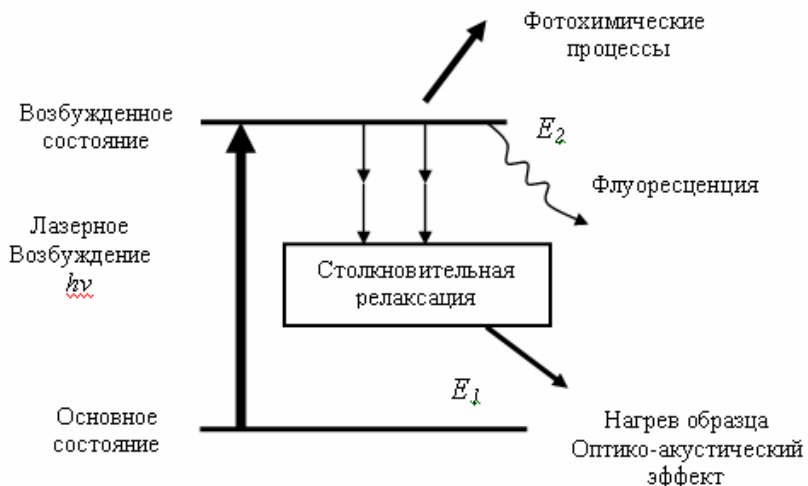


Рис. 2. Основные каналы преобразования поглощенной энергии при облучении образца резонансным лазерным излучением

Исследованы физические основы лазерного оптико-акустического метода контроля качества углеводородных топлив. С позиций квантово-механической теории поглощение излучения лазера представляет собой переход энергии излучения в энергию молекулы, причем при поглощении одного фотона с энергией $h\nu$ энергия молекулы возрастает с некоторого исходного значения E_1 до некоторого конечного E_2 , (рис.2.) Оптико-акустический эффект лежит в основе метода оптико-акустической спектроскопии и по данному методу ведутся большие работы по разработке приборов контроля количественного и качественного анализа газовых смесей.

В третьей главе рассмотрены методологические, конструктивно-технологические и схмотехнические особенности построения устройств, для контроля качества товарных бензинов. Предложена оценка детонационной стойкости на основе измерения реакций холоднопламенного окисления (РХПО) бензинов в реакторе.

Исследование зависимостей реакций окисления смесей бензин/воздух от температуры показало явные диапазоны различных реакций, так в диапазоне $290 - 350^\circ\text{C}$ – холодное пламя; $350 - 400^\circ\text{C}$ – мгновенное сгорание. Определенные температуры начала распада углеводородов соответствуют температурной области

возникновения холодных пламен, открытых М.Б. Нейманом. РХПО предшествуют фактическому сгоранию и являются самовозникающими и затухающими.

В процессе исследования параметров РХПО определены корреляционные связи между параметрами РХПО и детонационной стойкости углеводородов. В качестве индикаторного компонента, содержащегося в продуктах РХПО, был выбран СО.

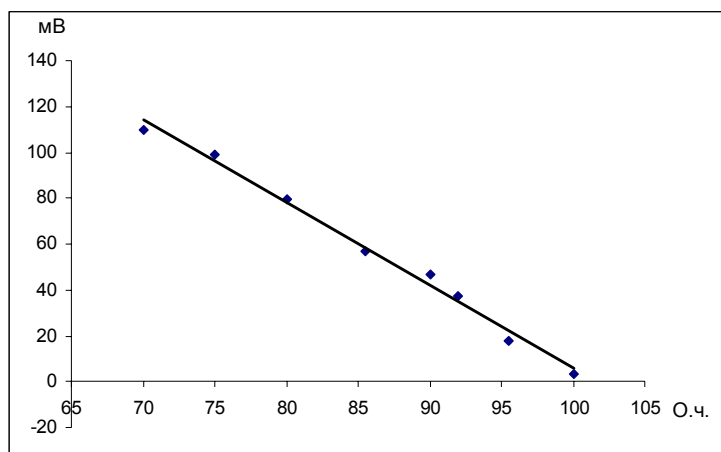


Рис. 3. Связь величины отклика детектора СО с октановым числом эталонных топлив

Для исследований использованы эталонные топлива с октановыми числами в диапазоне 70 -100 ед. Изменение величины отклика детектора СО в продуктах окисления в зависимости от октанового числа эталонных топлив представлено на рис. 3.

Из рисунка видно, что продукты окисления изооктана (октановое число изооктана равно 100 ед.) характеризуются минимальным содержанием окиси углерода. Склонность к окислению углеводородов различного строения неодинакова, поэтому важным фактором, влияющим на возникновение и интенсивность детонации, является химический состав топлива: чем больше в топливе углеводородов, образующих в условиях холоднопламенного окисления значительное количество перекисей, тем скорее появится детонация. Было установлено, что чем интенсивнее идет процесс предпламенного окисления, тем ниже детонационная стойкость испытуемого бензина.

Результаты данных исследований положены в основу разработки реакторного октаномера.

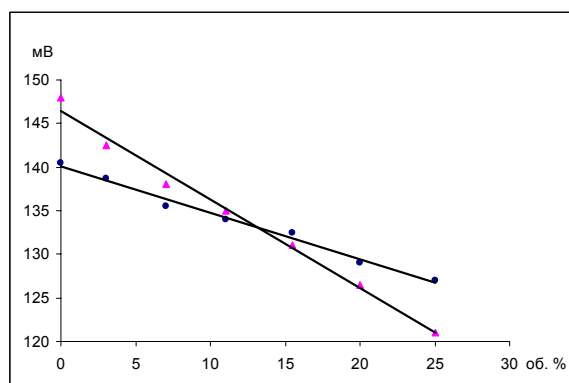


Рис. 4. Зависимость величины отклика детектора СО от содержания МТБЭ в бензине: ● — рифформат; ▷ — гидрогенизат.

Метил-трет-бутиловый эфир (МТБЭ) широко применяется для повышения октанового числа товарных бензинов и улучшения их экологических характеристик. Зависимости на рис. 4 показывают, что между содержанием МТБЭ в различных бензинах и СО в продуктах РХПО этих бензинов наблюдается также различная линейная зависимость. Данный факт позволил использовать реакторный октаномер для изучения влияния различных присадок на октановое число углеводородного топлива и в конечном результате создать новый способ отработки рецептуры смешения товарного бензина.

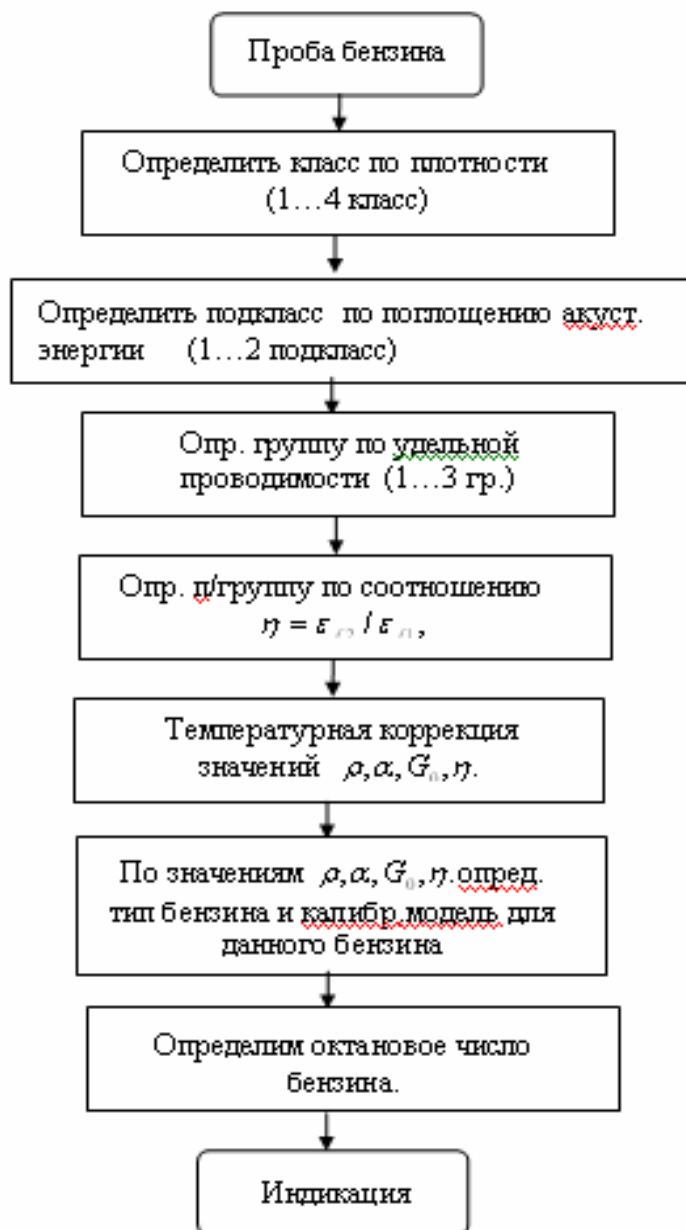


Рис.5. Алгоритм способа измерения и идентификации бензина на октаномере АС-2004

Рассмотрена оценка детонационной стойкости по диэлектрической проницаемости бензинов. Использование метода, основанного на измерении диэлектрической проницаемости топлива в зависимости от его октанового числа с поправкой на температуру в октаномере АС-98 получило дальнейшее развитие в разработке комплексного метода идентификации типа и определения октанового числа бензинов.

Проведенные исследования позволили установить критерии принадлежности товарных бензинов к тому или иному типу. Одним из важных критериев можно считать наблюдаемое для каждого типа товарного бензина различие комплексных электропроводностей на низких и высоких частотах. При этом бензины различаются как по уровню электропроводности, так и по приращению на единицу частоты.

Бензины классифицируют согласно алгоритму идентификации типа бензина, который представлен на рис.5.

Данный метод позволяет иметь стационарную калибровочную модель по классам бензинов с автоматическим выбором октанометром калибровочной модели. В качестве основного фактора идентификации используется соотношение $\eta = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}$, где фактор η характеризует принадлежность бензина к одной из подгрупп.

В основу метода положен способ определения октанового числа и идентификации бензинов по патенту РФ № 2305283.

Оценка детонационной стойкости по методу, основанному на поглощении бензинами составляющих спектра инфракрасного излучения.

В диссертации рассматриваются принципы построения спектрометрического октанометра. По оптическим выходным сигналам измеряют величины поглощения на трех или более опорных длинах волн в ближней ИК-области, берут вторую производную каждого поглощения и получают множественную регрессию. Анализ данных множественной регрессии представляет кривую

$$Q = k_0 + k_1[a(\lambda_1)] + k_2[a(\lambda_2)] + k_3[a(\lambda_3)], \quad (4)$$

где Q – октановое число исследуемого бензина; k_i – коэффициенты, определяемые при калибровке; $a(\lambda_i)$ - поглощение ИК-излучения.

Автором предложена оценка детонационной стойкости по методу, основанному на оптико-акустическом эффекте при поглощении лазерного излучения в контролируемой среде. На основе физических процессов, происходящих при формировании сигнала в оптико-акустическом детекторе, предложена методика оптико- акустического измерения октанового числа бензинов.

В качестве источника излучения используется непрерывный перестраиваемый лазер. Модулированное излучение лазера проходит через оптико-акустическую (ОА) ячейку, заполняемую анализируемой пробой бензина. В результате поглощения на определенном спектральном канале бензин нагревается и создает в ячейке колебания давления на частоте модуляции источника. Колебания давления с помощью микрофона преобразуются в электрический сигнал U согласно формуле:

$$U = kP_0k_\lambda, \quad (5)$$

где $k = k'k''$, k' - коэффициент пропорциональности; k'' - чувствительность микрофона; k_λ - показатель поглощения на длине волны λ ; P_0 - мощность излучения на входе в ячейку.

Изменяя длину волны излучения лазера, получим эталонный спектр поглощения на информативных полосах поглощения.

Анализ спектральных характеристик и нахождение искомого октанового числа бензина выполняются при помощи методов математического моделирования с предварительной калибровкой анализатора по наборам эталонных проб.

По результатам исследований реакции холоднопламенного окисления бензина разработан реакторный октаномер для определения октанового числа товарного бензина «Ока-1». Устройство (рис.6) содержит реактор с встроенным в его стенки нагревателем. Работой и калибровкой октаномера управляет программируемый микроконтроллер.

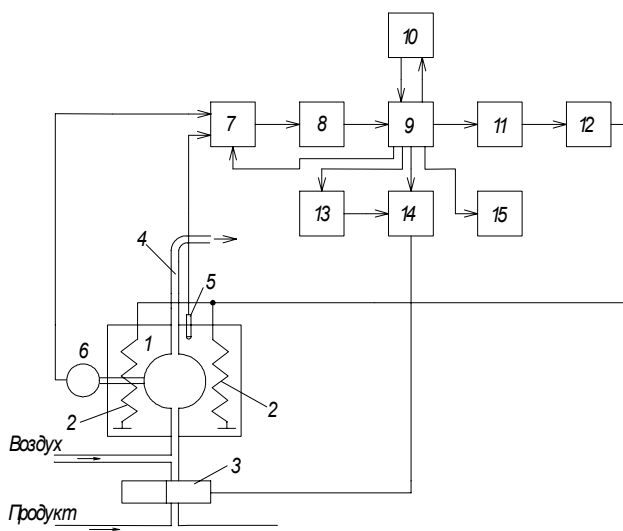


Рис. 6 Функциональная схема октаномера «Ока-1»

Калибровка октаномера проводится на первичных эталонных смесях изооктана и н-гептана. Создается, таким образом, калибровочная кривая

Таблица 2. Измерения давления РХПО в реакторе

Контрольный бензин с октановым числом 70 о.е. $T_{\text{реактора}}^{\circ} = 290^{\circ}\text{C}$											Среднее давл.
$P_{\text{пр}},$ кг/с м^2	1,95	1,95	2,00	1,90	1,90	1,80	1,95	1,95	1,95	1,85	
$P_{\text{р}},$ кг/с м^2	4,65	4,50	4,55	4,60	4,70	4,65	4,65	4,60	4,58	4,65	4,613

(зависимость давления от октановых чисел), и во время калибровки рабочая температура регулируется так, чтобы заставить след прототипа упасть на след, полученный для эталонного топлива, имеющего такую же октановую характеристику, что и прототип.

На рис.7 представлен график зависимости давления в реакторе от октанового числа эталонных бензинов, в табл.2 - контрольные измерения давления реакции бензина с октановым числом 70 о.е.

Данный метод единственный из всех электрофизических методов может претендовать на замену метода измерения октанового числа бензинов на установке двигателя внутреннего сгорания, так как он также калибруется на гостированных эталонных смесях изооктана и н-гептана и не зависит от типа анализируемого бензина.

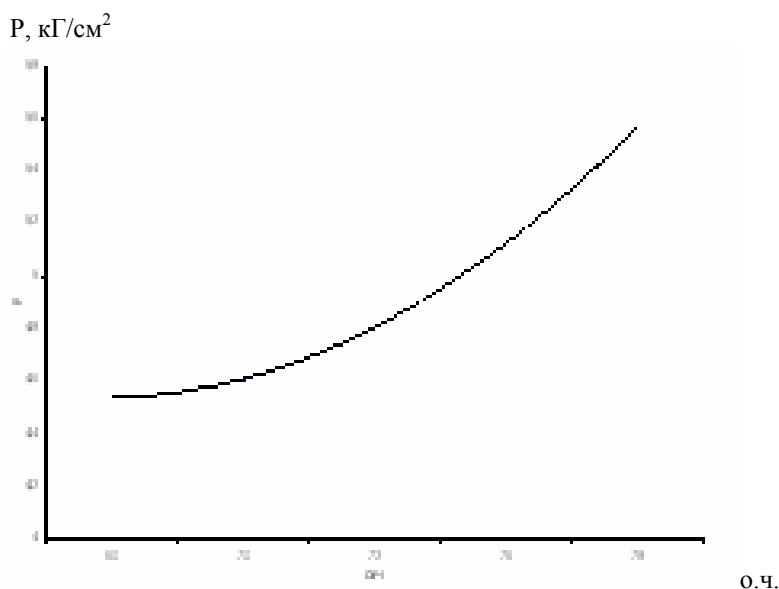


Рис. 7. График зависимости давления в реакторе от октанового числа эталонных бензинов

На основе предложенной методики оптико-акустического измерения октанового числа бензинов разработан спектрометрический лазерный оптико-акустический (ЛОА) октаномер (рис. 8).

В качестве источника излучения используется непрерывный перестраиваемый лазер. Модулированное излучение лазера проходит через оптико-акустическую (ОА) ячейку, заполняемую анализируемой пробой бензина. Для преобразования акустических сигналов служит конденсаторный микрофон типа ВМК-102. Для исключения влияния флуктуаций излучения на точность измерения регистрируют с помощью фотодиода мощность излучения прошедшего через среду U_2 , с последующей нормировкой на нее оптико-акустического сигнала U_1 , полученного с микрофона (U_1/U_2). При калибровке ЛОА-октаномера определяется постоянная ЛОА-ячейки $K_я$, которая необходима для вычисления показателя поглощения анализируемой бензиновой среды в измерительной ячейке. Изменяя длину волны излучения лазера, получим эталонный спектр поглощения на информативных полосах поглощения.

При анализе показателей качества по спектрометрическим характеристикам значение имеет выбор набора спектральных каналов измерения (НСКИ).

В работе рассмотрены два варианта выбора информативных полос поглощения «НСКИ».

В первом случае НСКИ считаем известным, так для пятикомпонентного состава бензина спектр поглощения представлен на рис.9. Данный спектр

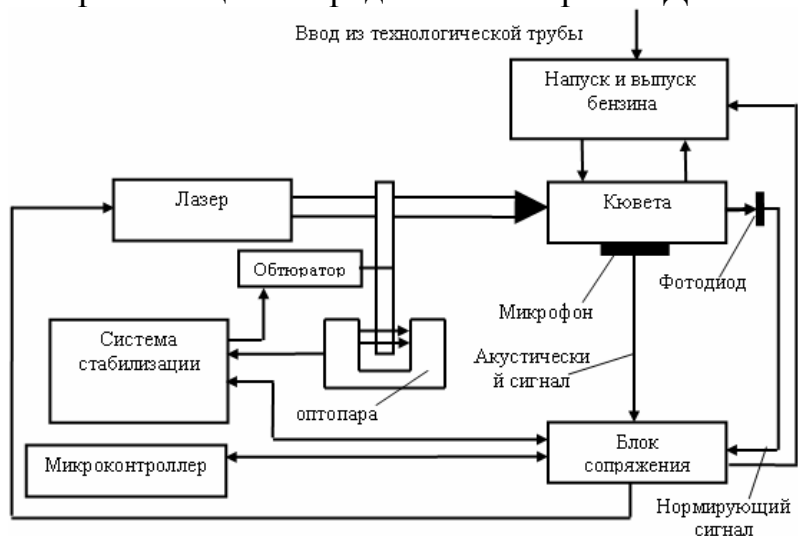


Рис. 8. Структурная схема лазерного оптико-акустического октаномера

изображает поглощения ИК-излучения бензиновой смесью (основа, метил-третбутиловый эфир (МТВЕ), ароматика, спирты, в том числе этанол) определенные на спектрографе.

Во втором случае, при контроле октанового числа незаявленных бензинов, ведется автоматизированный поиск НСКИ. Далее в диссертации проводится исследование задачи поиска оптимального НСКИ во втором варианте ее постановки.

Определение октанового числа бензиновой K -компонентной смеси осуществляется в результате проведения анализа поглощения на основе линейной регрессии. Для этого решают систему уравнений из M уравнений с K неизвестными. Система уравнений калибровки (определение коэффициентов регрессии) лазерного октаномера представляет собой систему алгебраических уравнений. В матричном виде система уравнений лазерного оптико-акустического анализатора бензинов имеет вид

$$KB + \beta = q, \quad (6)$$

где K – матрица коэффициентов поглощения k_{ji} ; B – вектор-столбец

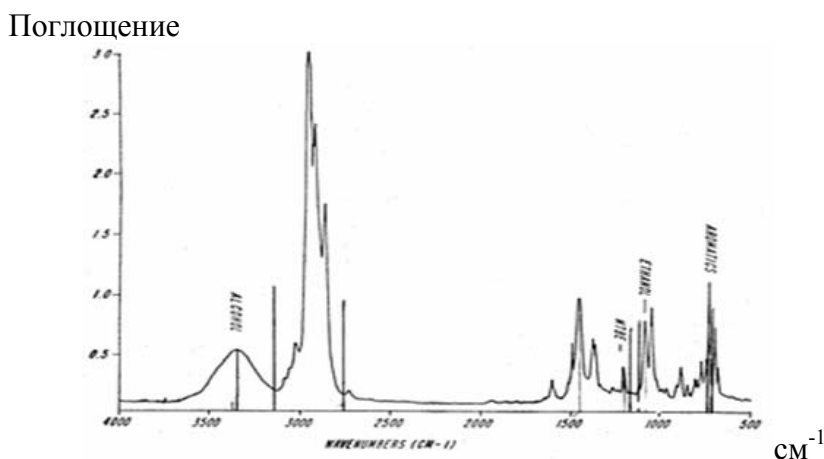


Рис.9. Спектр поглощения в инфракрасном диапазоне бензиновой смеси

неизвестных коэффициентов регрессии (констант); β - вектор-столбец неизвестных показателей неселективного поглощения β_j ; q - вектор-столбец значений октанового числа образцовых бензинов.

Для устранения влияния неселективного поглощения используем режим дифференциального поглощения. При этом измерение проводится в $M = 2K$ спектральных каналах, соответствующих анализируемым компонентам бензиновой смеси. Следовательно, разности коэффициентов поглощения Δk_{ji} бензина на какой-либо паре длин волн излучения соответствует численный коэффициент, совокупно отражающий влияние химических компонент бензина на уменьшение или увеличение октанового числа топлива. Отсюда на основании линейного регрессионного анализа спектральных данных определим октановое число анализируемого бензина с определенной точностью по формуле

$$q_i = \sum_{j=1}^k b_j \Delta k_{ij}, \quad (7)$$

где q_i - вычисленное значение октанового числа i -го образца бензина; b_j - коэффициенты линейной регрессии, $\Delta k_{ji} = k_{(2j-1)i} - k_{(2j)i}$ - коэффициенты поглощения i -го образца бензина на спектральных каналах измерения.

Выбор спектральных каналов влияет на точность определения октановых чисел бензинов, поэтому определение НСКИ является необходимым этапом для лазерного оптико-акустического анализа углеводородных топлив. На основе проведенных исследований определены и обобщены основные характеристики анализаторов многокомпонентных смесей: чувствительность и селективность (избирательность) и рассмотрены критерии поиска набора спектральных каналов измерения, основанные на оптимизации определенных характеристик ЛОА-октаномера.

При выборе оптимального НСКИ для ЛОА-октаномера, работающего в режиме дифференциального поглощения, объем перебора всех возможных сочетаний спектральных каналов существенно возрастает. В связи с большим объемом необходимых вычислений повышается актуальность использования алгоритмов поиска, снижающих объем вычислений, и критериев оптимальности, не требующих полного перебора.

Рассмотрена модификация генетического алгоритма для решения задачи определения концентраций или долей компонентов товарного бензина в процессе смешения. Это позволяет в системах адаптивного управления компаундированием товарных бензинов получать качественный бензин с заданным октановым числом с первого цикла смешения, корректируя рецептуру при изменении октановых чисел смешиваемых компонент.

В этом случае для определения концентраций компонент в K -компонентной бензиновой смеси необходимо решить систему из $2K$ - линейных уравнений. Здесь неизвестными являются значения концентраций (долей) компонент бензиновой смеси и значения показателей неселективного поглощения. Разработан алгоритм работы лазерного оптико-акустического октаномера в режиме определения долей компонент в бензиновой смеси.

Проведен анализ метода идентификации типа углеводородных топлив лазерным оптико-акустическим методом.

Исследования, проведенные автором метода, основанного на измерении диэлектрической проницаемости топлива в зависимости от его октанового числа с поправкой на температуру в октаномере «АС-98», получили дальнейшее развитие в разработке комплексного метода идентификации типа и определения октанового числа бензинов. Результаты исследований положены в основу разработки комплексного устройства определения октанового числа бензинов выполненного в двух вариантах в лабораторном «АС-2004М» и поточном «АС-2004П». Данный метод имеет высокую точность определения октанового числа бензина и позволяет иметь стационарную калибровочную модель по классам бензинов с самостоятельным (по предлагаемому автором алгоритму) выбором по программе калибровочной модели.

Далее рассмотрены конструктивно-технологические и схемотехнические особенности устройств контроля технологических параметров при компаундировании бензинов, разработанных автором: поточного электронно-акустического плотномера, схема акустического вискозиметра жидких нефтепродуктов, которые являются неотъемлемой частью комплексного октаномера «АС-2004П», гидростатического оптико-электронного уровнемера и др.

В четвертой главе рассмотрены метрологические характеристики рассматриваемых устройств контроля качества и технологических параметров. Так как все электрофизические параметры топлив жестко взаимосвязаны, то следует, что погрешности δq_{kx} коррелированы. Тогда для результирующей абсолютной погрешности измерений известно:

$$\delta Q_x = \sum_{k=1}^n \frac{\partial F(q_1, q_2, \dots, q_k, \dots, q_n)}{\partial q_k} \delta q_k = \sum_{k=1}^n (b_k + \delta b_k) \delta q_{k,x}. \quad (8)$$

Из (8) следует, что общая погрешность определения показателя качества δQ_x складывается из погрешности измерения каждого электрофизического параметра δq_{kx} и погрешности определения калибровочных коэффициентов δb_k (погрешность калибровочной модели). Однако точность оценки показателя качества в этом случае справедлива только для бензинов одного типа, на котором была проведена калибровка. Для остальных типов бензина – в лучшем случае - относительная погрешность составляет несколько процентов, что в абсолютных величинах равно 3 – 3,5 ед. ОЧ.

Комплексный метод позволяет повысить точность определения октанового числа незаявленных бензинов. Так погрешность определения октанового числа составила для бензинов: АИ-80 – 0,06 ед.ОЧ, АИ-92 – 0,18 ед. ОЧ, АИ-95 – 0,27 ед. ОЧ, АИ-98 – 0,02 ед. ОЧ.

Подробно рассмотрено определение основных погрешностей разработанного реакторного октаномера. В отличии от диэлектрического для калибровки реакторного октаномера используют первичные эталоны,

имеющие высокую точность октанового числа. Таким образом, погрешность калибровочной модели зависит только от погрешности измерений параметров реакции холодного окисления эталонных топлив: температуры нагрева реактора и давления в реакторе. С учетом погрешности калибровочной модели для суммарной погрешности получим:

$$\Delta = \pm \sqrt{\Delta_p^2 + \Delta_M^2}. \quad (9)$$

Если пренебречь погрешностью калибровочной модели, то основная погрешность реакторного октаномера будет определяться только погрешностью измерения давления в реакторе Δ_p . Погрешностью измерения температуры также пренебрегаем, так как при эксперименте было отмечено, что незначительные изменения температуры в реакторе не влияют на давление в реакторе в момент реакции. Для повышения точности за величину измерения давления принимаем среднее значение из десяти опытов.

Погрешность косвенного измерения величины Q_x зависит от погрешности всех прямо измеренных величин, входящих в уравнение связи (9), а также от погрешности вычислений.

$$Q_x = Q_{p0} + \frac{(P_x - P_0) \cdot (Q_1 - Q_0)}{(P_1 - P_0)}, \quad (10)$$

где Q_x - измеренное октановое число; P_x - измеренное давление реакции холодного окисления.

Погрешности вычисления в большинстве практических случаев можно устранить. Проведенные вычисления погрешности при измерении октанового числа бензинов составили:

для бензина 70 ед. ОЧ $Q_{70} = 70,08 \pm 0,17$ о.ед. $\delta_{70} = 0,25\%$; $\alpha = 0,95$,

для бензина 78 ед. ОЧ $Q_{78} = 77,96 \pm 0,039$ о.ед. $\delta_{78} = 0,05\%$; $\alpha = 0,95$

Данные расчеты погрешностей подтверждают, что абсолютная погрешность косвенно измеряемой величины ΔQ зависит не только от абсолютной погрешности прямо измеряемой величины ΔP . Она зависит также и от степени зависимости октанового числа бензина (Q) от давления реакции (P).

Подробно проведен анализ составляющих погрешностей разработанного спектрометрического лазерного оптико-акустического октаномера. Общая погрешность будет определяться погрешностями калибровки датчика поглощения. Наибольшую составляющую в основную погрешность вносят различного рода фоны и шумы. Уровень фоновых сигналов в большинстве случаев удобно оценивать в виде эквивалентного фонового поглощения β в среде, ОА-сигнал от которого равен фоновому. Наиболее характерные это:

1) случайный неоптический фон, связанный с влиянием некоррелированных с процессом модуляции излучения электромагнитных, тепловых и акустических помех, а также вибраций; 2) коррелированный неоптический фон, обусловленный процессом модуляции, но не связанный с прохождением излучения через ОА-ячейку; 3) коррелированный оптический инструментальный шум, появляющийся на стадии прохождения излучения через ОА-ячейку, но не связанный с поглощением в исследуемой среде; 4) коррелированный оптический фон от

исследуемой среды, связанный с прохождением через нее излучения.

В более общем виде (с учетом фонового поглощения) связь измеряемого сигнала U с концентрацией N исследуемой бензиновой смеси при измерениях на одной длине волны имеет следующий вид:

$$U = kP_0[k_\lambda + \beta], \quad (11)$$

где P_0 — мощность излучения на входе в ячейку (мощность лазера); $k_\lambda = kN$ — показатель поглощения бензиновой компоненты;
 k и N — коэффициент поглощения и концентрация компоненты;
 k — чувствительность оптико-акустического детектора (ОАД);
 β — показатель фонового поглощения.

Рассмотрены методы повышения точности и стабильности устройств контроля качества бензинов. Методы повышения точности реализованы в рассматриваемых устройствах. 1) В реакторных октаномерах за счет применения высокоточных калибровочных эталонных смесей. 2) Для спектрометрических октаномеров это использование оптико-акустического эффекта, что позволяет устранить влияние неселективного поглощения, используя режим дифференциального поглощения, и устранить эффект рассеяния в измерительном канале. 3) Для диэлектрического октаномера, использование запатентованного способа измерения октанового числа бензина, реализованного в октаномере АС-2004. Суть его заключается в разделении бензинов по определенным реофизическим параметрам нефтепродуктов и формировании калибровочных таблиц по классам бензинов.

В пятой главе проведено исследование математического моделирования термодинамики растворов и на основе полученных результатов разработана математическая модель технологического процесса смешивания бензиновых фракций. Так как основной нормируемой характеристикой товарного бензина является октановое число, которое в общем случае нелинейно зависит от октановых чисел смешиваемых компонентов, то в качестве модели рассматривается зависимость «компонентный состав – октановое число».

Проведенный поиск аналогов процесса смешивания с нелинейным видом зависимости характеристик конечного продукта от характеристик смешиваемых компонентов привел к термодинамике растворов, в которой изучаются термодинамические функции и термодинамические свойства компонентов. Данная гипотеза подобия позволяет рассматривать октановое число как один из термодинамических параметров при моделировании процесса смешивания компонентов товарного бензина.

В теории растворов (жидких, твердых, газообразных) наиболее важной является задача построения явных аналитических зависимостей термодинамических функций от свойств смешиваемых компонентов и независимых переменных: температуры, давления и числа молей компонентов. В качестве термодинамических функций рассматривают термодинамические величины: энергию Гиббса, энтропию, энтальпию, объем, энергию Гельмгольца, внутреннюю энергию и теплоемкость.

Пусть Z_i - i -я термодинамическая функция, тогда в общем случае можно записать:

$$Z_i = Z_i(T, P, n_1, \dots, n_N); \quad i = \overline{1..N} \quad (12)$$

где T - температура, P - давление, n_j - число молей j -го компонента, N - число компонентов в рассматриваемом растворе. Явный вид функции (12) принято называть уравнениями состояния.

По своему физико-математическому смыслу функции (12) обладают общими для них свойствами и непрерывно зависят от перечисленных переменных. При этом частные производные:

$$\frac{\partial Z_i}{\partial n_j} = z_{ij} = z_{ij}(T, P, n_1, \dots, n_N); \quad i = \overline{1..N}; \quad j = \overline{1..N} \quad (13)$$

называют парциальными мольными свойствами соответствующих компонентов. При этом парциальные мольные свойства z_{ij} обладают подобно функциям (12) общими свойствами и являются однородными функциями нулевого порядка относительно числа молей компонентов и, следовательно, в соответствии с формулой Эйлера для них можно записать систему дифференциальных уравнений в частных производных первого порядка:

$$\sum_{r=1}^N \frac{\partial z_{ij}}{\partial z_r} n_r = 0, \quad i = \overline{1..N}, \quad j = \overline{1..N}, \quad (14)$$

а также являются симметричными относительно $N - 1$ компонента и несимметричными относительно j -го компонента.

В силу непрерывности функций Z_i справедливы так называемые условия совместности (интегрируемости) для каждой пары функций z_{ij} и z_{ir} :

$$\frac{\partial z_{ij}}{\partial n_r} = \frac{\partial z_{ir}}{\partial n_j}; \quad i = \overline{1..N}; \quad j, r = \overline{1..N} \quad (15)$$

Наиболее простая запись функций Z_i получается при описании бинарного j - r раствора.

Введя в рассмотрение разности предельных значений и парциальных мольных свойств компонентов (13)

$$\alpha_{ijr} = z_{ijr}^* - z_{ij}^0, \quad \alpha_{irj} = z_{irj}^* - z_{ir}^0, \quad \gamma_{jr} = \frac{\alpha_{ijr}}{\alpha_{irj}}, \quad (16)$$

где $z_{ijr}^*(T, P)$ - предельное значение i -го парциального свойства j -го компонента в данном растворе при его бесконечном разбавлении r -м компонентом; $z_{irj}^*(T, P)$ - предельное значение i -го парциального свойства r -го компонента при его разбавлении j -м компонентом; $z_{ij}^0(T, P)$ и $z_{ir}^0(T, P)$ - i -е парциальные мольные свойства соответственно j -го и r -го чистых компонентов.

Для упрощения записи опустим аргументы T и P , введем в рассмотрение так называемые обобщенные мольные доли компонентов: K_j и K_r , а также некоторую "почти произвольную" функцию $F_{jr} = F(K_j, K_r)$, симметрично зависящую от K_j и K_r , ($F_{jr} = F_{rj}$). И, подставляя выражения для α_{ijr} и α_{irj} , окончательно получим:

$$Z_i = z_{ij}^0 n_j + z_{ir}^0 n_r + \frac{z_{ij}^0 - z_{ir}^0}{1 - \gamma_{jr}} (\gamma_{jr} n_j + n_r) F(K_j, K_r). \quad (17)$$

Последний член в этом выражении учитывает нелинейные эффекты. При обобщении формулы на общий случай $N > 2$ свойства многокомпонентных растворов удастся однозначно выразить через соответствующие характеристики бинарных j - r растворов ($j \neq r, j = \overline{1, N}, r = \overline{1, N}$).

Если при назначении функции $F(K_j, K_r)$ ограничиться только одним членом ряда, то уравнение состояния (17) примет вид:

$$Z_i(T, P, n_1, \dots, n_N) = \sum_{j=1}^N z_{ij}^0 n_j + \frac{1}{\sum_{l=1}^N \gamma_{io} n_l} \sum_{j=1}^{N-1} \gamma_{io} \sum_{r=j+1}^N \frac{z_{ij}^0 - z_{ir}^0}{1 - \gamma_{jr}} n_j n_r.$$

Поскольку (12) - однородная функция первого порядка по числу молей компонентов, то для нее справедливо следующее представление:

$$Z_i(T, P, n_1, \dots, n_N) = \left(\sum_{j=1}^N n_j \right) \bar{Z}_i(T, P, x_1, \dots, x_N), \quad (18)$$

где

$$x_j = \frac{n_j}{\sum_{j=1}^N n_j} \quad (19)$$

молярная доля j -го компонента в растворе. При этом обобщенные молярные доли компонентов K_j можно выразить через молярные доли (20)

$$K_j = \frac{\gamma_{jo} x_j}{\sum_{l=1}^N \gamma_{lo} x_l} \quad (20)$$

Введенная таким образом так называемая приведенная термодинамическая функция \bar{Z}_i , в отличие от обычной Z_i , не зависит от абсолютного числа молей компонентов, составляющих раствор, а зависит только от молярной доли каждого из компонентов, то есть является однородной нулевого порядка функцией числа молей компонентов, как и потребуется при моделировании октанового числа.

Далее показано, что октановое число бензиновой смеси зависит исключительно от относительной доли составляющих смесь компонентов. Подобными свойствами обладают приведенные термодинамические функции. Именно они могут рассматриваться в качестве полного аналога зависимости "октановое число - состав" по всем имеющимся признакам моделирования: набору независимых переменных, однородности нулевого порядка и симметричности относительно числа молей компонентов. Поэтому можем записать следующий явный вид зависимости октанового числа Q от октановых чисел Q_j^o чистых компонентов и соответствующих независимых переменных:

$$Q = \sum_{j=1}^N Q_j^o x_j + \Phi(x_1, \dots, x_N), \quad (21)$$

где нелинейная составляющая имеет вид:

$$\Phi(x_1, \dots, x_N) = \sum_{l=1}^N \gamma_{lo} x_l \sum_{j=1}^{N-1} \sum_{r=j+1}^N (Q_j^o - Q_r^o) \frac{\gamma_{or}}{1 - \gamma_{jr}} F(K_j, K_r). \quad (22)$$

Если в качестве функции $F(K_j, K_r)$ ограничиться только первым членом ряда, то для модели октанового числа будем иметь:

$$Q = \sum_{j=1}^N Q_j^o x_j + \frac{1}{\sum_{l=1}^N \gamma_{lo} x_l} \sum_{j=1}^{N-1} \gamma_{jo} \sum_{r=j+1}^N \frac{Q_j^o - Q_r^o}{1 - \gamma_{jr}} x_j x_r. \quad (23)$$

Отсюда видно, что влияние нелинейного члена тем больше, чем больше разность $Q_j^o - Q_r^o$.

Для практического применения модели приводится преобразование математической модели октанового числа применительно к производственным условиям. Для этого есть два пути: это пересчет объемных концентраций (расходов) в весовые, а затем в мольные, либо модель (23) адаптировать, при этом мольные доли компонентов в растворе и обобщенные мольные доли выразим через формулы

$$X_j = \frac{V_j}{\sum_{l=1}^N V_l}, \quad K_j = \frac{\gamma_{jo} V_j}{\sum_{l=1}^N \gamma_{lo} V_l},$$

где V_j обозначен объемный расход смешиваемых компонентов товарного бензина.

В шестой главе разработан метод адаптивной оптимизации процесса компаундирования товарных бензинов.

Целью задачи является получение товарного бензина требуемого качества при минимизации его стоимости. Стоимость товарного бензина C_Σ определяется стоимостью c_i и количеством u_i каждого из входящих в него компонентов как $C_\Sigma = \sum c_i u_i$. Поэтому цель задачи управления процессом смешения математически можно представить в следующем виде

$$C^T U \rightarrow \min, \quad (24)$$

где $C = |c_1, \dots, c_n|^T$ - вектор стоимости входящих в товарный бензин компонентов;

$U = |u_1, \dots, u_n|^T$ - вектор величин потоков смешиваемых компонентов;

n - число смешиваемых компонентов $n = \overline{2, 16}$. Так как стоимости отдельных компонентов являются на этапе решения задачи (24) определенными величинами, минимизация проводится только по вектору U . На управляющие воздействия u_i накладываются естественные ограничения, связанные с физическим смыслом этих величин $0 \leq u_i \leq d$; где $i = 1, \dots, n$, u_i - компоненты вектора U , d - известная величина, равная максимальной пропускной способности трубопроводов. Требованиями устойчивости процесса смешивания вызвана необходимость соблюдения следующих ограничений:

$$|u_i(k+1) - u_i(k)| \leq b, \quad i = \overline{1, n} \quad (25)$$

где k - моменты дискретного времени $k = 0, 1, \dots$; b - известная величина, задаваемая оператором-технологом.

Технологические требования к содержанию количества смеси в трубопроводе с конечным продуктом определяют ограничение, физический смысл которого состоит в неизменности величины потока товарного бензина

$$q^T U(k) = G, \quad (26)$$

где q - вектор размерности n , все компоненты которого равны единице;

G - заранее заданная величина (производительность станции смешения), которая устанавливается оператором-технологом.

Среди нормируемых показателей основным является октановое число Q_Σ товарного бензина. Требования, предъявляемые к величине Q_Σ могут быть записаны в виде

$$\underline{Q}_\Sigma \leq Q_\Sigma \leq \overline{Q}_\Sigma, \quad (27)$$

где $\underline{Q}_\Sigma, \overline{Q}_\Sigma$ - соответственно верхняя и нижняя допустимые границы октанового числа товарного бензина, получаемого в результате смешивания всех компонент в потоке. Чем ниже октановое число нефтепродуктов, тем меньше его стоимость. Поэтому желательно, чтобы октановое число товарного бензина соответствовало нижней допустимой границе интервала (27), т.е. $Q_\Sigma = \underline{Q}_\Sigma$. Математическая модель технологического процесса смешивания бензиновых фракций может быть описана уравнением

$$Q_\Sigma(k) = U(k)Q^*[q^T U(k)]^{-1} + \delta(k), \quad (28)$$

где $Q^* = |Q_1^*, \dots, Q_n^*|^T$ - вектор октановых чисел компонентов товарного бензина в смешиваемых потоках;

$q = |1, \dots, 1|^T$ - вектор размерности n , все компоненты которого равны единице;

$\delta(k) = \delta(U(k), Q)$ - величина, характеризующая степень нелинейности процесса. Величина δ не превышает для рассматриваемых веществ и интервалов изменения их количества, некоторой постоянной величины \tilde{s} , которая может быть установлена экспериментальным путем. Более точно величина \tilde{s} определена в (23)

$$|\delta(k)| \leq \tilde{s}, \quad \forall k \geq 0. \quad (29)$$

Решение задачи (24) при заданных ограничениях может быть получено путем вычисления вектора оптимальных управляющих воздействий методами линейного программирования, если известен вектор октановых чисел Q_i компонентов смеси модели (28).

Однако октановые числа Q_i , смешиваемых компонентов точно неизвестны, известны лишь их интервальные оценки следующего вида

$$\underline{Q}_i \leq Q_i \leq \overline{Q}_i \quad \text{для всех } i = 1, 2, \dots, n. \quad (30)$$

Поэтому задача оптимизации процесса компаундирования сводится к поочередному решению следующих задач:

-идентификации неизвестных параметров Q модели (28);

-решению задачи линейного программирования (24) при заданных ограничениях.

В основу разработки метода адаптивного управления положен нестохастический подход, а именно метод эллипсоидальных оценок. В рамках этого подхода параметры задачи, придающие ей неопределенный характер, задаются только множествами своих возможных значений. Поэтому не требуется знания вероятностных характеристик неопределенных факторов, которые редко бывают точно известны на практике. Разработан алгоритм идентификации параметров (октановых чисел компонентов) математической модели и предложен метод обеспечения сходимости алгоритма идентификации при ограничениях на вектор входных переменных. Исходной информацией для работы алгоритма идентификации (АИ) являются уравнения модели процесса (28), текущие измерения вектора входов ($U^T(k)$ - расходы компонентов) и выходов ($Y(k)$ - показаний анализатора, измеряющего октановое число товарного бензина) $Y(k) = Q_\Sigma(k) + \tilde{\xi}(k)$, где $\tilde{\xi}(k)$ - ошибка измерений, причем известно, что $|\tilde{\xi}(k)| \leq \mathcal{E}$, \mathcal{E} - постоянная, определяемая классом точности измеряющего устройства. Тогда уравнение измерения октанового числа может быть записано в виде

$$Y(k) = U^T(k)Q^*[q^T U(k)]^{-1} + \xi(k). \quad (31)$$

Схема адаптивной системы смешения бензинов с блоком идентификации представлена на рис.10.

Априорно известны оценки значений компонентов вектора Q коэффициентов модели (28) в виде интервалов

$$\underline{Q}_i \leq Q_i \leq \overline{Q}_i. \quad (32)$$

В результате работы алгоритма идентификации строится последовательность $\{E(k)\}$ эллипсоидальных множеств в соответствующих пространствах R^n , данные множества условимся называть просто эллипсоидами.

Задача сходимости алгоритмов эллипсоидального оценивания рассматривается в условиях, когда входные переменные в уравнении регрессии связаны линейными ограничениями.

В качестве начального эллипсоида берется эллипсоид E_0 с параметрами

$$\begin{aligned} \hat{Q}(0) &= \frac{1}{2}(\overline{Q}_1 + \underline{Q}_1, \dots, \overline{Q}_n + \underline{Q}_n), \\ H(0) &= \frac{n}{4} \text{diag}\{(\overline{Q}_1 - \underline{Q}_1)^2, \dots, (\overline{Q}_n - \underline{Q}_n)^2\} \end{aligned}$$

Приведенных в работе исходных данных достаточно для построения так называемых эллипсоидальных оценок E_k вектора параметров Q_* . Эти оценки имеют вид многомерных эллипсоидов

$$E_k = \{Q \in R^n : (Q - Q_k)^T H_k^{-1} (Q - Q_k) \leq 1\} \quad (33)$$

таких, что $Q_* \in E_k \rightarrow \forall k \geq 1$ При этом $|E_k| \leq |E_{k-1}|$, где $|E|$ - многомерный объем эллипсоида E .

В (33) $Q_k \in R^n$ - центр симметрии эллипсоида, H_k - положительно определенная $(n \times n)$ - матрица. Эти определяющие оценку E_k величины вычисляются рекуррентно в соответствии с тем или иным алгоритмом эллипсоидального оценивания:

$$Q_k = Q_{k-1} + \frac{H_{k-1} u_k}{(u_k^T H_{k-1} u_k)^{1/2}} \text{sign}(y_k - Q_{k-1}^T u_k) \quad (34)$$

$$H_k = \gamma_k^2 (H_{k-1} + (\beta_k^2 - 1) \frac{H_{k-1} u_k u_k^T H_{k-1}}{u_k^T H_{k-1} u_k}), \quad (35)$$

где начальные значения Q_0 и H_0 равны соответствующим параметрам априорного эллипсоида в (34) и (35), γ_k, β_k - числовые параметры, в общем случае функционально связанные с переменными $y_k, u_k, C_k, Q_{k-1}, H_{k-1}$.

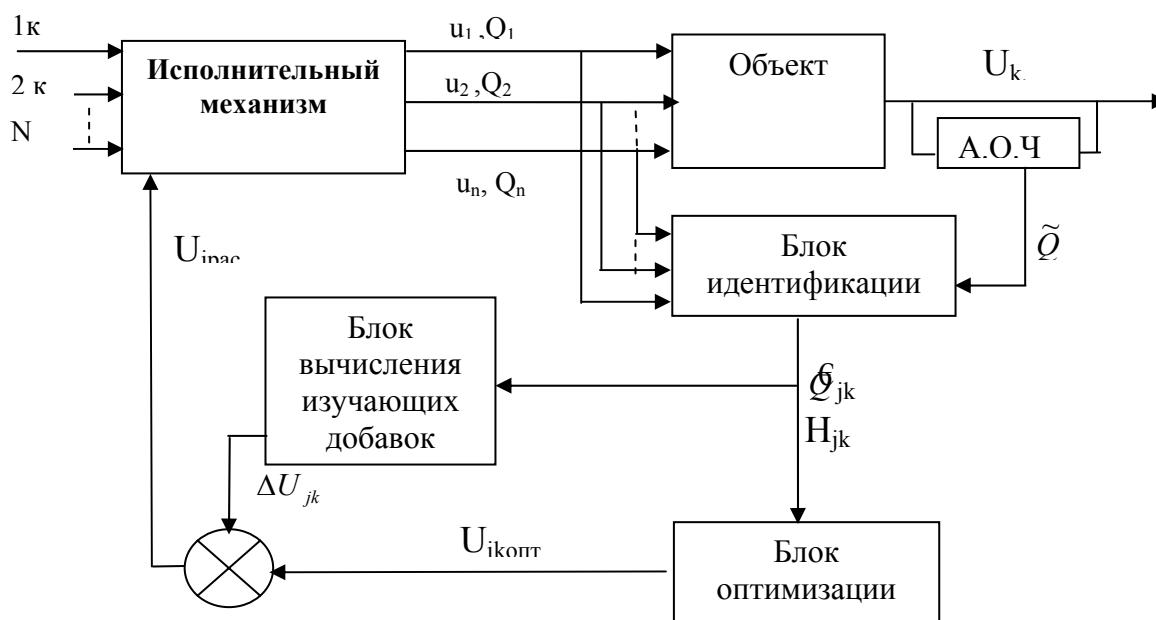


Рис. 10. Схема адаптивной системы смешения бензинов

U_k - объем продукта; U_j - объем j -го компонента; Q_k - о. ч. продукта, (Y_k);
 \tilde{Q}_k - показания О.Ч. на анализаторе октанового числа; \tilde{Q}_j - о. ч. j -го компонента; \hat{Q}_j - идентифицированное О.Ч. j -го компонента; H_j - симметрическая положительно определенная матрица; $U_{j\text{опт}}$ - оптимальный расход j -го компонента; ΔU_k - изучающая добавка (поправка);
 $u_{j\text{расч}}$ - расчетный расход j -го компонента; k - дискретное время;

Пара u_k, y_k считается информативной, если

$$\gamma_k^{2n} \beta_k^2 \leq q < 1, \quad (36)$$

где q - некоторая константа. Поскольку объем эллипсоида E_k прямо пропорционален корню квадратному из определителя $\det H_k$ матрицы H_k , то для информативных пар объемы эллипсоидов строго монотонно убывают.

Показано, что решение задачи оценивания параметров линейной регрессии при $\xi = 0$ сводится к нахождению решения системы уравнений

$$y_k = Q^T u_k \quad k = 1, 2, \dots \quad (37)$$

Предложенный алгоритм позволяет при учете априорной информации об ограничениях и результатах измерений строить множественные оценки (в виде многомерных эллипсоидов) соответствующих оцениваемых величин, а именно: октановых чисел смешиваемых компонентов.

Разработан алгоритм вычисления изучающих добавок при линейных ограничениях на значение входных переменных, обеспечивающий сходимость алгоритма идентификации во всех случаях.

Конкретный алгоритм решения задачи адаптивной оптимизации процесса компаундирования оформлен в виде программы (приложение А).

В седьмой главе рассмотрена техническая реализация адаптивной системы управления процессом компаундирования (смещения) нефтепродуктов.

На основе анализа комплекса технических средств (КТС) существующих систем АСУ ТП разработаны структурная схема и комплекс технических средств управления смешением со встроенными в его контур комплексным анализатором качества товарного бензина и специализированным многопроцессорным контроллером на базе ОМЭВМ. Практика развития программируемых контроллеров подтвердила данную концепцию создания многопроцессорных контроллеров, в обратной связи которого встроен комплекс поточных устройств контроля качества товарной продукции.

Специализированный микроконтроллер имеет модульную конструкцию:

модуль процессора-арбитра с блоками интерфейсов RS232 и RS-485, служащие для связи с персональным компьютером и для связи с анализаторами октанового числа товарного бензина, плотности, вязкости и температуры;

модули канальных процессоров, их количество зависит от количества смешиваемых компонентов товарного бензина.

На основании разработанных схемных решений КТС разработаны алгоритмы и программное обеспечение системы.

В табл. 3 представлены результаты численного моделирования адаптивного компаундирования. Первый расчёт является контрольным – оптимальное компаундирование было рассчитано при истинных значениях октановых чисел компонентов. Во втором расчёте в качестве октановых чисел компонентов были взяты их не улучшаемые оценки. Третий расчёт был проведён с помощью программы ОСТАН при отсутствии изучающих добавок. В четвёртом расчёте программа ОСТАН генерировала изучающие добавки.

Таблица 3. Результаты численного моделирования компаундирования

Вариант счёта	Октановые числа компонентов			Октановое число товарн бензина	Стоимость бензина, усл.ед	Расходы компонентов м ³ /ч		
	оценки		истинные					
1.	83.0	61.5	69.5	71.5	8.77	144	156	50
2.	84.0	61.0	70.5	71.2	8.70	139	161	50
3.	83.9	60.6	69.8	71.5	8.77	144	156	50
4.	83.2	61.3	69.8	71.5	8.79	144	155	51

Проведен сравнительный анализ производительности станции смешения при использовании различных регуляторов.

Примем максимально возможную производительность станции смешения 100 м³/ч. Пусть среднее время, за которое происходят возмущающие воздействия, связанные с различными причинами равняется 10 мин.

Оценим время, которое требуется регуляторам для отработки этих возмущений (рис. 11). Считаем, что регуляторы настроены идеально и не происходит изменение параметров модели в процессе смешения.

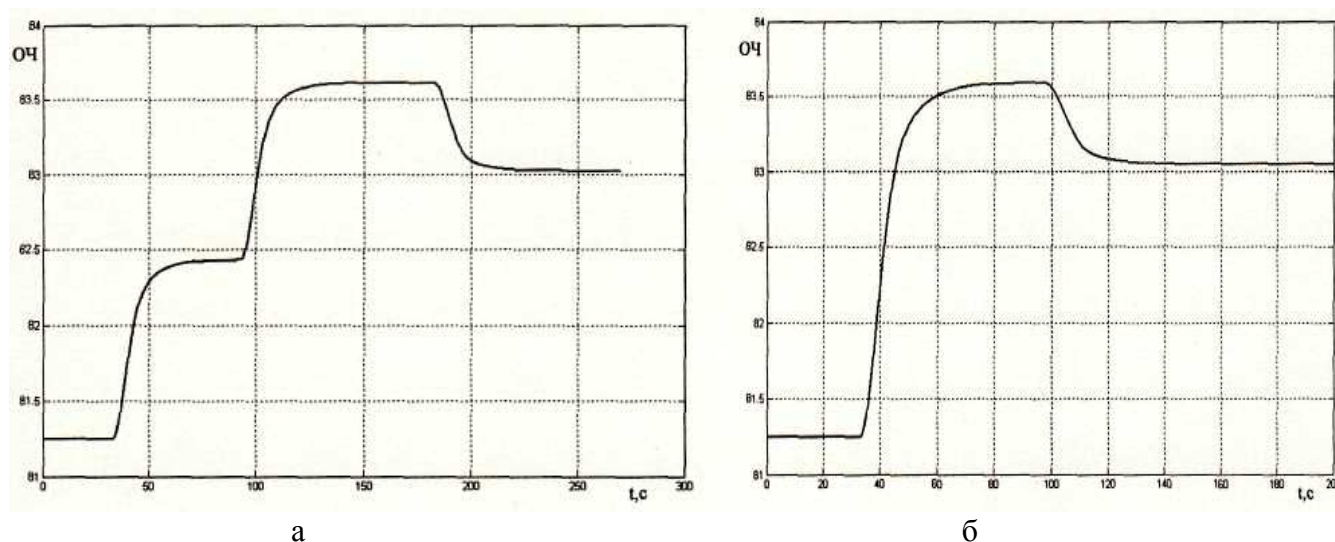


Рис. 11. Переходные процессы смешения

а - алгоритм управления с итерационным циклом регулирования

б - алгоритм адаптивного управления с идентификацией октанового числа компонентов.

Станция смешения запускается в работу при начальной заданной рецептуре смешения, по которой известны оптимальные расходы компонентов. Показано, что время отработки возмущений у регуляторов с ПИ-законом регулирования – 1 ч, с ПИД-законом – 0,58 ч.

С использованием предиктора (упредителя) Смита: время отработки возмущений составляет 0,057 ч.

Продолжительность отработки возмущений у ПИ и ПИД регуляторов занимает значительное время. Для ПИ регулятора продукция требуемого качества вообще не будет получена, так как время отработки занимает все время получения продукта. Для ПИД-регулятора более половины времени продукция требуемого качества получается, но так как время отработки также значительно, то продукция требуемого качества также не будет получена. Потребуется дополнительное смешение для 58% полученного бензина.

Погрешность представления времени чистого запаздывания в упреждающем регуляторе Смита вообще делает систему неустойчивой. Поэтому в процессе функционирования необходимо производить экспериментальную идентификацию модели, которая также занимает достаточно большое время и должна производиться с большой точностью. При этом происходит нарушение нормального функционирования объекта.

Показано, что τ_c - общее время перемешивания компонентов с учетом инерционности технологического оборудования и средств управления составляет:

для алгоритма с итерационным циклом регулирования - 0,32 ч.;

алгоритма с идентификацией октановых чисел компонентов – 0,16 ч.

При этом для данных алгоритмов как таковая настройка не нужна и все возмущения будут компенсированы с помощью изменения расхода регулирующего компонента. Однако для системы с итерационным циклом регулирования время достижения результата в два раза больше.

Таким образом, лучшие результаты даёт применение адаптивной системы с идентификацией октановых чисел компонент, при этом производительность станции смешения по продукции требуемого качества является максимальной и составляет 84% от выпускаемой продукции

В заключении приводятся основные результаты и выводы по диссертационной работе.

1. Рассмотрены основные схемные решения устройств и систем контроля и управления технологическими процессами компаундирования на основе интеллектуальных датчиков встроенного контроля (ДВК).

2. В результате проведения исследования электрофизических характеристик углеводородных жидкостей разработаны рекомендации для разработки методов и устройств контроля качественных параметров бензинов, в том числе для оценки детонационной стойкости товарных бензинов на основе:

- реакции холоднопламенного окисления бензина в реакторе;
- измерения диэлектрической проницаемости бензинов;
- оптико-акустического эффекта при поглощении лазерного излучения в контролируемой среде.

3. Разработан комплексный метод идентификации и измерения октановых чисел товарных бензинов, который позволил определять октановое число в среднем с точностью 0,18 ед.ОЧ и иметь стационарную калибровочную модель по классам бензинов с автоматическим выбором калибровочной модели.

4. Разработаны схемы и конструкция лазерного оптико-акустического (ЛОА) октаномера, методика его калибровки и измерения октанового числа. Предложен метод использования ЛОА-октаномера для определения концентрации компонентов бензиновой смеси и идентификации бензинов.

5. Предложено устройство высокоточного октаномера «Ока-1» на основе РХПО бензина, который калибруется на гостированных эталонных смесях изооктана и н-гептана и его результат измерения с точностью до 0,05% не зависит от состава компонентов товарного бензина.

6. Разработано искробезопасное устройство для измерения плотности и вязкости углеводородных топлив в потоке, которое может использоваться, как измеритель массового расхода нефтепродуктов с точностью 0,15 - 0,2%.

7. Разработана нелинейная математическая модель технологического процесса смешивания бензиновых компонентов (модель октанового числа) и на ее базе разработан алгоритм идентификации параметров - октанового числа смешиваемых компонентов при решении задачи оптимизации процесса компаундирования товарных бензинов.

8. Разработаны основные схемные решения комплекса технических средств и программное обеспечение системы приготовления товарных бензинов, практическая эксплуатация и экспериментальные исследования подтвердили правильность основных теоретических положений рассмотренных в диссертации. Созданные устройства удовлетворяют современным требованиям и могут использоваться как в лабораториях, так и в системах управления технологическими процессами. По результатам численного моделирования алгоритма идентификации октановых чисел с генерацией изучающих добавок получены оценки октановых чисел компонентов с точностью 0,2 – 0,3 ед. ОЧ. Проведенные исследования динамических характеристик адаптивной системы управления показывают, что производительность станции смешения по продукции требуемого качества является максимальной и составляет 84% от готовой продукции против 58% для ПИД-регулятора.

Применение рассмотренных ДВК, математических моделей и алгоритмов на разных участках производства и контроля позволяет НПЗ средней мощности экономить до десятков миллионов долларов в год.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

Публикации, в изданиях рекомендованных ВАК:

1. Астапов В.Н. Приборы для измерения октанового числа бензинов в технологическом потоке. //Химия и технология топлив и масел. 2002. №2. С. 49 – 51.
2. Астапов В.Н., Бакан Г.М., Коцюба А.Т. и др. Математическое моделирование технологического процесса смешивания бензиновых фракций //Автоматика. 1992. №5. С.31-37.
3. Астапов В.Н., Бакан Г.М., Сальников Н.Н. Оценивание с помощью эллипсоидов параметров линейной регрессии при линейных ограничениях на вектор входных переменных //Автоматика. 1993. №1. С.28 – 34.
4. Астапов В.Н., Бакан Г.М., Воробьев Г.Г. и др. Техническая реализация адаптивной оптимизации процесса компаундирования нефтепродуктов, - Киев.1991. С.22. Препринт./АН УССР. Институт кибернетики им. В.М. Глушкова; 91 – 27.
5. Астапов В.Н., Скворцов Б.В. Электронный октанометр //Измерительная техника. 1999. № 9. С.63 – 65.
6. Астапов В.Н. Лазерный оптико-акустический октанометр в системах оптимизации процесса компаундирования товарных бензинов // Вестн. СГАУ, 2009. № 1 (17).
7. Астапов В.Н., Плешивцев В.В., Конюхов Н.Е. Лазерный оптико-акустический метод контроля качества углеводородных топлив //Вестн. Самар. гос. ун-та. Технические системы. 2006. № 9. С.277-284.

Авторские свидетельства и Патенты РФ:

8. Астапов В.Н. Устройство для измерения октанового числа бензина //Патент № 2207557 РФ. – Бюл. № 18. 2003.

9. Астапов В.Н. Устройство для определения октанового числа бензинов. //Патент № 1714476 СССР. – Бюл. № 7. 1992.
10. Астапов В.Н., Фалкин Д.В. Устройство для измерения плотности жидкости // Патент РФ на пол. модель №55986. Бюл. № 24. 2006.
11. Астапов В.Н. Способ измерения октанового числа бензинов // Патент РФ № 2305283. – Бюл. №24. 2007.
12. Астапов В.Н. Устройство дистанционного контроля атмосферы //Патент № 2226269 РФ. – Бюл. № 9. 2004.
13. Астапов В.Н. Способ адаптивного управления процессом смешивания жидкостей //Патент № 2133493 РФ. – Бюл. № 20. 1999.
14. Астапов В.Н. Устройство для дозирования //Патент №1747913 СССР. – Бюл. №26. 1992.
15. Астапов В.Н., Воробьев Г.Г. Устройство для обмена информацией //Патент № 1784103 СССР. – Бюл. №47. 1992.
16. Астапов В.Н. Устройство для измерения частоты и периода //Патент № 1824592 РФ. – Бюл. № 24. 1993
17. Астапов В.Н. Устройство для аварийного перекрытия трубопровода //Патент № 2052167 РФ. – Бюл. № 1. 1996.
18. Астапов В.Н., Васильев Р.Л., Конюхов Н.Е., Воробьев Г.Г. и др. Способ определения октанового числа бензинов и устройство для его осуществления //Патент № 2091758 РФ. – Бюл. № 27. 1997.
19. Астапов В.Н., Синников С.Г. и др. Устройство для оперативного измерения октанового числа бензинов //Патент № 2206085 РФ. – Бюл. № 16. 2003.
20. Астапов В.Н., Синников С.Г. и др. Способ определения плотности жидкостей и устройство для его осуществления //Патент № 2210764 РФ. – Бюл. №23. 2003.
21. Астапов В.Н., Черняк С.В. Гидростатический датчик уровня жидкости //А.с. №11809317 СССР. – Бюл. №14. 1993.
22. Астапов В.Н. Прибор для определения твердости полимерных материалов // Патент РФ № 1827579. Бюл. №26. 1993.
23. Астапов В.Н. Бортовое устройство для контроля загрязнения моторного масла // Патент РФ на пол. модель № 40469. Бюл. №25. 2004.
24. Астапов В.Н. Устройство для автоматического контроля метана и других горючих газов. //Патент № 2013565 РФ. – Бюл. № 10. 1994.
25. Астапов В.Н., Мисиевич.С.К. Бортовое устройство контроля уровня и загрязнения моторного масла //Патент РФ на пол.модель № 67707. Бюл. №30. 2007.
26. Астапов В.Н. Лазерный оптико-акустический октанометр //Патент РФ на пол. модель №71425. Бюл. №7. 2008.

Монографии:

27. Астапов В.Н. Методологические и схемотехнические решения в системах контроля и управления на нефтеперерабатывающем заводе – Самара: Изд-во СНЦ РАН, 2006. С. 286.
28. Скворцов Б.В., Конюхов Н.Е., Астапов В.Н. Приборы и системы контроля качества углеводородных топлив. – М.: Энергоатомиздат. 2000. С. 366.

Публикации в других изданиях:

29. Астапов В.Н., Бакан Г.М., Коцюба А.Т. Математическая модель технологического процесса смешивания бензиновых фракций //Тез. докл. научн. – техн. конф. «Применение вычислительной техники и математических методов в научных и экономических исследованиях». Шацк, 10 – 14 сентября 1991, - Киев: КПИ, 1991. – С. 118.
30. Фомин А.В., Астапов В.Н., Скворцов Б.В. Электронно – акустическое устройство для определения плотности нефтепродуктов.. //Вестн. СГАУ, 2001. №6. С. 79 – 83.
31. Астапов В.Н., Абдулин И.Г. Автоматизированная система контроля и управления степени вулканизации формовых резинотехнических изделий. //Вестник СГАУ, 2002. №7. С.17-21.

32. Астапов В.Н., Некрасова Т.А. Акустический метод измерения вязкости жидких нефтепродуктов. //Вестник СГАУ, 2004 № 9. С. 54 - 58.
33. Астапов В.Н. Физические основы оптико-акустического метода контроля качества углеводородных топлив. // Науч. тр. VII междунар. науч-практ. конф. «Фундаментальные и прикладные проблемы приборостроения, информатики и экономики». Кн. «Приборостроение». М.: МГАПИ, 2005. С. 19-23.
34. Астапов В.Н. Дистанционный контроль загрязнения атмосферы// Науч. тр. VII междунар. науч-практ. Конф. «Фундаментальные и прикладные проблемы приборостроения, информатики и экономики». Кн. «Приборостроение». М.: МГАПИ, 2005. С. 15-19.
35. Астапов В.Н., Фалкин Д.В. Автоматизированная система коммерческого учета и распределения светлых нефтепродуктов. // Науч. тр. IX междунар. науч-практ. конф. «Фундаментальные и прикладные проблемы приборостроения, информатики и экономики». Кн. «Приборостроение». М.: МГАПИ, 2006. С. 12-17.
36. Скворцов Б.В., Конюхов Н.Е., Астапов В.Н. Разработка и организация производства приборов контроля качества нефтепродуктов. Отчет (шифр 39В – БО19005) по программе «Конверсия и высокие технологии» (депонированная статья) //ВИНИТИ, Рег. № 01200000214. 1999. С. 88.
37. Плешивцев В.В., Конюхов Н.Е. Астапов В.Н. Физические процессы в оптико-акустической ячейке устройства контроля качества углеводородных топлив. // Сб. тр. студентов и аспирантов РТФ СГАУ. 2006. Вып. 10. С.36-41.
38. Фалкин Д.В., Астапов В.Н. Оптический кодирующий преобразователь линейных перемещений с улучшенной разрешающей способностью. //Сб. тр. студентов и аспирантов РТФ СГАУ, 2006. Выпуск 10. С.109-114.
39. Астапов В.Н., Фалкин Д.В. Адаптивная система управления характеристиками смазочно – охлаждающей жидкости (СОЖ) в технологическом процессе стана горячей прокатки.// Автоматизация, диагностика и контроль технологических процессов и оборудования. Межвуз. сб. науч. тр. 2006. Вып.6. С. 43-47.
40. Астапов В.Н., Плешивцев В.В. Поиск набора спектральных каналов измерения для ЛОА-октанометра. Высокие технологии в машиностроении. //Материалы науч.-техн. Интернет-конф. с междунар. участием. Сам.ГТУ, 2006. С. 29-41.
41. Астапов В.Н., Плешивцев В.В. Оптимизация процесса компаундирования товарных бензинов. Высокие технологии в машиностроении. /Отв. ред. В.Г. Круцило. //Материалы науч.-техн. Интернет-конф. с междунар. участием. Сам.ГТУ, 2008. С. 238-245.
42. Астапов В.Н., Плешивцев В.В. Анализ составляющих погрешностей лазерного оптико-акустического октанометра. /Отв. ред. В.Г. Круцило. //Материалы научно-технической Интернет-конференции с междунар. участием. Сам.ГТУ, 2008. С. 7-10.