

На правах рукописи



БРАЙЛКО АНАТОЛИЙ АНАТОЛЬЕВИЧ

**МЕТОДОЛОГИЯ РАЗРАБОТКИ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩЕЙ
СИСТЕМЫ АВИАТОПЛИВООБЕСПЕЧЕНИЯ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ В
УСЛОВИЯХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ИНТЕГРАЦИИ АЭРОПОРТОВОГО
КОМПЛЕКСА**

Специальность: 2.9.6 – Аэронавигация и эксплуатация
авиационной техники

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Москва – 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет гражданской авиации» (МГТУ ГА) на кафедре «Авиатопливообеспечения и ремонта летательных аппаратов».

Научный консультант Доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Авиатопливообеспечения и
ремонта летательных аппаратов» ФГБОУ ВО МГТУ ГА
Самойленко Василий Михайлович

Официальные оппоненты: Доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры технологии переработки нефти
ФГАОУ ВО «Российский государственный университет
нефти и газа (национальный исследовательский универ-
ситет) имени И.М. Губкина»
Ершов Михаил Александрович

Доктор технических наук,
ведущий научный сотрудник ФАУ «25 ГосНИИ
химмотологии Минобороны России»
Орешенков Александр Владимирович

Доктор технических наук, доцент,
ведущий научный сотрудник отдела «Двигатели и
химмотология» ФАУ «Центральный институт авиа-
ционного моторостроения им. П.И. Баранова»
Разносчиков Владимир Валентинович

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Сибирский федеральный университет» (ФГАОУ ВО
«Сибирский федеральный университет»)

Защита состоится «29» октября 2025 года в 15.00 на заседании Диссертационного совета 42.2.001.01, созданного на базе ФГБОУ ВО МГТУ ГА по адресу: 125993, Москва, Кронштадтский бульвар, д. 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО МГТУ ГА и на сайте ФГБОУ ВО МГТУ ГА www.mstuca.ru

Автореферат разослан " ____ " _____ 2025 г.

Отзывы на автореферат направлять в двух экземплярах, заверенных печатью организации, на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Ученый секретарь
Диссертационного совета 42.2.001.01
доктор технических наук, профессор

В.М. Самойленко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Авиатопливообеспечение (АТО) гражданской авиации (ГА) является одним из видов наземного обслуживания воздушных судов (ВС) ГА путем предоставления услуги по заправке ВС ГА кондиционным авиатопливом и спецжидкостями при обеспечении безопасности и регулярности полетов. Основу международного и национального регулирования авиатопливообеспечения (АТО) ГА составляют Федеральные авиационные правила (ФАП), а также рекомендации ИАТА и ИКАО и другие нормативные и руководящие документы.

Технологическая интенсификация производственной деятельности аэропортового комплекса направлена на повышение регулярности и пунктуальности полетов воздушных судов (ВС), которые являются приоритетной и важнейшей задачей ГА. Аналогичные требования налагаются и на топливозаправочный комплекс (ТЗК), в задачи которого, входит своевременная и безопасная заправка ВС кондиционным авиатопливом. Кондиционность авиатоплива регламентирована нормативно-технической документацией (НТД).

Применяемые в настоящее время в России и за рубежом методы подготовки авиатоплива к применению на ВС в основном обеспечивают безопасность полетов (БП), но не исключают инциденты и авиационные происшествия из-за некачественной подготовки авиатоплива. Это является результатом:

- несовершенства измерительных и расчетных (лабораторных и экспресс) методов оценки качества очистки (кондиционности), оценки пригодности к применению авиатоплива в процессе его подготовки к применению на ВС;
- отсутствия динамических методов контроля уровня чистоты авиатоплива в потоке;
- недостаточности теоретических исследований закономерностей физических процессов отстаивания (седиментации), фильтрации и водоотделения дисперсной системы «авиатопливо - механические примеси»;
- недостаточности теоретических исследований о закономерностях процессов обводнения авиатоплива, динамических переходах растворенной в авиатопливе воды;
- отсутствия теоретических критериев необходимой и достаточной концентрации содержания присадок противоводокристаллизационной жидкости (ПВКЖ) в авиатопливе, а также закономерностей живучести этих присадок от времени хранения и условий эксплуатации, а также несовершенства технологий и оборудования их введения в авиатопливо.

Известно, что существенная часть отказов оборудования ВС приходится на элементы топливных систем (ТС), что обусловлено сложными условиями их работы. Надёжность и долговечность агрегатов ТС находится в непосредственной зависимости от уровня чистоты авиатоплива - содержания механических примесей и свободной (нерастворенной) воды.

В настоящее время в технологических процессах ТЗК для контроля качества авиатоплива АТ используется метод отобранных проб, для которого характерен ряд существенных недостатков. Современные методы измерения уровня чистоты, подразделяющееся на лабораторные и экспрессметоды, являются статическими и дискретными, и не в полной мере обеспечивают достоверность и точность определения уровня чистоты ввиду возможной неоднородности распределения частиц механических примесей по всему объему и потоку авиатоплива, не автоматизированы, и как следствие подвержены негативному влиянию человеческого фактора.

В условиях высокой технологической интенсификации аэропортового комплекса, возрастают требования к оперативному управлению технологическими процессами ТЗК, в том числе непосредственно к диспетчерскому управлению заправками ВС. Задачи сбора информации и анализа, планирования и оптимизации уже невозможны в «ручном режиме» управления. В этих условиях – существенно возрастает роль интеграционного взаимодействия ТЗК-АЭРОПОРТ. Используемые в настоящее время в отечественные и международные, системы диспетчеризации наземного обслуживания ВС обеспечивают регулярность полетов, при этом не исключают инциденты из-за недостаточной интеграции технологических процессов ТЗК, не учитывающих особенности техпроцессов ТЗК, логистики движения авиатоплива от нефтезавода до крыла ВС, коммерческого учета, подготовки авиатоплива в том числе мониторинга чистоты авиатоплива от механических примесей и воды.

Рациональное решение проблемы качества подготовки авиатоплива к заправке ВС с учетом вышеизложенных требований обеспечения регулярности и безопасности выполнения полетов ВС

возможно, если обеспечить переход от статических методов контроля качества (дифференцированного и дискретного отбора проб и лабораторного анализа), к динамическим (онлайн) методам мониторинга кондиционности всего потока и объема авиатоплива в процессе подготовки авиатоплива к применению на ВС, основанному на использовании датчиков, сенсоров и измерителей физических параметров и показателей качества авиатоплива в потоке его движения, и применения информационных технологий сегодняшнего дня при достижении интеграционного взаимодействия системы ТЗК-АЭРОПОРТ.

Таким образом, разработка научно обоснованных технических и технологических решений создания информационно-управляющей системы авиатопливообеспечения ВС, позволяющая обеспечить непрерывный мониторинг контроля качества авиатоплива на всех этапах жизненного цикла движения авиатоплива, в условиях технологической интеграции аэропортового комплекса, имеет большое практическое значение для отрасли авиатопливообеспечения ВС и является актуальной задачей.

Степень разработанности темы исследования. Большой вклад в разработку и внедрение оборудования и систем авиатопливообеспечения ВС, а также вклад в деятельность по предупреждению авиационных инцидентов внесли ЦИАМ им. П.И. Баранова, НИЦ ЭРАТ, ФАУ «25 ГНИИ Химмотологии МО РФ», МАТИРГТУ им. К.Э. Циолковского, МАИ им. Серго Орджоникидзе, ОАО «ВНИИ НП», ФГБУ ВПО МГТУ ГА, ФГБУ ВПО СПбГУ ГА, ЕАТК им. В.П. Чкалова, НАУ, ФГУП ГосНИИ ГА. Исследования ученых этих организаций направлены на изучение факторов влияния на качество подготовки авиатоплива к заправке ВС, на совершенствование системы качества подготовки авиатоплива.

Однако в проведенных исследованиях и публикациях уделено недостаточное внимание совершенствованию и разработке теоретического и методического аппарата, обеспечивающего качественную подготовку авиатоплива к заправке ВС с учетом современных условий эксплуатации. Поэтому проблема обеспечения высокого уровня безопасности полетов на основе качественной подготовки авиатоплива к применению на ВС до настоящего времени не имеет законченного решения.

Проектированием и разработкой автоматизированных систем контроля качества авиатоплива, в том числе экспрессметодов измерения показателей чистоты авиатоплива, занимаются отечественные предприятия по производству технологического оборудования авиатопливообеспечения, ЗАО "НПО "Авиатехнология", ООО "НПО АГРЕГАТ", ООО «НПП «ПРОМПРИБОР», ООО «ЭЛИОН» и зарубежные предприятия: "Mess-und Fordertechnik Gwinner GmbH & Co", Германия, FAUDI Aviation GmbH, Parker Hanni n Corporation Aerospace, Filtration Division, PECOFacet (US), Inc и многие другие. Несмотря на многочисленные достижения и успехи в области автоматизации технологических процессов, и методов измерения параметров и показателей уровня качества авиатоплива, проблема непрерывного мониторинга чистоты авиатоплива в потоке авиатоплива остается в целом открытой. Это объясняется сложностью измерений гравиметрических и гранулометрических характеристик механических примесей в авиатопливе.

Таким образом, тема диссертации, связанная с разработкой методологии автоматизированного контроля уровня чистоты авиатоплива от механических примесей и свободной воды, разработкой системы дозирования ПВКЖ, а также разработкой единой интеграционной платформы ТЗК-АЭРОПОРТ является весьма актуальной.

Объект исследования Объектом исследования - является современная система авиатопливообеспечения ВС ГА, технология и оборудование ТЗК в аэропортах ГА.

Предмет исследований -

– методы и способы контроля(мониторинга) чистоты авиатоплива от механических примесей и воды в технологических процессах авиатопливообеспечения ВС ГА.

- счетно-дозировочные системы и оборудование пропорционального введения присадок ПВКЖ в авиатопливо.

- процессы интеграционного взаимодействия, топливозаправочного и аэропортового комплексов, в рамках диспетчерского управления ресурсами авиатопливообеспечения и системы совместного принятия решений.

Целью диссертационной работы являются научно обоснованные технические и технологические решения актуальных проблем создания информационно-управляющей системы

авиатопливообеспечения воздушных судов, позволяющей обеспечить непрерывный мониторинг контроля качества авиатоплива на всех этапах технологии подготовки авиатоплива, в условиях коллаборативного взаимодействия информационно-управляющих систем топливозаправочного и аэропортового комплекса, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие гражданской авиации России.

Для достижения цели исследования в работе были поставлены (и решены) задачи по разработке научно обоснованных технических и технологических решений:

- анализа статических данных об инцидентах, авариях и катастрофах с ВС коммерческой ГА РФ, связанных с недостаточным уровнем промышленной чистоты авиатоплива, а также применяемых методах контроля чистоты авиатоплива от механических примесей и дозирования ПВКЖ;
- разработать математическую модель определения содержания механических примесей и нерастворенной (свободной) воды в потоке авиатоплива за счет определения критической (резонансной) частоты комплексной диэлектрической проницаемости (КДП) фильтроэлемента (пористой перегородки);
- разработка теоретических основ нового принципа динамических измерений концентрации механических примесей и воды в авиатопливе
- разработка метода и устройства динамического измерения гравиметрических показателей уровня чистоты авиатоплива на основе измерения диэлектрической проницаемости твердых и жидких диэлектриков дисперсионной среды авиатоплива
- разработка метода и устройства динамических измерений гранулометрических показателей чистоты авиатоплива на основе каскадной фильтрации и диэлектрической проницаемости
- разработка метода и устройства динамических измерений уровня содержания свободной (нерастворенной) воды в авиатопливе:
- разработка теоретических основ новой автоматизированной адаптивной системы вариативного дозирования ПВКЖ в авиатопливо, на основе динамического мониторинга фактического процентного содержания, введенного ПВКЖ в авиатопливо, в интеграции с известными расходомерами – счетчиками авиатоплива в том числе с массовыми расходомерами, кориолисовыми массомерами;
- расчет узлов и выбор элементов нового дозатора ПВКЖ;
- разработка теоретических основ построения единой информационно - управляющей системы технологических процессов топливозаправочной деятельности аэропортового комплекса;
- разработка автоматизированных информационно-управляющих систем авиатопливообеспечения ВС.

Методология и методы диссертационного исследования. Методологические аспекты данного исследования составляют фундаментальные, научные работы зарубежных и российских ученых в области авиатопливообеспечения ВС. В ходе исследования изучена система нормативного регулирования, различные теории и методики, зарубежный и отечественный опыт, а также обобщены и систематизированы данные научно-практических конференций, периодических изданий в области проблемы динамического мониторинга кондиционности авиатоплива и дозирования ПВКЖ.

В процессе выполнения работы использовались методы авиационной химмотологии, методы дисперсионного анализа, методы седиментометрического анализа, методы натурного и модельного количественного физического эксперимента, методы натурного качественного химического эксперимента, методы математического аналитического моделирования, методы математической статистики, методы имитационного моделирования, общенаучные методы познания. Проведена верификации экспериментом разработанных в работе реальных конструкций устройств, а также в условиях эксплуатации. Такой подход одновременно обеспечивает и многочисленные «ноу-хау», что наряду с патентной чистотой защитит отечественных производителей на рынке. Принципиальным отличием разработанных в диссертации методов контроля кондиционности авиатоплива и дозирования ПВКЖ от известных является проведение контроля чистоты авиатоплива в динамических условиях, т.е. непрерывно в потоке, предоставляя мгновенные данные измерения его параметров для принятия решения о кондиционности и пригодности авиатоплива к заправке ВС.

Научная новизна работы.

1. Установлено, что применяемые методы контроля уровня чистоты авиатоплива - методы определения содержания механических примесей и нерастворенной (свободной) воды в авиатопливе являются статическими и косвенными, и основаны на дифференцированном отборе проб из назначенных точек, точность и достоверность которых может быть недостаточной. Существующие методы оценки чистоты авиатоплива не автоматизированы, а их продолжительность, в условиях повышения интенсивности производственной деятельности аэропортового комплекса, является препятствием для коллаборативного, интеграционного взаимодействия систем наземного обслуживания ВС, (аэропорт, ТЗК, лаборатория, поставщики), что требует разработки и создания информационно-управляющей системы динамического мониторинга кондиционности заправляемого авиатоплива.

2. На основе дебаевских уравнений и формул Клаузиуса — Москотти, разработана математическая модель определения содержания механических примесей и нерастворенной (свободной) воды в потоке авиатоплива за счет определения критической (резонансной) частоты комплексной диэлектрической проницаемости (КДП) на фильтроэлементе (пористой перегородки), показавшая 97,5% сходимости при экспериментальном исследовании (проверке) метода определения концентрации механических примесей и уровня влагосодержания в потоке авиатоплива.

3. Установлены зависимости комплексной диэлектрической проницаемости авиатоплива от частоты электромагнитных колебаний и проводимости авиатоплива при различных значениях критической (резонансной) частоты, что позволяет реализовать динамическое измерение веса механических примесей в потоке авиатоплива, а также получена зависимость диэлектрической проницаемости водной эмульсии в авиатопливе от ее концентрации, позволяющая количественно оценить содержание свободной воды в авиатопливе.

4. Установлено, что диэлектрическая проницаемость авиатоплива зависит от концентрации молекул диэлектрика и поляризуемости каждой молекулы, а также от природы диэлектрика, температуры и от частоты приложенного напряжения, а максимум диэлектрической проницаемости достигается в интервале $2 \dots 20 \text{ г/м}^3$.

5. Впервые разработано научно-техническое решение построения адаптивных ИИУС динамического мониторинга чистоты авиатоплива от механических примесей и воды, которые в отличие от существующих методов контроля качества авиатоплива, обеспечивают автоматизированный непрерывный контроль кондиционности авиатоплива в динамических условиях технологического процесса ТЗК, позволят исключить заправки ВС некондиционным авиатопливом.

6. Впервые разработано новое научно-техническое решение счетно-дозировующей системы введения присадки ПВКЖ, которая в отличие от существующих в режиме реального времени обеспечивает автоматизированный непрерывный контроль фактического процентного содержания присадки ПВКЖ в авиатопливо в процессе заправки ВС, позволяет исключить процедуры ежесменной проверки работоспособности дозатора, универсально совместима с любым расходомером авиатоплива, в том числе с массовым расходомером, кориолисовым массомером, обеспечивает вариативное регулирования процентного содержания ПВКЖ в авиатопливе и дозирования как по массе так и по объему, повышает точность коммерческого учета ГСМ и обеспечивающая импортозамещение оборудования ТЗК.

7. Разработана адаптивная информационно-управляющая система авиатопливообеспечения ВС на основе системной интеграции и коллаборативного взаимодействия топливозаправочного и аэропортового комплексов, позволяющая осуществить реализацию прогностического подхода к управлению безопасностью полетов и способствующая непрерывному ее повышению.

Теоретическая и практическая значимость работы.

1. Впервые проведен расчёт параметров измерительных схем и размеры устройств измерителей — диэлькометрических фильтров мониторов, а также разработан гидравлический стенд для исследований их характеристик.

2. Впервые разработано устройство динамических измерений гранулометрических и гравиметрических показателей (параметров) механических примесей в авиатопливе с точностью до 0,5%, а также устройство динамического измерения количества нерастворенной (эмульсионной) воды в потоке авиатоплива на основе измерения комплексной диэлектрической проницаемости

механических примесей и воды, что позволяет принимать адаптивные решения по выбору технологических режимов подготовки авиатоплива и его применения на ВС.

3. Разработан метод динамического измерения механических примесей и воды в авиатопливе, что позволяет контролировать чистоту авиатоплива непрерывно в потоке, предоставляя мгновенные данные о его кондиционности для принятия решения о пригодности авиатоплива к заправке ВС, и характеризующийся относительной погрешностью определения содержания механических примесей не более 4,6 %.

4. Разработан прототип дозатора, на который получен патент РФ № 223152 и экспериментально подтверждены возможности создания системы дозирования ПВКЖ в авиатопливе, показавший высокую сходимость с показателями НТД, а именно при режимах дозирования: $0,1 \pm 0,05\%$; $0,2 \pm 0,02\%$ и $0,3 \pm 0,03\%$.

5. Разработан опытный образец универсального дозатора ПВК-жидкости, позволяющий:

- обеспечивать высокую точность введения присадки ПВКЖ, за счет применения энкодера (датчика угла поворота), механически связанного с сервошаговым двигателем;
- обеспечивать дозирование как в объемных пропорциях, так и в пропорциях массовых единиц,
- обеспечивать интеграцию в систему как с объемными счетчиками, так и с массовыми расходомерами любых конструкций и исполнений (с индивидуальной калибровкой);
- обеспечивать вариативный выбор дозы присадки ПВКЖ (0,1; 0,2 и 0,3%), а также любой другой концентрации;
- проводить точную подстройку (компенсацию) за счет обратной связи с плотномером и детектором процентного содержания ПВКЖ, что позволяет решить существующую на сегодня техническую проблему с ежесменными проверками работоспособности дозатора.

6. Разработана методология построения платформы интеграционного взаимодействия ИУС аэропортового комплекса, ИУС ТЗК, ОУДН СУЗВС, ССПД, которая в отличие от существующих разноплатформенных систем, обеспечивает сквозной контроль и управление заправками ВС и позволяет синхронизировать процессы планирования транспортной логистики топливозаправочной деятельности на аэродроме, с процессами оперативного управления движения авиатоплива в ТЗК с учетом данных мониторинга кондиционности, позволяющая реализацию прогностического подхода к управлению безопасностью и регулярностью полетов, а также экономическую эффективность ТЗК и аэропортового комплекса.

На защиту выносятся:

1. Результаты анализа существующего состояния технологических процессов авиатопливообеспечения ВС.
2. Математическая модель диэлькометрических измерений плотности гетерогенной дисперсионной среды авиатопливо-мехпримеси и воднотопливной эмульсии.
3. Устройство для измерения комплексной диэлектрической проницаемости механических примесей и воды.
4. Метод динамических измерений гравиметрических и гранулометрических параметров механических примесей и содержания эмульсионной (нерастворенной) воды.
5. Автоматизированная адаптивная система вариативного дозирования жидкой присадки в поток авиатоплива при заправке ВС.
6. Концепция информационно-управляющей системы непрерывного мониторинга кондиционности авиатоплива в процессе его подготовки к заправке ВС.
7. Методология построения платформы интеграционного взаимодействия ТЗК и АК.

Достоверность и обоснованность. Результаты исследования получены при проведении лабораторных и натурных испытаний с использованием современных методов и методик, на аттестованном оборудовании, а полученные результаты согласуются с результатами других авторов. Достоверность и обоснованность работы подтверждаются результатами опытно-конструкторских разработок, опытом практического внедрения результатов диссертации, а также прошли государственную экспертную проверку при получении патентов на устройство и способ определения количества воды в авиатопливе.

Теоретические положения работы базируются на известных достижениях в области химмотологии, использованием исходных данных, полученных из практики и корректным

применением статистических методов обработки полученных экспериментальных данных, теории вероятностей, а также использованием современного математического аппарата.

Апробация работы и публикации. По материалам работы опубликованы 29 научных работ (255 с), 10 (106 с) в изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России (по транспорту), получено 7 патентов на изобретения, 4 (8с.) работы в трудах международных и всероссийских конференций и 8 (32 с) работ в прочих изданиях.

Личный вклад автора. Автор научно обосновал и разработал устройство для динамических измерений гранулометрических и гравиметрических показателей содержания механических примесей в потоке авиатоплива, устройство для динамического измерения массы свободной (не растворенной) воды в потоке авиатоплива, и с их использованием разработал метод (способ) непрерывного мониторинга определения содержания механических примесей и свободной воды в потоке авиатоплива, от приема авиатоплива из различных видов транспорта до баков ВС, и разработал методики всех экспериментальных исследований и непосредственно участвовал в их проведении в процессе всего цикла исследований, спланировал и организовал сбор экспериментальной информации по влиянию свободной воды и механических примесей в авиатопливе на БП ВС, на основе дебаевских уравнений, разработал математическую модель зависимости КДП от количества и состава (природы) механических примесей, разработал импортозамещённый дозатор ПВКЖ на основе сервошагового привода и ПЛК, с возможностью интеграции как с объемными счетчиками, так и с массовыми расходомерами и позволяющий осуществлять дозирование как в массовых, так и объемных единицах процентного содержания. Разработал концептуальный облик ИУС качества ТЗК и методологию интеграции ее в аэропортовый комплекс, что позволит оптимизировать операционную деятельность наземного обслуживания ВС, способствовать повышению безопасности и регулярности полетов в условиях технологической интенсификации аэропортовой деятельности.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, перечня сокращений и приложения. Общий объем работы составляет 301 страницу текста и 150 страниц приложения. Диссертация содержит 27 таблиц, 246 рисунков, список используемых источников из 216 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность исследуемой научной проблемы, рассмотрена степень её разработанности, определены объект, предмет исследования и соответствие её направления паспорту специальности, сформулированы цель и главные задачи исследования, научная новизна, практическая значимость полученных результатов, сформулированы положения, выносимые на защиту и изложено краткое содержание диссертации.

Глава 1 посвящена исследованию Актуальных проблем обеспечения качества авиатопливообеспечения ВС в условиях технологической интенсификации ТЗК, в которой автором проведен анализ основных требований НТД по обеспечению чистоты авиатоплива, пригодного к применению в ВС. Качество авиатоплива является одним из ключевых факторов обеспечения безопасности полетов и, в соответствии с действующим законодательством, подлежит многоступенчатому контролю. Требования к качеству авиатоплива на территории РФ, в рамках Евразийского экономического союза (ЕАЭС) устанавливаются различными стандартами, в зависимости от марки ТС-1, РТ, ДЖЕТ А-1.

Анализ и сравнение отечественной и зарубежной НТД показывает различный подход требований к чистоте авиатоплива заправляемого в ВС. Согласно требованиям ГОСТ 10577, массовая доля загрязнений авиатоплив и гидрожидкостей перед заправкой ВС, не должна превышать 2 г/т (0,0002 % массы), что соответствует 6...7 классам чистоты по ГОСТ 17216 при анализе гранулометрического состава загрязнений.

Международная ассоциация авиационного транспорта рекомендует в качестве норм предельно допустимой концентрации механических примесей и воды в авиационных топливах 0,00012% и 0,003% от массы топлива т.е. 1,2 г/т и 30 г/т соответственно. Из анализа НТД видно, что с целью обеспечения полетов ВС в заданных условиях эксплуатации и безопасности полетов требования к качеству авиатоплива строго регламентируются. Особенно эти требования

предъявляются к содержанию в авиатопливе механических примесей и наличия воды и, согласно НТД, имеют нормативные показатели.

Таким образом, в процессе обеспечения полетов ВС авиаГСМ в условиях роста интенсивности топливозаправочной деятельности обеспечение соответствия требуемых НТД показателей качества авиатоплива достигается путем применения средств непрерывного мониторинга его кондиционности.

Лабораторный контроль качества осуществляет лаборатория авиаГСМ с целью выявления изменений значений показателей качества авиационных ГСМ и спецжидкостей в процессе их поставки, подготовки, а также с целью оценки пригодности авиаГСМ к заправке ВС. Для оценки авиаГСМ используют представительные пробы, отобранные на различных этапах авиатопливообеспечения, а именно из средств транспортировки (трубопроводы, железнодорожные цистерны, танкеры); резервуаров и емкостей хранения авиаГСМ; средств заправки, фильтрации, водоотделения авиаГСМ. Отбор проб авиатоплива выполняется по всему пути его движения, начиная с площадки приема от поставщика и заканчивая топливными баками ВС. Точки отбора проб приурочены к зонам наиболее вероятного скопления механических примесей и свободной воды (нижние точки трубопроводов и цистерн автотопливозаправщиков, отстойники фильтров и т.п.).

Визуальный и аэродромный контроль являются «полевым» контролем качества, подтверждающим приемлемое качество топлива. Производятся в случаях, когда требуется оперативный контроль качества на всех этапах авиатопливообеспечения, а также для целей аэродромного контроля качества, выполняемого перед заправкой ВС, в том числе по требованию членов экипажа.

Гравиметрический (весовой) анализ - определение массы содержания механических примесей (ГОСТ 10577) гармонизирован с зарубежным методом ASTM 2276 и является приближенным аналогом ГОСТ 10577). Содержание механических примесей вычисляют с точностью до 0,0001%. Настоящий метод испытания обеспечивает гравиметрическое (весовое) измерение загрязнений в виде частиц, присутствующих в образце авиационных топлив.

Гранулометрический метод определения уровня загрязненности. Хотя контроль по гранулометрическому составу загрязнений и более трудоемкий, но дает основания для интерпретации результатов, а также позволяет увеличить точность, стабильность и достоверность контроля.

Существенным недостатком применяемых методов контроля качества авиатоплива является их дискретность, т.е. точечный контроль, который, кроме того, зависит от правильности отбора пробы для анализа. Применяемое оборудование позволяет, как правило, проводить анализ по одному показателю, а исследования являются продолжительными по времени и трудоемкости, что оказывает влияние на обеспечение регулярности полетов ВС. Кроме этого, применяемые методы контроля имеют низкую степень автоматизации, это является препятствием для их интеграции в системы коллаборативного взаимодействия (аэропорт, ТЗК, лаборатория, поставщики).

Таким образом, очевидна необходимость разработки инновационных методов контроля качества авиатоплива в потоке, а также определение как весовых, так и размерных показателей загрязнения авиатоплива, что требует НТД.

Проблемы безопасности полетов ВС, связанные с качеством авиатоплива, в том числе, такие как отказы авиационной техники, на сегодняшний день являются мировой проблемой. Наибольшее количество авиакатастроф произошло в результате отказа силовых установок (более 50 %).

С целью оценки влияния качества авиатоплива на БП, автором работы выполнен анализ статистических данных об инцидентах, авариях и катастрофах с ВС коммерческой ГА РФ в период с 2010 по 2023 год, учтенных в базе данных Автоматизированной системы обеспечения «Безопасность полетов» (АСО БП) по коду «028 топливная система» (ГОСТ 18675). Всего проанализировано 213 событий (рисунок 1). Проведенный анализ показал, что обстоятельства, послужившие причинами отказов авиадвигателей, являются загрязнения авиатоплива механическими примесями, которые составляют 20,5%.

Приведенные статистические данные подтверждают, что одной из причин событий является недостаточный уровень промышленной чистоты авиатоплива. При этом число событий, обусловленных недостатками методов обеспечения качества очистки авиатоплива, составляет от 11,3 % до 36,6 % всех событий. ГосНИИ ГА рассматривает 90% авиационных событий,

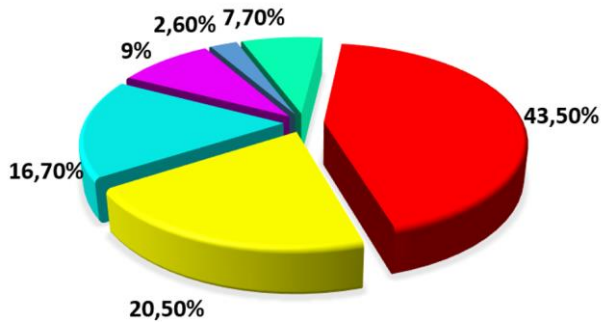


Рисунок 1 – Распределение причин инцидентов «028 топливная система» 43,5% – некондиционное авиатопливо; 20,5% – загрязнение мех. примесями; 16,7% – ненормативная концентрация ПВКЖ; 9,0% – обводнение; 7,7% – химические загрязнения; 2,6% – несоответствие ТУ

ПВКЖ "И-М" Добавление ПВКЖ в авиатопливо производится дозаторами (дозирующими системами) непосредственно в процессе заправки ВС, или в топливозаправщики при их наполнении на пункте налива. Процедуру проверки работоспособности системы дозирования, согласно рекомендациям ГосНИИ ГА, проводят не реже 1 раза в смену, путем прокачивания 500 литров авиатоплива что приводит к большим экономическим затратам.

Санкционные ограничения и прекращение поставок счетчиков авиатоплива с дозаторами ПВКЖ компанией Alfons HAAR (Германия), создали критическую ситуацию в отрасли авиатопливообеспечения ВС ГА.

Видно, что остро назрела необходимость разработки и внедрения отечественного дозирующего оборудования для ПВКЖ, отвечающего современным техническим требованиям и обеспечивающего прецизионное дозирование, безопасность эксплуатации и оптимизацию технологического процесса заправки авиационного топлива с добавлением ПВКЖ.

Глава 2 посвящена теоретическим основам совершенствования методов динамических измерений показателей качества авиатоплива, на основе измерения диэлектрической проницаемости твердых и жидких диэлектриков дисперсионной среды авиатоплива.

С точки зрения электрофизической теории электродинамические свойства материалов обладают удельной электрической проводимостью (σ), магнитной проницаемостью (μ), и диэлектрической проницаемостью (ϵ). В свою очередь, диэлектрическая проницаемость (ϵ) вещества и его удельная электрическая проводимость (δ) формируют так называемую комплексную абсолютную диэлектрическую проницаемость среды, которую можно выразить:

$$\epsilon_A = \epsilon_A - j \frac{4\pi\sigma}{\omega} = \epsilon_A + j\epsilon'_A, \quad (1)$$

где, ϵ_A - действительная часть диэлектрической проницаемости; Ф/м; j -плотность тока, А/м²; σ - удельная электропроводность, См; (Ом⁻¹) ; ω — частота переменного тока в цепи, МГц; (ГГц); ϵ'_A - мнимая часть диэлектрической проницаемости; Ф/м.

При изучении электродинамических свойств вещества в процессе их изменения целесообразно рассмотреть и другие факторы. Так, магнитная проницаемость вещества состоит из двух - мнимой и действительной проницаемостей, которую можно записать: $\dot{\mu} = \mu_1 + j\mu_2$,

Автор исследовал их взаимосвязь. Отношения абсолютных ϵ_A, μ_A и относительных ϵ, μ диэлектрической и магнитной проницаемостей, соответственно, можно выразить:

$$\epsilon_A = \epsilon_0 \epsilon, \mu_A = \mu_0 \mu, \quad (2)$$

где, $\epsilon_0 = 8.85416 \cdot 10^{-12}$ [Ф/м], $\mu_0 = 1.256637 \cdot 10$ [Гн/м].

Предлагаемый в работе диэлькометрический метод основан на изменении диэлектрической проницаемости авиатоплива при изменении его состава или концентрации механических примесей в нем. При загрязнении топлива будет происходить изменение электрической емкости конденсатора, а значит измеряя диэлектрическую проницаемость авиатоплива, получим

связанных с отказами. Примерно в половине случаев пробы указывают на неспособность топлив обеспечить летную годность ВС.

Статистические данные подтверждают наличие проблемы контроля чистоты авиатоплива и его влияния на БП, несмотря на принимаемые меры, проблема сохраняется. На сегодня актуальной остается задача совершенствования контроля качества авиатоплива.

Введение ПВКЖ в авиатопливо производится в процессе заправки ВС – в поток топлива в напорный трубопровод средства заправки – топливозаправщик (ТЗ) или диспенсер или пункт передперронного налива (ППН) для предупреждения образования кристаллов льда в топливе и забивки ими фильтрующих элементов ВС.

В настоящее время в качестве ПВКЖ применяется жидкость «И» и жидкость «И-М».

информацию о параметрах его загрязнения и диэлектрические потери G в конденсаторе можно выразить через тангенс угла потерь, и найти из следующего соотношения (отношения реактивного к активному сопротивлению конденсатора):

$$tg\delta = \frac{1}{\omega CR} = \frac{G}{\omega C}, \quad (3)$$

где, C – емкость конденсатора, Ф; ω – частота переменного тока в цепи, МГц; R – сопротивление диэлектрика, кОм.

Таким образом, автор установил пропорциональную зависимость между чистотой авиатоплива и тангенсом угла потерь $tg\delta$, а также предложил использовать эту зависимость как метод косвенного измерения концентрации и плотности механических примесей. Автором отмечено, что значения тангенса угла потерь $tg\delta$, более точно характеризуют физические свойства и, в частности, чистоту вещества, чем значения комплексной диэлектрической проницаемости (КДП). Электрическая емкость конденсатора и его проводимость зависят от его геометрических размеров, удельной электропроводности и диэлектрической проницаемости, при этом тангенс угла потерь в нем будет равен:

$$tg\delta = \frac{4\pi\sigma}{\omega\epsilon_A} = \frac{4\pi\sigma}{\omega\epsilon\epsilon_0}, \quad (4)$$

где ϵ_A – действительная часть диэлектрической проницаемости; Ф/м; ϵ – абсолютная диэлектрическая проницаемость; ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума, Ф/м; σ – удельная электропроводность, См; (Ом⁻¹); ω – частота переменного тока в цепи, МГц; (Гц).

Авиатопливо, содержащее в своем составе углеводороды, парафины и т.д. относится к неполярному диэлектрику, у которого под действием внешнего электрического поля возникает деформационная поляризация P_{EA} . Воздействие внешнего электрического поля на молекулы вещества диэлектрика, вызывает в нем несколько составляющих деформационной поляризации, представляющих собой: электронную поляризацию P_E , характеризующуюся смещением электронного облака относительно ядра атома, при котором ядра атомов в молекуле не изменяют своего взаимного положения; атомную поляризацию P_A , характеризующуюся смещением атомов в молекуле (ионная поляризация); и ориентационную поляризацию P_0 , когда воздействие внешнего электрического поля вызывает пространственное упорядочивание расположения диполей. С точки зрения применения диэлектрической проницаемости авиатоплива в предлагаемом диэлькометрическом методе контроля чистоты авиатоплива целесообразно знать результирующую молекулярную поляризацию P . Для этого воспользуемся уравнением Дебая:

$$P = P_E + P_0 = \frac{M(\epsilon-1)}{\rho(\epsilon+2)} = \frac{4\pi\eta^2 N_A}{9kT} + \frac{4\pi\alpha N_A}{3}, \quad (5)$$

где: k – постоянная Больцмана; N_A – число Авогадро; ρ – плотность кг/м³; T – температура °К; M – масса 1 моля, г/моль; η^2 – дипольный момент; α – поляризуемость (электрический момент, который создает единичное поле).

Данное уравнение автор использовал в качестве математической модели для растворов полярных жидких диэлектриков (воды) в неполярных растворителях-керосинах (авиатопливо) а, также учитывая, что вода является полярным диэлектриком, применил в качестве математической модели ее диэлектрической проницаемости среды, формулу Онзагера. Ее физическая суть состоит в том, что внешнее электрическое поле, действующее на молекулу, во многом зависит от направления момента диполя, и она имеет вид:

$$\frac{(\epsilon-n^2)(2\epsilon+n^2)}{\epsilon(n^2+2)^2} = \frac{4\pi N_A \mu^2}{9kT}. \quad (6)$$

Модель Онзагера — это диполь с моментом μ , совпадающий с центром сферы радиуса молекулы r , находящийся в сплошной среде, имеющей статическую диэлектрическую проницаемость ϵ . При этом сам диполь находится одновременно под воздействием электрического поля полости сферы молекулы, и вместе с тем он же (диполь) поляризует окружающую его сплошную среду, и этим вызывает поле реакции, действующее в обратном направлении, создающее поляризующее действие на диполь. На величину диэлектрической проницаемости сплошной среды, влияет частота, в момент измерения. Эти явления зависимости величины диэлектрической проницаемости объясняются теорией, описывающей комплексную диэлектрическую проницаемость сплошной среды $\hat{\epsilon}$ и нашли отражение в формуле Дебая:

$$\hat{\epsilon} = \epsilon + j\epsilon', \quad (7)$$

где, ϵ' - мнимая часть (7), определяющая поглощение энергии в диэлектрике, находящемся в переменном электрическом поле; ϵ - действительная часть (относительная диэлектрическая проницаемость).

Тогда для определения тангенса угла потерь можно записать:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\epsilon'}{\epsilon}. \quad (8)$$

Было исследовано влияние частоты переменного электрического поля на действительную ϵ и мнимую ϵ' диэлектрические проницаемости (рисунок 2). Как видно из рисунка 2 до частоты 10^8 Гц действительная часть ϵ диэлектрической проницаемости практически не изменяется.

Проведем анализ полученных зависимостей (рисунок 2). Как видно при частоте переменного тока $\omega = 0$ диэлектрическая проницаемость ϵ имеет максимальное значение и называется квазистатическое $\epsilon(0)$ состояние. При увеличении частоты переменного тока, действительная часть ϵ сохраняется на значении $\epsilon(0)$, до области аномальной диэлектрической дисперсии, а потом медленно снижается, уменьшаясь до постоянной величины $\epsilon(\infty)$. Для анализа полученной зависимости воспользуемся уравнения Максвелла:

$$\epsilon(\infty) = n^2. \quad (9)$$

Из уравнения видно, что между постоянной величины $\epsilon(\infty)$ и показателем оптического преломления n существует зависимость, которая будет справедлива в случаях, если атомной поляризацией вещества диэлектрика можно пренебречь. Коэффициент оптического преломления определяется на длине волны, желтой линии спектра натрия ($\lambda = 0,586$ мкм). На предельных частотах диэлектрическая проницаемость, а также коэффициент оптического преломления можно выразить следующими выражениями:

$$\epsilon(\infty) \frac{\epsilon(\infty)-1}{\epsilon(0)+2} = A \frac{n^2-1}{n^2+2}, \quad (10)$$

где, коэффициент $A = 1,05 \dots 1,15$ применим для случаев с учетом влияния атомной поляризации диэлектрика. Из рисунка 2 видно, что при низких частотах отставание ориентации диполей, относительно осцилляций поля, можно оценить аномальной дисперсией диэлектрической проницаемости, которая в свою очередь оценивается временем релаксации τ :

$$\tau = \frac{4\pi\eta\alpha^3}{kT}, \quad (11)$$

где, η - вязкость жидкого диэлектрика, $\text{см}^2/\text{с}$; α - радиус молекул, пм; T - абсолютная температура, K .

Таким образом, на основании вышеизложенного и автором предложено использовать математическую модель на основе уравнения Дебая, для определения гранулометрических и гравиметрических (весовых) параметров механических примесей и влагосодержания в потоке авиатоплива.

Для этого автором предложено проводить измерение комплексной диэлектрической проницаемости, которая является суммой:

$$\epsilon = \epsilon - j\epsilon' = \epsilon(\infty) + \frac{\epsilon(0)-\epsilon(\infty)}{1+j\omega\tau}, \quad (12),$$

где, $\epsilon(\infty)$ - диэлектрическая проницаемость, при высокой (оптической) частоте измерения.

После преобразований формулы (12) получена зависимость проводимости от частоты на всем диапазоне частот:

$$\sigma(\omega) = \sigma(0) \frac{\omega_0^2}{\omega_0^2 + \omega^2} + \frac{\omega_0^3 \omega^2 \epsilon_0 [\epsilon(0) - \epsilon(\infty)]}{4\pi(\omega_0^2 + \omega^2)^2}. \quad (13)$$

Зависимость проводимости авиатоплива от частоты электрического поля при различных начальных значениях проводимости представлен графиком на рисунке 3. При вычислениях

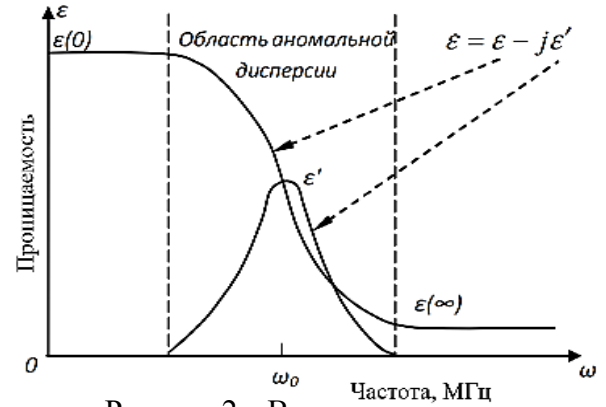


Рисунок 2 – Влияние частоты переменного электрического поля на действительную ϵ и мнимую ϵ' диэлектрические проницаемости

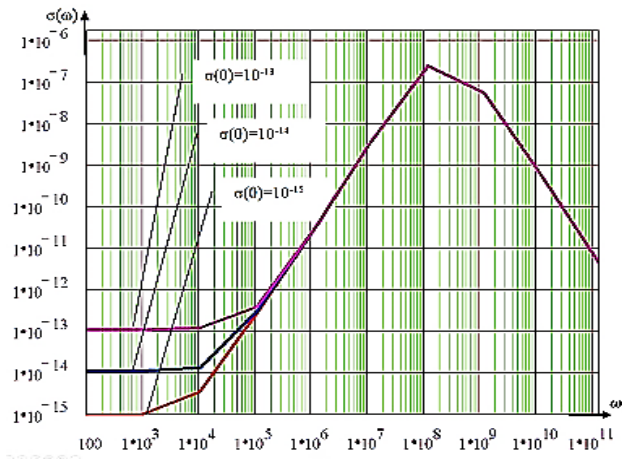


Рисунок 3 – Зависимость проводимости авиатоплива от частоты поля

диапазоне частот от 1 до 10 МГц.

После преобразований для $\varepsilon(\infty)$ подставим его в уравнение (13):

$$\varepsilon(\infty) = \frac{\varepsilon(\omega)(\omega^2 + \omega_0^2) - \omega_0^2 \varepsilon(0)}{\omega^2}, \quad (14)$$

$$\sigma(\omega) = \frac{\omega_0^2 \sigma(0)}{\omega^2 + \omega_0^2} + \frac{\omega_0^3 \varepsilon_0 [\varepsilon(0) - \varepsilon(\omega)]}{4\pi(\omega_0^2 + \omega^2)}, \quad (15)$$

Аналогично для $\varepsilon(0)$:

$$\varepsilon(0) = \frac{\varepsilon(\omega)(\omega_0^2 + \omega^2) - \omega^2 \varepsilon(\infty)}{\omega_0^2}, \quad (16)$$

$$\sigma(\omega) = \frac{\omega_0^2 \sigma(0)}{\omega^2 + \omega_0^2} + \frac{\omega_0 \omega^2 \varepsilon_0 [\varepsilon(\omega) - \varepsilon(\infty)]}{4\pi(\omega_0^2 + \omega^2)}. \quad (17)$$

В формулах (14) и (16) выражена взаимосвязь проводимости и диэлектрической проницаемости при разных значениях частоты внешнего электрического поля. Однако для частот $\omega \leq \omega_0$, использовать лучше формулу (14), а для частот $\omega \geq \omega_0$ точнее будет уравнение (16).

В тоже время зависимость тангенса угла потерь от частоты можно описать уравнением комплексной абсолютной диэлектрической проницаемости (1), представленной в виде:

$$\operatorname{tg} \delta(\omega) = \frac{\{4\pi(\omega^2 + \omega_0^2)\sigma(0) + \varepsilon_0 \omega_0 \omega^2 [\varepsilon(0) - n^2]\} \omega_0^2}{\varepsilon_0 \omega [\omega^2 n^2 + \omega_0^2 \varepsilon(0)] (\omega^2 + \omega_0^2)}. \quad (17)$$

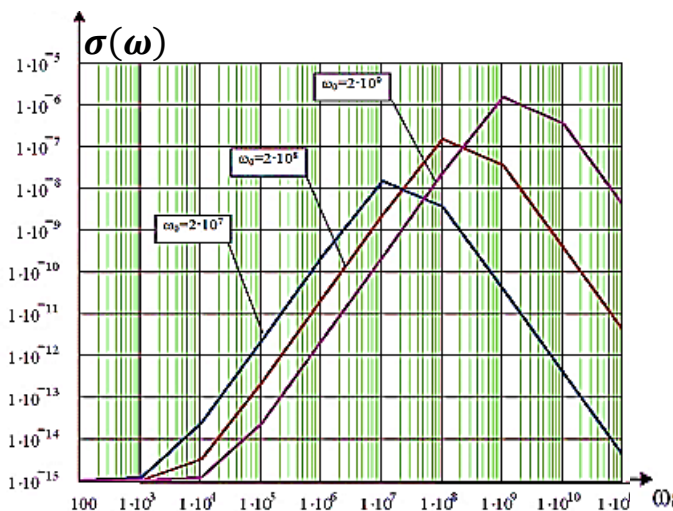


Рисунок 4 – Зависимость проводимости авиатоплива от частоты для значений критической частоты ω_0

использованы числовые значения для авиатоплива - эталонного компонента ТС-1: $\varepsilon(0) = 1,961$; $\varepsilon(\infty) = 1,958$; $\omega_0 = 0,204 \cdot 10^9$ 1/сек ($\tau = 4,9 \cdot 10^{-9}$ сек).

На графике видно, что максимум проводимости соответствует критической частоте ω_0 , и не зависит от величины начальной проводимости.

Как видно из зависимостей, представленных на рисунке 4, величина максимального значения проводимости вещества зависит от значения критической частоты электрического поля, а пик ее величины и график смещаются в зависимости от величины критической частоты. На графике наблюдается значительное увеличение проводимости в

На основании изложенного можно сделать вывод, что предлагаемый автором способ измерения гравиметрических показателей чистоты авиатоплива, от механических примесей и свободной воды, на основе измерений его комплексной диэлектрической проницаемости и тангенса диэлектрических потерь, дают широкие возможности создания сенсоров и датчиков для динамических и экспресс методов измерения параметров качества авиатоплива в потоке во время заправки ВС, а также непрерывного мониторинга качества авиатоплива на всех стадиях его подготовки к применению.

Принцип действия датчика, заключается в размещении фильтрующей пористой перегородки, между двумя электродами-обкладками классического конденсатора, измерения электрической емкости которого служат для

расчета комплексной диэлектрической проницаемости, известный также как метод трёх контактов (стандарт ASTM D15012) (рисунок 5).

Основные параметры метода параллельных пластин описываются уравнениями:

$$Y = G + j\omega C_p = j\omega C_0 \left(\frac{C_p}{C_0} - j \frac{G}{\omega C_0} \right), \quad (18)$$

где:

A – площадь пластин конденсатора, м²; t – расстояние между пластинами конденсатора, м; C_p – ёмкость с диэлектриком, Ф; C_0 – ёмкость (воздуха) без диэлектрика, Ф; G – электропроводность, См (Ом⁻¹); j – плотность тока, А/м²; ω – частота переменного тока в цепи, МГц; (ГГц)

При разработке метода автором предложена упрощенная модель дисперсной системы «механические примеси – жидкий неполярный диэлектрик», в которой величина массового (весового) содержания механических

примесей авиатоплива w является функцией диэлектрических проницаемостей загрязненного авиатоплива ε_2 и «чистого» авиатоплива ε_1 :

$$w = \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{3 \cdot \varepsilon_1}; \quad (19)$$

где ε_1 – диэлектрическая проницаемость «чистого» авиатоплива; ε_2 – диэлектрическая проницаемость загрязненного авиатоплива; ε – абсолютная диэлектрическая проницаемость;

В основе экспериментальной установки применялся резонансный метод измерения диэлектрической проницаемости ε_1 и ε_2 , пористой фильтрующей перегородки – так называемый, диэлькометрический фильтроэлемент емкостного типа.

Схема и принцип действия диэлектрического монитора механических примесей в потоке авиатоплива на рисунке 6. В процессе проведения эксперимента по измерению резонанса диэлькометрического фильтроэлемента, при частотах до 1,8 ГГц, были выявлены преимущества измерителя диэлектрической проницаемости авиатоплива, выполненного в виде диэлькометрического фильтроэлемента, по сравнению известными измерительными системами сверхвысокочастотного диапазона на основе четвертьволнового резонатора. В целях проверки теоретических предположений последующих теоретических исследований применения

диэлькометрического фильтроэлемента в методах резонансного измерения диэлектрической проницаемости авиатоплива, как неполярного диэлектрика методами математического анализа, были исследованы электрофизические процессы в происходящие в работе разработанного измерителя диэлектрической проницаемости, проведено имитационное моделирование в среде SOLIDWORKS Simulation и MicroCap.

С учетом полученных данных, разработана методология эксперимента, при которой уровень содержания механических примесей в авиатопливе определяется по

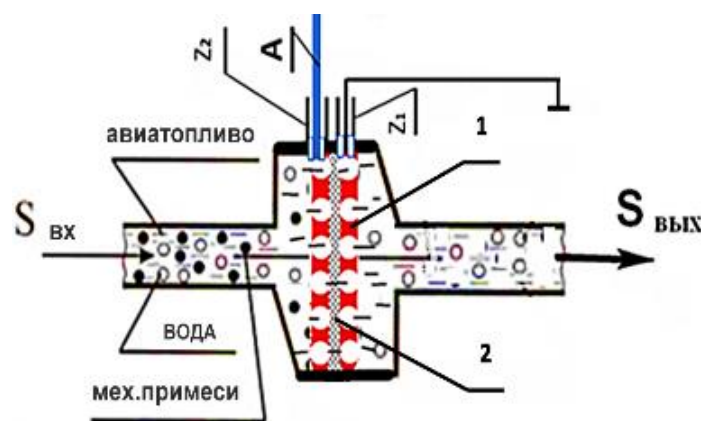


Рисунок 6 – Схема датчика диэлькометрического измерения плотности мех примесей

разнице диэлектрических проницаемостей чистого и загрязненного авиатоплива, путем последовательного измерения диэлектрических проницаемостей диэлькометрического фильтроэлемента, подключенного к измерительному генератору. С учетом частотной дисперсии диэлектрической проницаемости механических примесей в диэлькометрическом фильтроэлементе,

выбирается максимально возможная частота измерительного генератора. Блок-схема измерительного стенда представлена на рисунке 7.

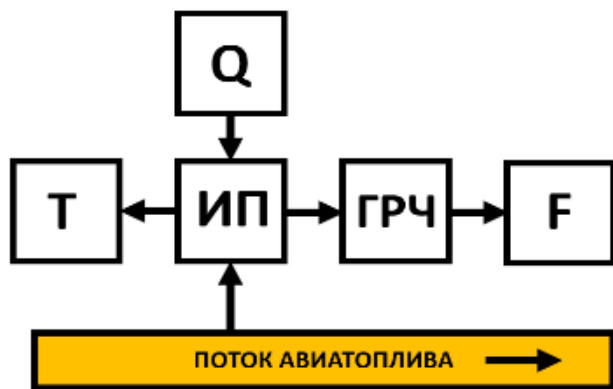


Рисунок 7– Блок-схема измерительного стенда

преобразователя показана на рисунке 9.

Из проведенного анализа существующей системы контроля чистоты авиатоплива было установлено, что она имеет ряд существенных недостатков. Наиболее существенными являются применение «ручных» методов контроля качества авиатоплива, основанных на точечном отборе пробы.

С целью исключения указанных недостатков, а также перехода контроля чистоты авиатоплива от дискретных методов к непрерывным, от статических к непрерывным, а также повышения достоверности о чистоте авиатоплива перед автором стояла задача разработки ИУС. В целях реализации предложенной концепции перехода на новую методологию управления качеством авиатопливообеспечения, автором предложено построение ИУС

Датчик механических примесей, дизелькометрический фильтроэлемент, подключен к генератору резонансных частот. Частота генерации генератора резонансной частоты измеряется частотомером F , а температура ДФ – датчиком температуры T . Расход прокачиваемого авиатоплива измеряется Кориолисовым массовым расходомером. Конструктивно стенд состоит из датчика - 1 с электронной платой первичного преобразователя - 2, измерительного оборудования - 7, - 8 и гидравлической части: - насоса плунжерного - 4, расходомера роликолопастного - 3. Структурная схема сенсора резонансного дизелькометрического



Рисунок 8 –Измерительный стенд

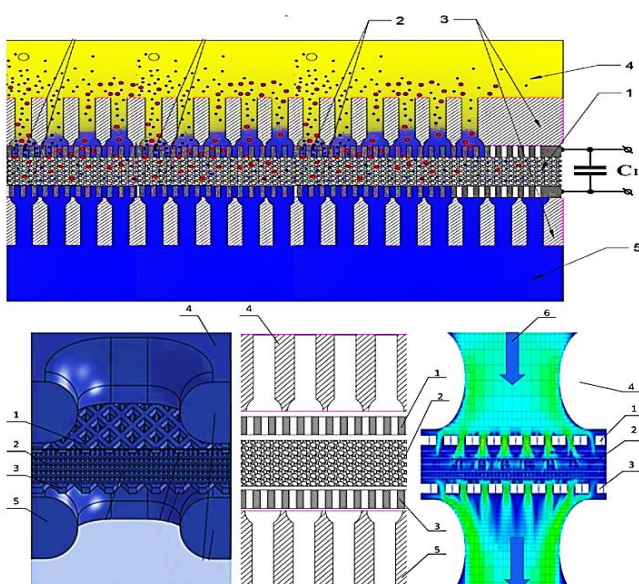


Рисунок 9 – Структурная схема сенсора-фильтропакета, измерителя комплексной диэлектрической проницаемости

на основе разработанных датчиков сенсоров (см. выше) и широко используемых в построении систем автоматизации SCADA – систем (от англ. supervisory control and data acquisition — диспетчерское управление и сбор данных).

На основе разработанных автором датчиков (сенсоров), устройств и методов динамической оценки уровня чистоты авиатоплива, а также разработанной (созданной) адаптивной ИИУС динамического мониторинга качества авиатоплива технологических процессов ТЗК, стало возможным автоматизировать технологические процессы контроля качества авиатоплива, которые до настоящего времени являлись не автоматизированными, требующими квалифицированного ручного труда авиатехников, операторов, и лаборантов, подверженного негативному влиянию человеческого фактора и тем самым сдерживающему производительность ТЗК и

технологическую интенсификацию аэропортового комплекса.

Глава 3 посвящена разработке методов непрерывного мониторинга кондиционности авиатоплива, в которой автор, основываясь на положениях результатов теоретических исследований разработал устройство динамического мониторинга кондиционности авиатоплива на основе измерения диэлектрической проницаемости дисперсионной среды авиационных керосинов. Устройство динамического мониторинга, далее «емкостной датчик», представляет собой

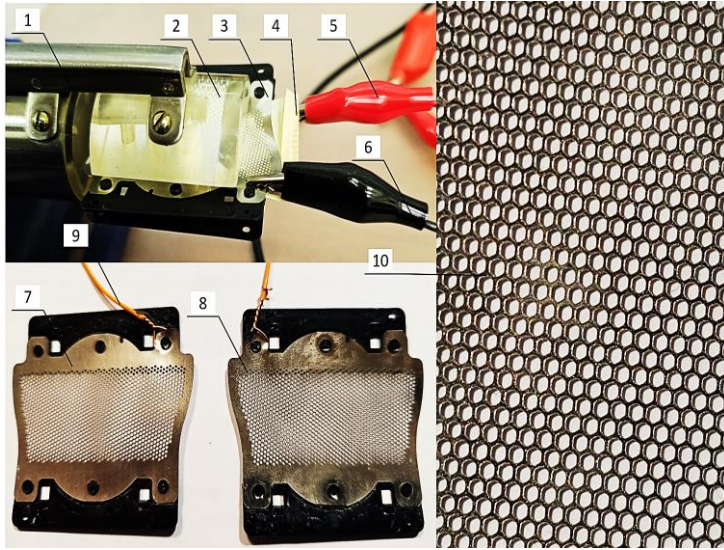


Рисунок 10 – Диэлькометрический фильтроэлемент

многослойный фильтропакет, состоящий из перфорированных пластин-электродов, являющихся обкладками конденсатора и фильтрующего слоя диэлектрика, расположенного между пластинами-электродами конденсатора. Схема датчика представлена на рисунке 9. При абсорбировании фильтропакетом влаги и забивкой его механическими примесями изменяется его диэлектрическая проницаемость. Это изменение прямо пропорционально относительной влажности обводнённого авиатоплива, количеству и плотности вещества механических примесей. Таким образом, измерив изменение емкости, можно определить количественное содержание

мехпримесей и нерастворенной воды (эмульсионной и мицеллярной) в авиатопливе. Контрольная ячейка представляет собой диэлькометрический фильтроэлемент (ДФ) для измерения импеданса (КДП) (рисунок 9). В качестве измерительной схемы для реализации метода может быть использована любая схема, обеспечивающая корректные кондуктометрические измерения.

Измерительная схема неравновесного четырехплечего моста с высокой фазовой чувствительностью, является наиболее эффективным решением для исследования диэлектрических свойств диэлькометрического фильтроэлемента. Опираясь на хорошо разработанную теорию мостовых методов измерения, применение указанной измерительной схемы значительно облегчает разработку ключевых теоретических принципов метода многопараметрического анализа концентрации веществ.

Сущность метода заключается в измерении величины разбаланса моста, являющейся функцией емкости датчика. С уменьшением измеряемой емкости частота питающего генератора должна быть увеличена. Напряжение генератора балансируют относительно земли. Высокую точность можно получить, если измеряемую емкость подключить параллельно конденсатору, уравновесить мост с его помощью, отсоединить измеряемую емкость и снова уравновесить мост. Разность показания конденсатора дает искомую емкость. Диэлектрическая проницаемость исследуемого авиатоплива равна

$$\varepsilon = (C_1 - C_2)/C_0, \quad (20)$$

где, C_1 - ёмкость заполненного продуктом датчика; C_2 - паразитная ёмкость; C_0 - ёмкость пустого датчика.

Электрохимический фазовый метод предоставляет решение для определения концентрации веществ. В отличие от методов, опирающихся на один параметр, например, электропроводность, этот метод использует несколько параметров, таких как диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь. Это позволяет значительно повысить точность, надежность и объективность оценки концентрации механических примесей и свободной воды в авиатопливе. Поскольку для измерения диэлектрической проницаемости авиатоплива с механическими примесями используется мостовая схема, то для ее анализа применима теория четырехполосников.

Основной целью такого анализа применительно к кондуктометрии является установление аналитических зависимостей, связывающих выходные характеристики схемы с искомыми параметрами вещества. Для получения искомых зависимостей изобразим мостовую измерительную схему графически (рисунок 11).

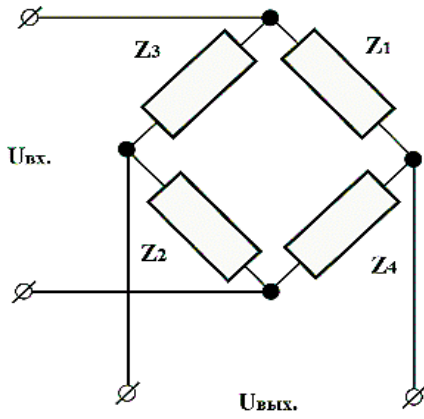


Рисунок 11 - Мостовая измерительная схема

В общем случае она состоит из четырех комплексных сопротивлений Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 . На ее вход подается напряжение питания $U_{вх}$, а с выхода снимается выходное напряжение $U_{вых}$.

Для того чтобы мостовая схема отвечала требованию высокой фазовой чувствительности, она должна быть составлена из одного сопротивления, имеющего комплексный характер, и трех чисто активных сопротивлений.

Условимся считать, что комплексному сопротивлению, содержащему активную и реактивную составляющие, будет отвечать верхнее левое плечо схемы, а три остальных плеча будут представлены активными сопротивлениями: $Z_1 = R_1, Z_2 = R_2, Z_3 = R_3, Z_4 = R_4$, причем примем также, что два смежных плеча представлены резисторами одного и того же номинала:

$$Z_1 = Z_4 \quad (21)$$

Как известно, в качестве таких электрических схем замещения вещества используются схемы, представленные параллельными или последовательными соединениями емкости и сопротивления. Для получения расчетных зависимостей воспользуемся известным из теории четырехполюсника уравнением, связывающим напряжения на входе и выходе мостовой схемы, которое, с учетом принятых допущений, имеет вид:

$$U_{вх} = A_{11} U_{вых}, \quad (22)$$

где, A_{11} - коэффициент общей матрицы мостовой схемы, определяемый выражением:

$$A_{11} = \frac{(Z_1 + Z_4) \cdot (Z_2 + Z_3)}{Z_3 Z_4 - Z_1 Z_2}. \quad (23)$$

В связи с тем, что в соответствии с ранее принятым условием два плеча моста образованы резисторами с одним и тем же номиналом, после подстановки (21) в (23) получим:

$$A_{11} = \frac{2(Z_2 + Z_3)}{Z_3 - Z_2}. \quad (24)$$

Примем, что комплексное сопротивление Z_3 диэлькометрического фильтроэлемента представлено параллельной электрической схемой замещения вещества. Для этого случая величина комплексного сопротивления диэлькометрического фильтроэлемента, выраженная через активную и реактивную составляющие, будет представлена следующим соотношением:

$$Z_3 = \frac{R}{1 + i\omega RC}, \quad (25)$$

где R - активное сопротивление диэлькометрического фильтроэлемента;

ω - частота напряжения питания моста;

C - электрическая емкость диэлькометрического фильтроэлемента.

После подстановки (25) в (24),

Рассмотрим случай, отвечающий состоянию наибольшего приближения к равновесию моста при уравнивании последнего по активной составляющей комплексного сопротивления и условию $R_2 = R$. Для этого случая передаточное число будет определяться выражением:

$$|A| = (A^2 + B^2)^{0,5} = 2 \left[1 + 4 \left(\frac{X_c}{R} \right)^2 \right]^{0,5}, \quad (26)$$

а фазовый сдвиг:

$$\varphi = \arctg 2X_c/R. \quad (27)$$

Полученные соотношения (26) и (27) и являются искомыми функциональными зависимостями выходных параметров мостовой измерительной схемы от электрофизических характеристик диэлькометрического фильтроэлемента, представленной параллельной схемой замещения. В дополнение к полученным результатам отметим следующие наблюдения, представляющее практический интерес.

С учетом этих зависимостей величина отношения

$$R/X_c = \rho \varepsilon_0 \varepsilon \omega = \frac{2m(\tg \varphi - m)}{\tg \varphi(m^2 + 1) + 2m}, \quad (28)$$

определяется только электрофизическими свойствами анализируемого вещества. Из этого следует, что разработанный фазовый метод анализа веществ может быть охарактеризован как

прямой метод измерения широко используемой в научных исследованиях и научно-технической практике электрофизической характеристики, называемой тангенсом угла диэлектрических потерь, который для параллельной электрической схемы замещения вещества представляется выражением:

$$tgb = \frac{1}{RC\omega} = 2 \frac{m(tg\varphi - m)}{(m^2 - 1)tg\varphi - 2m}, \quad (29)$$

где,

$$m = \frac{tg\varphi}{2K\sqrt{1+tg^2\varphi-1}}; \quad K = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}}.$$

Таким образом, возможность прямого измерения тангенса угла диэлектрических потерь фазовым методом, вытекающая из выражения (29), функционально связанного с выходными параметрами мостовой измерительной схемы, позволяет сделать следующий важный вывод: электрический фазовый метод может быть использован для оценки концентрации веществ одновременно по трем параметрам: электропроводности, диэлектрической проницаемости и тангенсу угла диэлектрических потерь, что позволит значительно повысить достоверность и объективность такой оценки.

Общий вид стенда для измерения концентрации механических примесей приведен на рисунке 12.

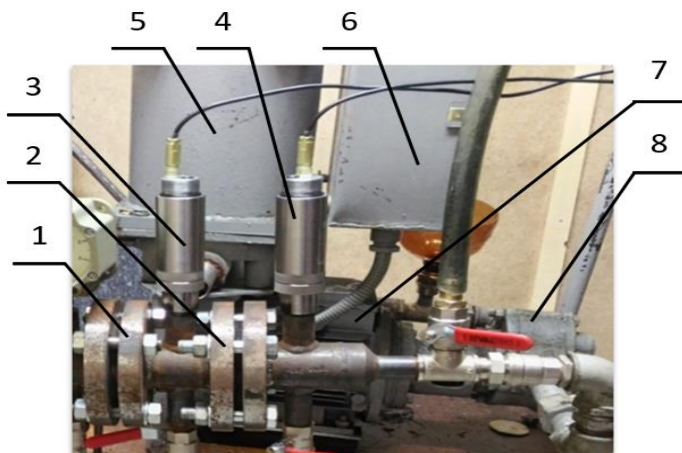


Рисунок 12 - Общий вид стенда: для измерения концентрации механических примесей 1 - 2 - диэлектрический датчик; 3 - 4 - преобразователь; 5, 6 - резервуар расходный; 7 - электродвигатель; 8 - насос

диэлектрического фильтроэлемента (ДФ) в виде АЧХ ИП приведены на рисунке 14. Полученные АЧХ были расшифрованы с целью определения величины нагруженной добротности Q измерительного преобразователя.

Как показывают результаты обработки с точностью до 5 % нагруженные величины добротности диэлектрический фильтроэлемент (ДФ) с воздухом (Q_1, F_1) и с авиатопливом (Q_2, F_2) практически совпадают, что свидетельствует о слабом влиянии авиатоплива на добротность диэлектрический фильтроэлемент (ДФ):

Для подтверждения правильности выбранных конструктивных и технических решений диэлектрический фильтроэлемент (ДФ) измерительного генератора (ИГ) был собран исследовательский стенд, гидравлическая схема, которого представлена на рисунке 13 и приведены результаты экспериментальных исследований в два этапа. На первом этапе с помощью измерителя амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) типа Х1 - 42 исследовались резонансные характеристики диэлектрический фильтроэлемент (ДФ), заполненного воздухом, и диэлектрический фильтроэлемент (ДФ), заполненного чистым авиакеросином.

Результаты исследований

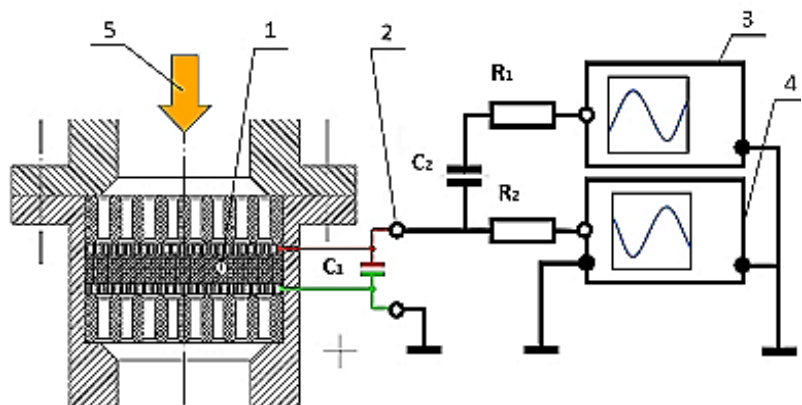


Рисунок 13 - Блок - схема измерений АЧХ диэлектрического фильтроэлемента

$$Q_1 = \frac{F_1}{2\Delta F_1} = \frac{160 \cdot 10^6}{2 \cdot 10^6} = 80;$$

$$Q_2 = \frac{F_2}{2\Delta F_2} = \frac{108 \cdot 10^6}{1,3 \cdot 10^6} = 83;$$

$$Q_1 \cong Q_2.$$

На втором этапе экспериментальных исследований были определены величины массового (весового) содержания мехпримесей приготовленных смесей «авиатопливо - мехпримеси» в диапазоне содержания (1 -10) г/тн.

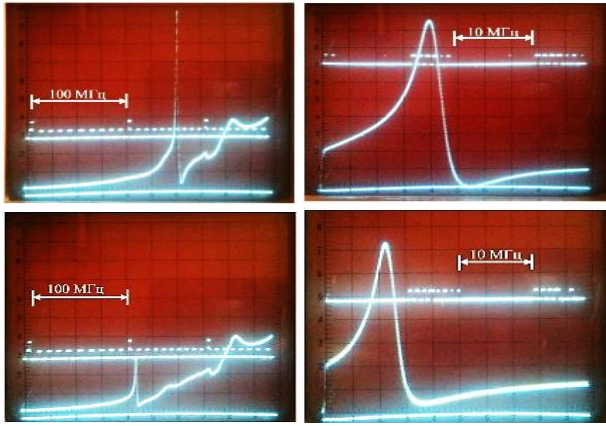


Рисунок 14 – Амплитудно-частотные характеристики дизькометрического фильтроэлемента (ДФ)

В процессе проведения экспериментов, в предварительно очищенный авиакеросин объемом $(500 \pm 0,6)$ см³ вводилось требуемое количество механических примесей. После этого приготавливалась однородная гомогенная суспензия с требуемым содержанием мех-примесей. После этого через измерительный преобразователь прокачивалась исследуемая жидкость с одновременным контролем температуры дизькометрический фильтроэлемент (ДФ), и частоты генерации ИГ.

В процессе проведения исследований температура ДФ и ИГ поддерживалась постоянной с точностью $\pm 0,03$ °С. При этом проводилось по 12 измерений частоты генерации ИГ, деленной на 80 для обезвоженного авиатоплива (F3) и

исследуемой смеси (F4), и обрабатывались по стандартной методике для прямых измерений. Для определения функциональной зависимости содержания мех-примесей W от частоты воспользуемся формулой определения содержания мех-примесей для измерителя содержания мех-примесей:

$$W = \frac{1}{3} \cdot \frac{\frac{1}{F_4^2} - \frac{1}{F_3^2}}{\frac{1}{F_3^2} - \frac{1}{F_1^2}}, \quad (30)$$

где, F_1 - частота резонанса при отключенном измерительном преобразователе дизькометрический фильтроэлемент (ДФ); F_3 - частота резонанса для дизькометрический фильтроэлемент (ДФ), заполненного очищенным авиатопливом; F_4 - частота резонанса при прокачанном через ДФ исследуемым загрязненным авиатопливом.

Конструкция предложенного измерителя содержания мехпримесей на основе дизькометрический фильтроэлемент (ДФ) такова, что она содержит конструкционно диэлектрический материал, а исследуемая жидкость находится в пространстве между этими электродами. Тогда измеритель влажности на основе дизькометрический фильтроэлемент (ДФ) имеет частоту $F_1 = \infty$, а $1/F_1 = 0$ и выражение (2) преобразуется к виду:

$$W = \frac{1}{3} \cdot \frac{\frac{1}{F_4^2} - \frac{1}{F_3^2}}{\frac{1}{F_3^2}} = \frac{1}{3} \cdot \frac{F_3^2 - F_4^2}{F_4^2}, \quad (31)$$

Для малых величин содержание мех-примесей W , когда выполняется неравенство вида:

$$\frac{F_3^2 - F_4^2}{F_4^2} < 0,1, \quad (32)$$

формула (3) для содержания мех-примесей W упрощается:

$$W \approx \frac{2}{3} \cdot \frac{F_3 - F_4}{F_4} \quad (33)$$

Таким образом, при концентрации содержание мех-примесей в приготовленной суспензии $W_0 = 1$ г/м³, величина измеренного содержание мех-примесей составляет $W = 0,95$ г/м³, а величина $\Delta W = \pm 0,5$ г/м³, что позволяет производить измерения содержания мех-примесей в диапазоне $10^{-4} \% < W < 10^{-2} \%$ с относительной погрешностью (определяемой как разница содержания мех-примесей приготовленной и измеряемой суспензии деленной на содержание мехпримесей приготовленной) не более 5,2 %.

Были приготовлены растворы точно известной концентрации, с помощью которых проводилась калибровка, так называемые модельные смеси авиакеросина и загрязнителей - механических примесей, представляющих собой порошки имитаторы, близкие к производственным загрязнителям: 60%

электрокорунда М5-М7 и 40% порошка карбида кремния М5-М7 по массе. Такой состав загрязнителей выбирали из тех соображений, что наибольшее число частиц механических примесей приходится на этот размерный интервал.

Было приготовлено 5 растворов модельной смеси с различной концентрацией загрязнителя: - 1 г/тн; - 1,5 г/тн; - 2 г/тн; - 2,5 г/тн; и - 3 г/тн, точную концентрацию измеряли с помощью стандартных методик ГОСТ 10577-78.

Концентрацию загрязнителей топлива рассчитывали по следующей формуле:

$$x = G_1/G_2 \cdot 100\%, \quad (34)$$

где G_1 — масса порошка загрязнителя (или смеси нескольких порошков); G_2 — масса используемого для анализа топлива ТС-1.

$$G_2 = G_p,$$

$$G_2 = V \cdot \rho,$$

где V — объем топлива, см^3 ;

$\rho = 0,780 \text{ г/см}^3$ — плотность топлива ТС-1.

Для градуировки готовили модельные смеси топлива с концентрацией твердой фазы от 1,7

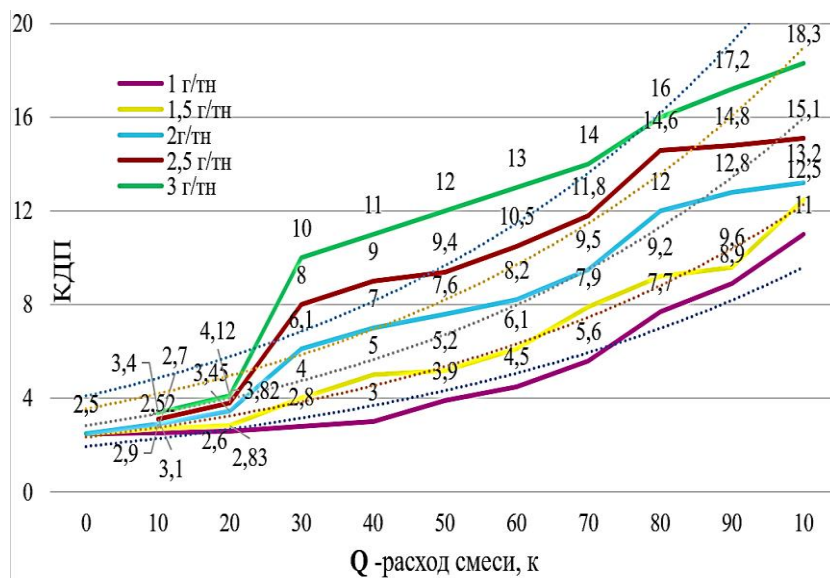


Рисунок 15 – Зависимость КДП от количества прокачанной смеси с различной концентрацией механических примесей: - 1; - 1,5; - 2; - 2,5; - 3 г/тн.

до 26,0 мг/литр. Результаты эксперимента представлены на рисунках 15 и 16. Из графиков на рисунке 15 видно, что по мере прокачивания смесей авиатоплива через ДЭФ, измеренное КДП растёт от 2,5 до 17.

Для установления функциональных зависимостей диэлектрической проницаемости диэлькометрического фильтроэлемента от плотности и природы вещества механических примесей загрязнителя в измерительной контрольной ячейке ДЭФ проведены исследования с загрязнителями различного состава и плотности (природы)

(рисунок 16). Были приготовлены модельные растворы с точно известной концентрацией загрязнителей различного состава - механических примесей, представляющих собой:

1 - КВАРЦ – стандартная тестовая пыль РТИ Arizona Test Dust A4;

2 - БАРИТ – минерал бария из класса сульфатов, BaSO_4 ;

3 - КАОЛИН – полиморфная модификация водного силиката алюминия $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$. Каолиновая глина, минерал, состоящий из гидратированных алюмосиликатов $[\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4]$

4 - ОКСИД – гидроксид железа (III) $\rho=3 \text{ г/см}^3$, естественный загрязнитель – ржавчина размером 5...10 мкм. Такой состав загрязнителей выбирали из тех соображений типичности состава естественных загрязнений в реальных условиях деятельности организаций авиатопливообеспечения и проверки возможностей метода по идентификации природы

Таким образом, при прокачивании через ДЭФ модельной смеси авиатоплива с различными загрязнителями на участке от 2 до 7 литров обнаружена наибольшая чувствительность ДЭФ к различной плотности частиц мехпримесей. На этом участке можно определить устойчивую зависимость КДП ДЭФ от плотности частиц загрязнителя и составить калибровочную таблицу для определения плотности мех примесей в потоке авиатоплива по величине диэлектрической проницаемости.

Анализ полученных экспериментальных результатов показывает, что предлагаемый метод динамического измерения гравиметрических показателей уровня содержания мехпримесей в авиатопливе, характеризуется относительной погрешностью определения содержания мехпримесей не более 4,6 % в диапазоне $1 \text{ г/м}^3 < W < 10 \text{ г/м}^3$.

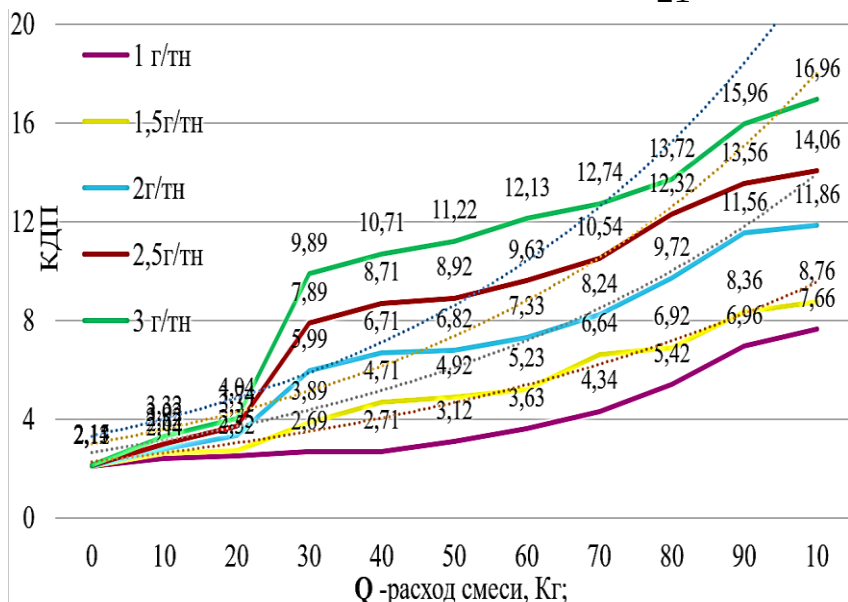


Рисунок 16 – Зависимость (КДП) от количества прокачанной смеси через диэлькометрический фильтроэлемент (ДФЭ) модельных смесей с загрязнителем

известна, и уже использовалась автором в разработке метода, основанном на изменении перепада давления на индикаторных фильтрующих перегородках различной тонкости. Результаты имитационного моделирования в программном пакете SOLIDWORKS Flow Simulation, потока смеси авиатоплива и мехпримесей в каскадном мониторе из 5-и элементов изображены на рисунке 17.

Для определения количественной оценки коэффициента удельного изменения электрической емкости, пропорциональной плотности и весу частиц мехпримесей в работе были проведены стендовые испытания перегородок. При стендовых испытаниях каждой индикаторной перегородки на чистом топливе определяем показатель коэффициент удельного изменения электрической емкости. Емкость всех ДФЭ регистрируется после введения всего количества загрязнения, и прокачка топлива останавливается.

После проведения испытаний на макете, получили на каждой перегородке данные по электрической емкости и весу отсеченных частиц механических примесей.

Внешний вид исследовательского прокачного стенда, разработанного прототипа устройства ДАМП представлен на рисунке 18. Анализатор диэлькометрический гравиметрический механических примесей АДГС-МП-1.5 предназначен для измерения в жидкостях массовой концентрации взвешенных частиц различных размеров.

Предложен новый метод контроля промышленной чистоты авиатоплива, позволяющий в режиме реального времени проводить измерения гравиметрических параметров и гранулометрических показателей промышленной чистоты авиатоплива непрерывно в потоке. Для повышения чувствительности метода, эффективности обнаружения микрокапель, свободной (нерастворенной воды) в потоке авиатоплива, был выбран метод накопления влаги в пористой гидрофобной перегородке (рисунок 19). Изменение количества накопленной влаги пропорционально изменению электроемкости этой перегородки, что и положено в принцип измерения содержания свободной влаги в потоке авиатоплива.

Разработанный метод дает возможность контролировать чистоту перекачиваемого авиатоплива при заправке ВС с более высокой степенью точности по сравнению с существующим современными классическими, а также позволяет осуществлять контроль в динамических условиях, т.е. непрерывно в потоке, предоставляя мгновенные данные измерения гравиметрических (весовых) и гранулометрических параметров для принятия решения о кондиционности и пригодности авиатоплива к заправке ВС. Сущность этого метода, так называемого ситового распределения (анализа), широко

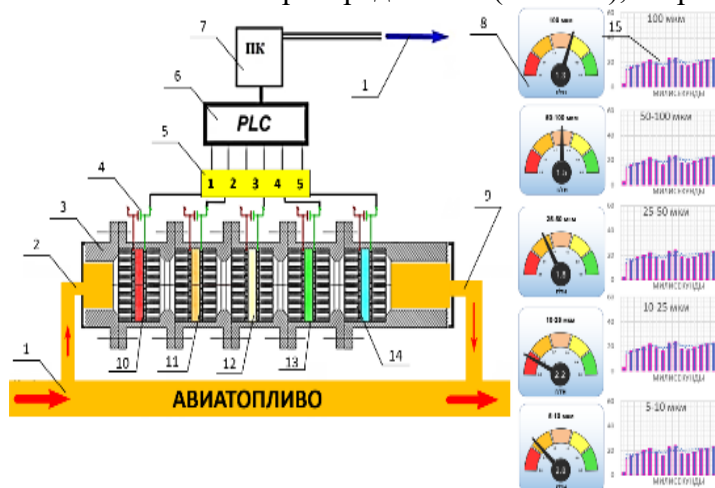


Рисунок 17 – Диэлькометрический гравиметрический анализатор механических примесей

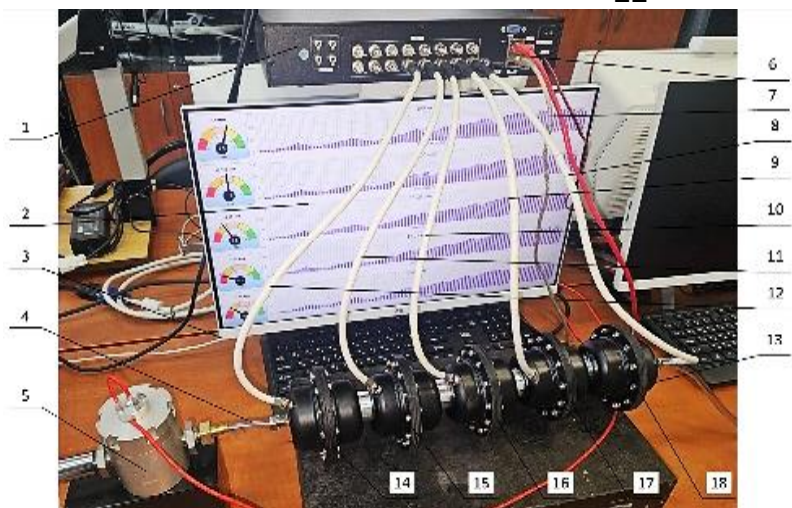


Рисунок 18– Каскадный дизелькометрический анализатор мех примесей

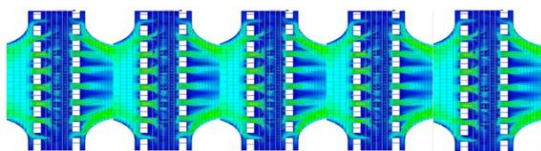


Рисунок 19 – Имитационное моделирование каскадного монитора в Flow Simulation

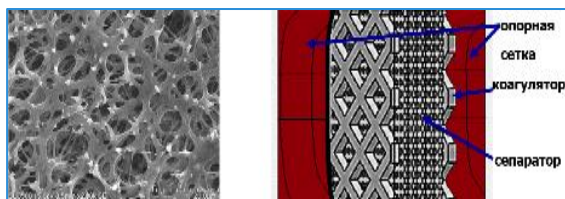


Рисунок 20–Конструкция фильтропакета датчика водоотделителя

авиатоплива, в режиме реального времени (онлайн) - высокая чувствительность и разрешающая способность, дающая возможность определения и измерения количества, мицеллярной (мелкодисперсной) воды, которая не определяется визуально в потоке авиатоплива.

Устройство динамического контроля содержания воды может быть внедрено в систему динамического мониторинга чистоты авиатоплива в качестве самостоятельного модуля или в составе с диэлектрическими анализаторами механических примесей (ДАМП) (рисунок 22). Совместная работа этих систем в реальном масштабе времени (онлайн) дает полную и непрерывную картину оценки чистоты авиатоплива в системе авиатопливообеспечения ТЗК на всех этапах подготовки авиатоплива. Расход авиатоплива измеряется массовым расходомером Кориолиса (массомером). Импульсный выходной сигнал массомера представляет собой периодический прямоугольный сигнал. Передаваемой переменной могут быть выбраны значения массового и объемного расхода. При этом прохождение одного импульса будет

На основе анализа выбора материала с высокой гидрофильностью для применения в конструкции дизелькометрического датчика определения воды в авиатопливе был выбран поливинилформаль - полимерный материал, обладающий трехмерной ячеистой структурой и высокой гидрофильностью полимерной основы (рисунок 20). Устройство представляет собой пять индикаторных ячеек ДЭФ, каждый из которых содержит перегородку из пористого поливинилформаль, опорную сетку на выходе и на входе

перегородки сепарирующую сетку с покрытием из фторопласта и перфорированные металлические обкладки, все это образует электрический конденсатор (электрическую емкость) (рисунок 20 и 21). Особенностью этих конденсаторов является то, что их емкость изменяется в процессе обводнения. При насыщении водой изменяется диэлектрическая проницаемость пористого твердого материала, а, следовательно, и емкость конденсатора.

Разработанный автором метод динамического измерения уровня содержания свободной (эмульсионной) воды в потоке авиатоплива основан на одновременном измерении мгновенных значений массового расхода потока авиатоплива, его комплексной диэлектрической проницаемости и температуры. Преимущество метода: прямой динамический метод измерения показателей чистоты

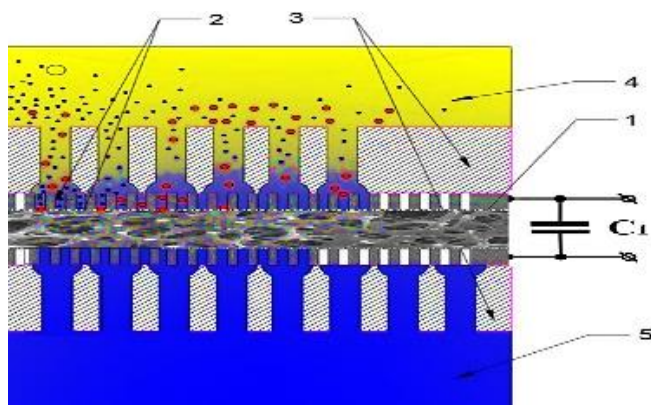


Рисунок 21 – Устройство датчика динамического измерения уровня обводнения

соответствовать прохождению через расходомер объема или массы с заданной ценой.

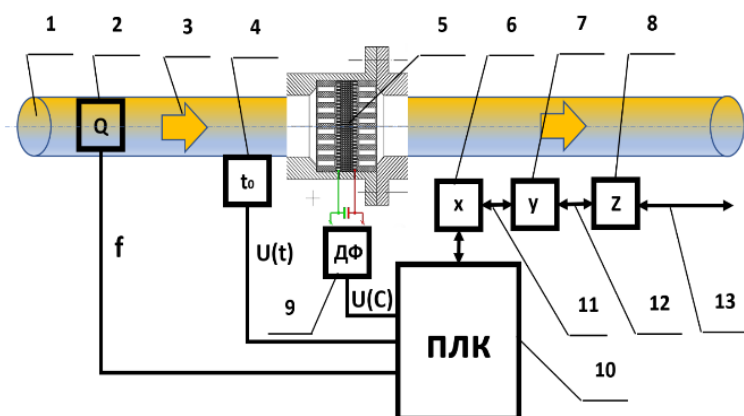


Рисунок 22 – Блок – схема динамического измерения концентрации эмульсионной воды: 1 – трубопровод; 2 – массомер кориолисовый; 3 – поток авиатоплива; 4 – датчик температуры; 5 – диэлькометрический фильтр-монитор; 6- конвертер интерфейсов ТТЛ- CAN; 7- конвертер интерфейсов CAN-USB; 8 – конвертер интерфейсов CAN-USB; 9- преобразователь «емкость-напряжение»; 10- программируемый логический контроллер; 11- линия связи с CAN-интерфейсом; 12 - линия связи с USB-интерфейсом

Максимально допустимое значение частоты на выходе – 12000 Гц. Текущая частота (Гц) на импульсном выходе, для расходомера равна:

$$f = \frac{Q}{(3,6 \cdot \xi_1 \cdot m)}, \quad (35)$$

Где, Q - текущее значение расхода (кг/ч или м³/ч), m - цена импульса (г или л); ξ_1 - коэффициент, учитывающий фазовые смещения кориолисового преобразователя массового расходомера.

Для плотности и температуры указывается значение передаваемой переменной, соответствующее максимальной частоте. Значение частоты на частотном выходе прямо пропорционально измеряемой переменной и описывается уравнением:

$$f = V_{ar} \cdot \frac{12000}{URV}, \quad (36)$$

где V_{ar} - текущее значение переменной, URV -значение измеряемой переменной соответствующее максимальной частоте. В этом режиме частота сигнала на выходе массомера в каждый момент времени пропорциональна текущему значению связанного с ним параметра.

$$f = f_{min} + k \cdot (V - V_{min}), \quad (37)$$

$$\text{где } k = \frac{f_{max} - f_{min}}{V_{max} - V_{min}};$$

f_{max} - максимальная частота выходного сигнала; f_{min} - минимальная частота выходного сигнала; V_{ar} - текущее значение связанного параметра; V_{max} - максимальное значение связанного параметра; V_{min} - минимальное значение связанного параметра; f - частота следования импульсов счетчика массового расходомера.

На основании сравнения, справочных значений относительной диэлектрической проницаемости обезвоженного авиатоплива, при температуре 20 °С, производится пересчет значения относительной диэлектрической проницаемости обезвоженного(сухого) авиатоплива, к значению диэлектрической проницаемости авиатоплива, содержащего свободную(эмульсионную) воду;

Диэлектрическая проницаемость авиатоплива ε_c -будет равна:

$$\varepsilon_c = \frac{V_H}{V_H + V_{\Pi}} \cdot \varepsilon_H + \frac{V_{\Pi}}{V_H + V_{\Pi}} \cdot \varepsilon_{\Pi}, \quad (38)$$

где V_H - объем обезвоженного авиатоплива; V_{Π} - объем свободной (эмульсионной) воды в авиатопливе; ε_H -относительная диэлектрическая проницаемость обезвоженного авиатоплива; ε_{Π} - относительная диэлектрическая проницаемость свободной (эмульсионной) воды.

Отсюда при нормальных условиях (температура 20 °С)

$$\eta\% = \frac{V_{\Pi}}{V_H} = \frac{\varepsilon_c - \varepsilon_H}{\varepsilon_{\Pi} - \varepsilon_c}, \quad (39)$$

где $\eta\%$ - содержание по объему включений примесей (не растворенной) воды.

На основании формулы Клаузиуса - Мосотти с учетом поправки Дебая диэлектрическая проницаемость топлива ε_H , будет равна:

$$\varepsilon_{HT} = \beta(t - 20) + \varepsilon_H, \quad (40)$$

где β - коэффициент, градиента температурного изменения диэлектрической проницаемости авиатоплива;

$1/({}^{\circ}\text{C})$ t - температура авиатоплива, $^{\circ}\text{C}$.

Учитывая соотношения (37) и (39), математическая модель измерения расхода потока авиатоплива с учетом поправки на определение свободной(эмульсионной) воды может быть описана уравнением:

$$q_{\text{и}} = q_v(1 - \eta\%) = q_v \left(1 - \frac{V_{\text{п}}}{V_{\text{н}}}\right) = \frac{2\pi f}{\xi_1} \left(1 - \frac{\varepsilon_{\text{с}} - \varepsilon_{\text{н}}}{\varepsilon_{\text{п}} - \varepsilon_{\text{с}}}\right), \quad (41)$$

А с учетом (40)

$$q_{\text{и}} = \frac{2\pi f}{\xi_1} \left(1 - \frac{(\varepsilon_{\text{с}} - (\beta(t-20) + \varepsilon_{\text{н}}))}{\varepsilon_{\text{п}} - \varepsilon_{\text{с}}}\right), \quad (42)$$

где β - коэффициент, градиента температурного изменения диэлектрической проницаемости авиатоплива, определяемый по уравнению Клаузиуса - Мосотти, $1/({}^{\circ}\text{C})$ t - температура авиатоплива, $^{\circ}\text{C}$; $\varepsilon_{\text{с}}$ - диэлектрическая проницаемость авиатоплива; $\varepsilon_{\text{н}}$ - относительная диэлектрическая проницаемость обезвоженного авиатоплива; $\varepsilon_{\text{п}}$ - относительная диэлектрическая проницаемость свободной (эмульсионной) воды; q_v - объемный расход авиатоплива.

Измерение диэлектрической проницаемости авиатоплива осуществляется первичным измерительным преобразованием электрической емкости в напряжение:

$$\varepsilon_{\text{с}} = f(U), \quad (43)$$

где U - напряжение первичного измерительного преобразователя.

Подставляя (43) в (42), получаем математическую модель измерения расхода потока авиатоплива с поправкой на содержание свободной (эмульсионной) воды:

$$q_{\text{и}} = \frac{2\pi f}{\xi_1} \left(1 - \frac{(f(U) - (\beta(t-20) + \varepsilon_{\text{н}}))}{\varepsilon_{\text{п}} - f(U)}\right), \quad (44)$$

Принцип действия устройства динамического измерения концентрации эмульсионной (нерастворенной) воды в потоке авиатоплива изображен на рисунке 21, результат динамического измерения массомера 2 потока авиатоплива в формате импульсного сигнала поступает на цифровой вход №1 ПЛК, диэлькометрический фильтр-монитор 5, установлен в топливопроводе и его электрическая емкость, пропорциональна ε диэлектрической проницаемости авиатоплива и зависит от уровня содержания нерастворенной воды в авиатопливе.

Измеренная электрическая емкость диэлькометрического фильтра-монитора конвертируется преобразователем 9 в напряжение, которое подается на аналоговый вход №1 ПЛК. Датчик температуры авиатоплива 4, подключен к цифровому входу № 2 ПЛК. Для связи с сервером применяются стандартные интерфейсы: CAN-а до 1 км, или до 7 км - токовая петля, через стандартные конвертеры интерфейсов CAN-USB с использованием виртуального COM-порта.

Схема и общий вид емкостного датчика (рисунок 23 и 24) для измерения уровня обводнения авиатоплива в динамических условиях на основе измерения диэлектрической проницаемости пористой поливинилформалевой перегородки в потоке контролируемого авиатоплива. Диэлькометрический фильтр-монитор 5, состоит из слоя пористого поливинилформала 4, расположенного между перфорированными электродами обкладками 3, образующими конденсатор, подключенный схеме преобразователя влажности в напряжение. Это обеспечивает измерение емкости. При этом емкость датчика определяется относительной диэлектрической проницаемостью топлива в трубопроводе.

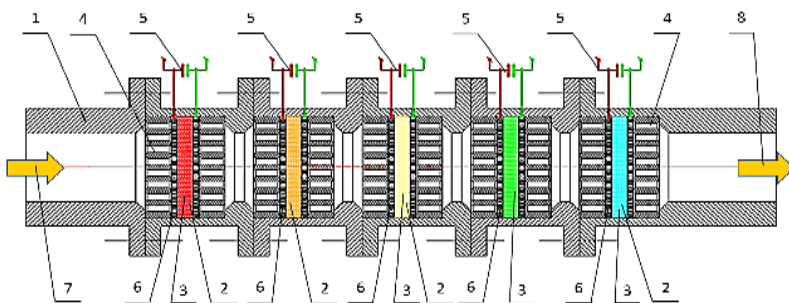


Рисунок 23– Схема устройства ДАМП для определения влагосодержания в потоке авиатоплива

В работе проведен анализ возможной установки предлагаемого устройства в технологическую цепочку выполнения задач ТЗК.

Применение ИУС в ТЗК предоставляет возможность в онлайн режиме иметь объективные данные о кондиционности авиатоплива на всех этапах авиатопливообеспечения ВС, что дает возможность корректировать

настройки параметров технологических процессов с целью достижения оптимального состояния работы данных процессов.

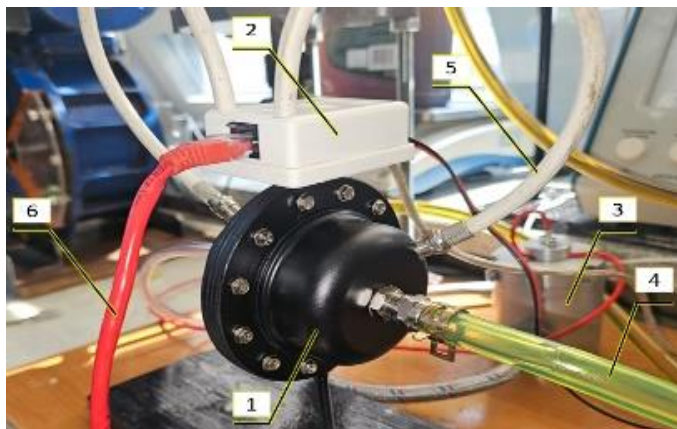


Рисунок 24 – Схема и прототип устройства емкостного датчика: 1-поток АТ; 2- опорный каркас; 3-перфорированная обкладка; 4- пористый поливинилформаль; 5-корпус ДФ;

Внедрение разработанной информационной системы в ТЗК позволяет, в зависимости от уровня исходной обводненности авиатоплива, автоматически выбирать наиболее рациональные режимы работы технологического оборудования технологического и процессов подготовки авиатоплива (сочетание времени отстаивания, обеспечения тонкости и ступенчатости фильтрации авиатоплива).

Применение автоматизированной системы контроля обводнения авиатоплива, обеспечит повышение уровня качества управления процессами авиатопливообеспечения ВС, а интеграция и обмен данными в режиме реального времени с АСУ ТП ТЗК, позволят принять своевременное

решение о допуске авиатоплива к заправке в ВС, на основе реальных данных о его кондиционности.

Глава 4 посвящена разработке системы дозирования ПВКЖ в авиатопливо при заправке ВС, в которой автором представлены конструкторско-технологические решения устройств дозирования ПВКЖ, применяемых в составе оборудования средств заправки ВС на объектах ОАТО.

Охлаждение авиатоплива во время выполнения полета ВС, неизбежно сопровождается образованием свободной воды, которая при низких температурах образует кристаллы льда, приводит к обледенению деталей и оборудования топливной системы ВС топливной аппаратуры, ухудшает или блокирует подачу авиатоплива к двигателям ВС, что приводит к случаям летных происшествий и аварий.

Во избежание кристаллообразования свободной воды в полете ВС, в авиатопливо в процессе заправки ВС добавляют присадку - ПВКЖ в объемной концентрации 0,1+0,05%; 0,2+0,02%; 0,3+0,03% к объему авиатоплива, согласно условий полета и предписаний РЛЭ ВС. Добавление ПВКЖ производится в поток авиатоплива, после фильтра-водоотделителя средства заправки ВС - ТЗА или диспенсера системы ЦЗС, производят с применением серийно выпускаемых промышленностью систем дозирования.

Современные разработки систем дозирования ПВКЖ в авиатопливо, с применением инновационных решений, в составе автоматизированных систем измерения и массовых расходомеров Кориолиса представлены следующими системами: Emerson Process Management и Промышленная группа «Метран»; Система измерительная «Автоматизированный модуль дозирования присадки» (СИ АМДП). ЗАО НПО «Авиатехнология».

Внешний вид счетно-дозировочной системы и поршневого насоса-дозатора Alfons Naag представлены на рисунке 25.

Анализ существующих дозаторов (дозировочных систем) показал, что их работа основана на принципе объемного дозирования – синхронного введения (добавления) ПВКЖ в поток перекачиваемого или заправляемого авиатоплива, а принцип действия рассмотренных дозаторов основан на жесткой механической связи приводных валов объемных гидромашин: гидромотора-счетчика и гидронасоса-дозатора (через редуктор, делитель числа оборотов) (рисунок 26).

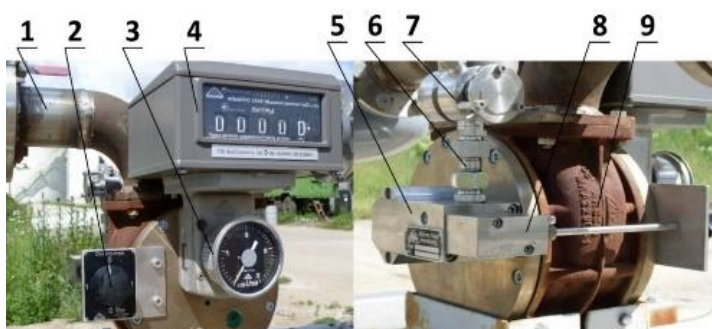


Рисунок 25– Внешний вид ДКР Alfons Naag: 1 - гидролиния АТ; 2 – переключатель; 3 - измеритель расхода; 4 – информационное табло; 5 - корпус дозатора

Рисунок 2 – Влияние частоты переменного

Опыт эксплуатации показывает, что одним из распространенных недостатков применяемых дозаторов являются течи через уплотнительные кольца поршней насоса-дозатора. Не маловажным фактором сегодняшнего дня является недостаток методов контроля % содержания ПВКЖ по причине устаревших конструкций дозаторов, и не обеспечивающие интеграцию в применяемыми АСУТП ТЗК и АТО. Проблемой существующего технологического процесса проверки работоспособности систем дозирования: затраты, связанные с невосполнимым расходом дорогостоящей ПВКЖ, и расходом кондиционного авиатоплива с последующими операциями по восстановлению его качества, а также длительности простоя средств заправки на время проведения проверки работоспособности дозатора.

По результату анализа существующих средств дозирования установлено:

- применяемая механическая синхронизация гидропривода объемных расходомеров и насосов-дозаторов, не предусматривает возможности синхронизации с массовыми расходомерами Кориолиса;
- расчет процентного содержания ПВКЖ в смеси авиатоплива производится в объемных единицах, что сказывается на точности дозирования, а расчет дозирования в массовых единицах, в динамических условиях - в потоке, не представляется возможным;
- применение трубки Вентури или в камеры счетчика (Alfons HAAR) для равномерного перемешивания ПВКЖ в потоке авиатоплива, увеличивает гидравлическое сопротивление;
- проверка работоспособности дозатора, весьма затратная технологическая процедура: лабораторный рефрактометрический анализ, невосполнимое расходование дорогостоящей ПВКЖ, расход кондиционного авиатоплива, а также длительность простоя средств заправки.
- получившие массовое распространение в оборудовании подвижных средств заправки и перронных пунктов налива АТЗ.

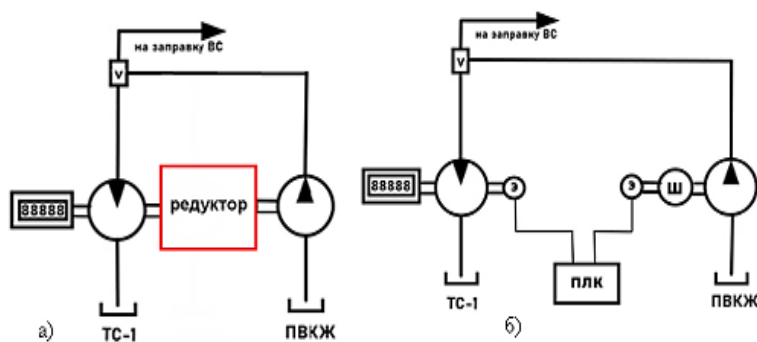


Рисунок 26 — а) классическая схема дозатора с механическим редуктором б) схема с «электронным редуктором»

авиатоплива в баках ВС и соответственно пригодности его к применению. Анализ применяемых технологий контроля и методов фактического процентного содержания ПВКЖ в авиатопливе показал, что лабораторные методы являются дискретными и зависят от правильного отбора пробы, являются косвенными и длительными по времени, не автоматизированными. В тоже время применяемые экспресс методы не точные, высокая зависимость от негативного влияния человеческого фактора.

На основании проведенного в работе анализа применяемых систем дозирования, автором разработана конструкция нового дозатора, с принципом измерения расхода потока авиатоплива и синхронизированным, пропорциональным введением ПВКЖ в определенных количествах (0,1; 0,2 и 0,3%). По аналогии принципа действия механического редуктора в классической схеме дозатора новая разрабатываемая система основана на принципе «электронного редуктора» (рисунок 26).

Пропорциональное введение присадки ПВКЖ, на основании измеренного расхода, обеспечивается программируемым логическим контроллером, который управляет гибридным сервошаговым приводом объемного гидронасоса-дозатора. Автором, были подобраны составляющие части конструкции нового дозатора ПВКЖ: - объемный гидронасос плунжерный, - сервошаговый привод; - ПЛК – программируемый логический контроллер, выполняет роль делителя импульсного сигнала с заданным коэффициентом К (исполняя программный код, в

В результате введенных санкции, и отказа представителей Alfons HAAR поставлять производимое оборудование в Россию, создали критическую ситуацию в отрасли авиатопливообеспечения ВС ГА; существующая технология добавления ПВКЖ, в авиатопливо учитывает фактическое содержание ПВКЖ, в баках ВС после предыдущего полета, что отражается на достоверности информации о кондиционности

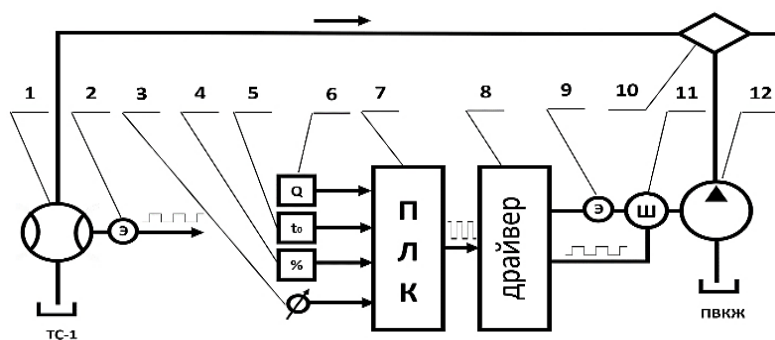


Рисунок 27 — 1 - счетчик-расходомер; 2 - энкодер; 3 - селектор выбора % -дозирования ПВКЖ; 4 - датчик фактического % -содержания ПВКЖ; 5 - датчик температуры авиатоплива; 6 - делитель импульсов расходомера авиатоплива; 7 - программируемый логический контроллер; 8 - драйвер привода ГСШД

работоспособности системы дозирования в работе был разработан исследовательский прототип дозатора (рисунок 28) и создан стенд для экспериментального исследования прототипа дозатора с приводом от ГСШД с различными схемами подключения. Представленная на рисунке 27 гидравлическая схема дозирующей системы на ГСШД и ПЛК, одинаково подходит как для объемных счетчиков-расходомеров, так и для массовых расходомеров - массометров Кориолиса. В этом заключается универсальность разработанной автором дозирующей системы ПВКЖ на основе ГСШД и ПЛК.

Для проверки работоспособности предлагаемой системы в работе разработан исследовательский стенд, максимально имитирующий систему дозирования, применяемую в технологических процессах ТЗК при заправке ВС. Разработанный автором прототип нового счетно-дозировочного устройства, объединенный с датчиком динамического измерения фактического процентного содержания ПВКЖ в потоке заправляемого авиатоплива, предоставляют возможность создания (разработки) информационно – управляющей системы дозирования ПВКЖ что позволит: отменить существующую ежесменную проверку работоспособности дозатора (трудоемких и дорогостоящих (весьма затратных) технологических операций); полностью исключить ручные действия оператора по контролю работоспособности дозатора ПВКЖ во время заправки (исключить негативное влияние человеческого фактора); Исключить риски возможной заправки ВС некондиционным авиатопливом. В итоге это обеспечит повышение уровня безопасности полетов ВС, а также даст экономический эффект за счет сокращения затрат.

Для формирования импульсов управления шаговым двигателем дозатора, импульсный сигнал от расходомера, должен быть преобразован в соответствии с заданным коэффициентом, по аналогии с механическим редуктором с передаточным отношением равным коэффициенту деления, по описанному выше алгоритму.

Аппаратная часть собрана на ПЛК ATmega Arduino Nano V3. Программный код написан в среде на языке Arduino, созданном на базе C++ с использованием специальной интегрированной

соответствии с получаемыми входными сигналами от расходомеров (объемного или массового) (количества авиатоплива (массы и (или) объема) и выходными сигналами (количество оборотов сервошагового двигателя, привода насоса-дозатора и количества ПВКЖ в заданной пропорции).

Таким образом разработанная система дозирования жидкой присадки позволяет работать как с системами с массовым, так и объемным дозированием.

С целью проверки

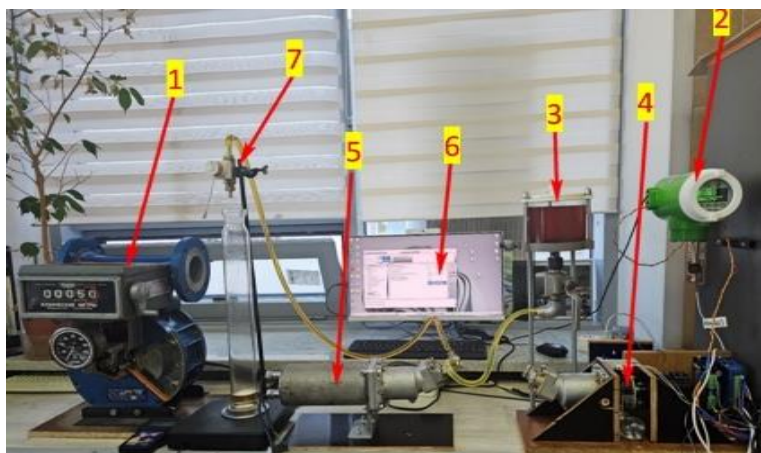


Рисунок 28 — Исследовательский стенд дозатора ПВКЖ с объемным счетчиком: 1 --счетчик расходомер «Alfons Naag»; 2 – массовый расходомер кориолисовый «ЭмиМасс»;

среды разработки (IDE). В разработанной программе реализован принцип электронного редуктора, сопрягающего датчик импульсов (энкодера поворота счетчика-расходомера или вычислителя Кориолиса) с серво шаговым двигателем. Входной сигнал, квадратурный меандр с амплитудой 5 вольт, выходной такой же.

В программе предусмотрена возможность интегрировать датчик коррекции температуры, датчик процентного содержания ПВКЖ, (и) или плотности, если встроить в схему соответствующие датчикам. Настройка сводится к подбору коэффициента (индивидуальная калибровка) и выбору коэффициента умножения «К».

Таким образом, в соответствии с расходом топлива производится пропорциональное прокачивание ПВКЖ. Коэффициент деления (К), назначается (выбирается оператором) согласно требуемого норматива. В импульсном режиме за единицу времени измерения на выход выводится целое число импульсов заданной длительности или скважности. Это число импульсов, умноженное на цену одного импульса, соответствует значению измеряемой величины:

$$Q = \frac{3,6 \times K_p \times N}{\Delta t} \quad (45)$$

где Q — значение расхода [т/ч или м³/ч], K_p — цена импульса [кг/имп или л/имп], N — число импульсов за время измерения, Δt — время измерения [с]. Цену импульса следует выбирать таким образом, чтобы при максимальном расходе частота на выходе не превышала 10000 Гц.

$$f_{\text{вых}} = \frac{Q}{3,6 \times K_p} \quad (46)$$

Для дискретного выбора дозы и переключения режимов дозирования - 0,1%, 0,2% и 0,3 %, в работе разработан делитель (умножитель) импульсов - устройство, которое при подаче на его вход периодической импульсной последовательности формирует на выходе такую же последовательность, но имеющую частоту повторения импульсов, в определенное число раз меньшую (большую). Программирование производится уже разработанным выше программным обеспечением. Для настройки, устройство подключается к персональному компьютеру с помощью кабеля USB-MiniUSB.

Кроме того, алгоритмом программного обеспечения, разработанного автором, предусмотрена интеграция с любым (объемным или массовым) расходомером, что делает его универсальным для применения в ТЗК. А также алгоритм программы, позволяет производить расчет и корректировку дозы ПВКЖ, как в массовых единицах процентного содержания в авиатопливе, так и в объемных, в зависимости от выбора оператора заправки ВС.

Система может быть интегрирована с информационно-управляющими системами АСУТП ТЗК, коммерческого оперативного учета авиаГСМ, систем аварийной сигнализации, систем визуального отображения, информационных панелей, а также в случае любого нарушения работы системы дозирования управления блокировкой процесса заправки ВС (с подключением к штатной системе «DEADMAN»).

На основании проведенных лабораторных испытаний и прототипа дозатора в работе разработан опытный образец дозатора ПВКЖ, который отвечает требованиям НТД Внешний вид дозатора, блока управления и делителя представлены на рисунках 29-31. Диалоговое окно настройки делителя-преобразователя частоты показано на рисунке 32.



Рисунок 29 — Общий вид Дозатора ПВКЖ с ГСМД

Результаты испытаний позволяют выделить преимущества разработанной системы перед существующими:

- совместима с любым расходомером-счетчиком, а также массовым расходомером Кориолиса;
- обеспечивает возможность дозирования как в массовых единицах, так и в объемных, что соответствует требованиям как гражданских ВС, так и МО ВКС.

Разработанный дозатор, отличающийся

тем, что обеспечивает:

- возможность интеграции (совместной работы) как с объемными, так и с массовыми расходомерами любых конструкций и исполнений (при индивидуальной калибровке);

- высокую точность введения присадки ПВКЖ, за счет применения энкодера (датчика угла поворота) механически связанного с сервошаговым двигателем

- дозировку как в объемных пропорциях, так и в пропорциях массовых единиц, за счет применения плотномера.

- возможность вариативного выбора дозы присадки ПВКЖ, (0,1; 0,2 и 0,3%), а также любой концентрации;

- тонкую подстройку (компенсацию) за счет обратной связи с плотномером и детектором %-содержания ПВКЖ.

Таким образом, разработанная система дозирования жидкой присадки с насосом-дозатором с приводом от сервошагового электродвигателя с микроконтроллерным управлением позволяет работать как с системами с массовым, так и объемным дозированием.



Рисунок 31 — Внешний вид делителя и преобразователя частоты импульсов

показали соответствие нормативным показателям:

- сходимость между результатами определения содержания жидкости «И-М» в топливе при различной производительности прокачки на всех регламентированных концентрациях находится в пределах точностных величин метода испытаний;

- величины определения содержания жидкости «И-М» в пробах, отобранных из точки отбора перед раздаточным рукавом и из ННЗ раздаточного рукава отличаются незначительно, что свидетельствует об удовлетворительном смешении жидкости «И-М» с топливом;

- величины содержания жидкости «И-М» в топливе при диапазоне 0,1% на производительности прокачки от 500 л/мин до 1200 л/мин находятся в пределах установленной нормы $-0,1+0,05\%$, ближе к максимально-допустимому значению;

- величины содержания жидкости «И-М» в топливе при диапазонах 0,2% и 0,3% в большинстве исследованных проб превышают максимальный предел, установленный отраслевой нормативно - технической документацией.

Таким образом, сходимость между результатами определения содержания ПВК жидкостей на различных диапазонах работы дозатора, находится на удовлетворительном уровне и не выходит за рамки точностных параметров метода испытаний.

Опытный образец дозатора обеспечил дозирование ПВК жидкости «И-М» в топливо на диапазоне 0,1% на уровне, близком, к максимально-допустимому, или равном ему ($0,1+0,05\%$). При работе дозатора в диапазоне 0,2 и 0,3 %, полученные при испытаниях значения содержания ПВК жидкости «И-М» в большинстве исследованных проб превышали максимально-допустимые значения, установленные отраслевой документацией.

Глава 5 посвящена описанию концептуального облика системной интеграции ТЗК и аэропортового комплексов.

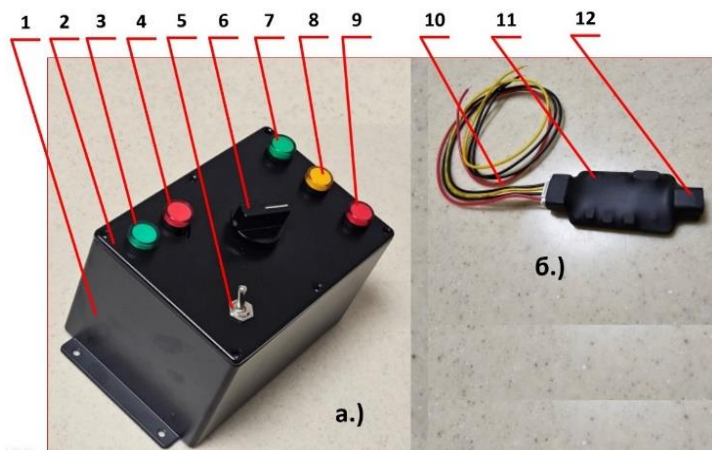


Рисунок 30 — Внешний вид блока управления и делителя импульсов

Опытный образец дозатора ПВКЖ на основе гибридного сервошагового привода, был смонтирован на штатном топливозаправщике аэродромном ТЗА-22-ФМ (рисунок 33), для производственных испытаний в реальных условиях действующего ТЗК.

Данные лабораторного анализа %-содержания, по рефрактометрическому методу,

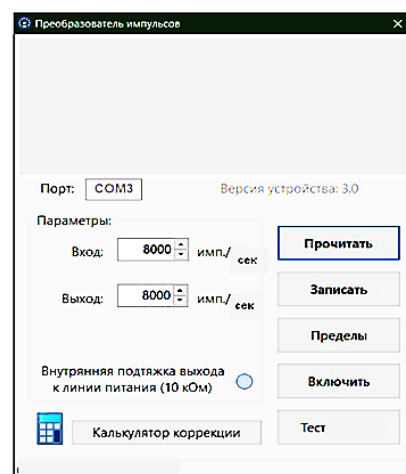


Рисунок 32 -Диалоговое окно настройки делителя-преобразователя частоты

Анализируя современное состояние систем диспетчерского управления наземным обслуживанием и авиатопливообеспечением ВС, становится очевидным, что внедрение информационных технологий в технологический процесс ТЗК и их интеграция с информационно управляющими системами аэропорта, позволит принимать своевременные и качественные оперативные решения, на основе реальных данных, оптимизировать качество, и эффективность планирования и управления процессами приема, хранения, подготовки авиатоплива и заправки ВС.

В числе важнейших направлений цифровой трансформации ТЗК – внедрение в систему коллаборативного взаимодействия в контур аэропорт-авиакомпания-воздушное судно, дающее возможность расширять функционал ТЗК как до уровня взаимодействия с аэропортовыми автоматизированными системами управления, так и полноценно включаться в технологический процесс топливозаправочной деятельности аэропорта.

Основная задача организации производственных процессов ТЗК заключена в организации и управления технологическими процессами контроля качества авиатоплива в условиях пунктуального соблюдения технологического графика обслуживания ВС.

Одной из наиболее продолжительных и ответственных операций в процессе наземного обслуживания ВС является заправка авиатопливом на местах их стоянки. Уровень качества и пунктуальность наземного обслуживания ВС, а в частности топливозаправочная деятельность, определяют в конечном случае готовность ВС к вылету и влияют на такие параметры, как регулярность полетов и пунктуальность. При снижении уровня качества и пунктуальности обслуживания, появляется предпосылка возникновения сбойной ситуации, в случае выполнения процедуры заправки с низким уровнем качества, и (или) с нарушением технологического графика обслуживания, сроки выполнения операции будут продлены, а лишняя минута, проведенная на земле, увеличивает совокупные издержки авиаперевозчика, аэропорта и обслуживающих компаний. Как следствие, возникает угроза потери репутации «надёжного» перевозчика, что в будущем отразится на объемах авиаперевозок.

На рынке не существует какой-либо единой, признанной всеми системы управления аэропортом или механизма, дающего полноценное комплексное решение для формирования и контроля исполнения сезонного расписания, суточного плана полетов и управления всеми ресурсами наземного обслуживания.

Однако, в условиях стохастических воздействий, сбоев, нештатных ситуаций и статистической неопределенности целесообразно иметь решение синхронного планирования и оптимизации задач ресурсного управления аэропортовым комплексом дающее возможность расширять функционал ТЗК как до уровня взаимодействия с аэропортовыми автоматизированными системами управления, так и полноценно включаться в технологический процесс топливозаправочной деятельности аэропорта.

Одним из лидеров в области оптимизации операционной деятельности аэропорта является комплекс программных продуктов, автоматизирующих операционную деятельность аэропорта - GroundStar, флагманский набор продуктов Inform Groundstar является комплексным программным решением, удовлетворяющим требованиям аэропортов для наземного обслуживания ВС (рисунок 34).

ИУС аэропортового комплекса Ground Star, представляет собой единое моноплатформенное решение по управлению аэропортовым комплексом, и включает в себя



Рисунок 33 -Общий вид техотсека ТЗА-22-FM с дозатором на основе ГСШД: 1-топливопровод от насоса; 2 - клапан-«ИНЛАЙН»; 3 –топливопровод после фильтра-водоотделителя; 4 - фильтр-водоотделитель

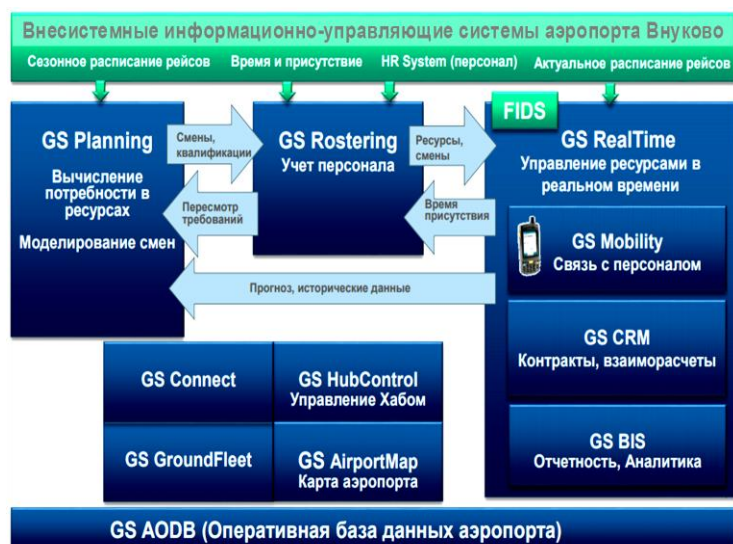


Рисунок 34 – Комплексная система управления аэропортом GroundStar, - конфигурация платформы GroundStar, компании INFORM

системы управления сезонным расписанием, суточным планом полетов и всеми ресурсами наземного обслуживания, практически единая система, позволяющая минимизировать значительные финансовые затраты на построение интерфейсов межсистемного взаимодействия, внутри основного контура управления.

Недостатки информационной системы GroundStar: не рассматривает движение топливных потоков, коммерческого и оперативного учета авиатоплива, задач важных для ТЗК, измерений и сквозной автоматизации учетно-отчетных операций; решение по принятию задачи заправки ВС принимает оператор ТЗ – в ручном режиме. Это не позволяет в полной мере автоматизировать, а значит

оптимизировать именно топливозаправочную деятельность аэропорта; не рассматривает параметры кондиционности авиатоплива и готовности оператора к заправке ВС; в результате санкций продукт на территории нашей страны INFORM больше не поддерживает.

Вторым программным продуктом является COTAS AFMS (Computer Operated Terminal Automation System) AFMS «Aircraft Fueling Information System» – система автоматизации процессов перекачки массовых потоков. В настоящее время является одним из лидеров в области автоматизации технологических процессов и диспетчерского управления топливозаправочной деятельностью ТЗК. Это комплексное решение для управления количествами и перевалочными процессами на складе ГСМ. При этом система COTAS связана с внутрипроизводственным инструментарием и управляет погрузочно-разгрузочными процессами. Благодаря большому количеству интерфейсов и их открытости COTAS может без проблем объединять разные процессы для обработки измеренных значений и, в свою очередь, может быть, с легкостью интегрирована в системы планирования ресурсов предприятия более высокого уровня, такие как SAP. Недостатки COTAS: отсутствуют:

- функции диспетчеризации аэрологистического планирования ресурсов и оптимизации диспетчерского управления средствами заправки на аэродроме;
- решения по автоматизированному контролю кондиционности, пригодности авиатоплива и формирования паспорта качества;

В результате санкций COTAS больше не поддерживает свой продукт на территории нашей страны.

Проблемы оптимизации процессов оперативного управления выходом из сбойных ситуаций аэропорта, также, как и проблемы импортозамещения зарубежных ИТ и автоматизации взаимодействия процессов ТЗК и аэропорта целенаправленно не исследовались. Особенно это можно сказать о процессах контроля чистоты авиатоплива, его коммерческого учета, и логистики наземного обслуживания ВС между ТЗК и аэропортом функционируют раздельно, что отрицательно сказывается на обеспечении регулярности и безопасности полетов. Вместе с тем, не менее актуальной проблемой импортозамещения является разработка соответствующих отечественных ИТ. Известны и широко применяются отечественные системы управления и принятия решений в аэропортовой деятельности. Одной из таких систем является автоматизированная система (АС) «Кобра»

Таким образом своевременность получения показателей кондиционности и решения о пригодности авиатоплива к применению, как фактор обеспечения регулярности полетов и пунктуальности аэропортовой деятельности, на сегодняшний день не имеет законченного решения и поэтому является актуальной проблемой, решить которую необходимо средствами

автоматизации, инструментами информационных технологий и системной интеграции аэропортового и топливозаправочного комплексов.

Основной целью системы аэродромной логистики и диспетчеризации является комплексная автоматизация бизнес и производственных процессов на основе современных технологических решений, а также использование технологий искусственного интеллекта и машинного обучения для формирования единой системы поддержки принятия решений.

С целью оптимизации процессов взаимодействия служб аэропорта технология диспетчерского управления стала предметом пристального изучения математической статистики, анализа и обобщений, смесей теорий, марковских процессов и нечеткой логики. При этом за критерии показателей эффективности работы систем диспетчеризации топливозаправочной деятельности, как систем массового обслуживания принимаются такие показатели как: показатели среднего времени ожидания; требования начала обслуживания; среднего размера очереди на обслуживание; вероятности того, что в системе обслуживания будет находиться определенное количество требований; среднее число ресурсов, занятых или свободных от обслуживания, и ряд других.

Одним из таких процессов массового обслуживания является технология централизованной заправки самолетов (ЦЗ). Применение статистических методов и теории массового обслуживания предоставляет возможности создания математических моделей систем ЦЗ, обеспечивающих решение задач ресурсно-временной оптимизации топливозаправочной деятельности, с учётом технологической интенсификации аэропортового комплекса.

В ходе исследования был проведен анализ основных информационных автоматизированных систем управления ТЗК, на основе которого выявлены проблемы функционирования наземного обслуживания аэропорта, главные из которых — неэффективность управления стохастическими процессами, которые появляются в условиях сбойных ситуаций, а также отсутствие автоматизированных систем управления уровнем чистоты авиатоплива от механических примесей и воды. Решение этой проблемы возможно за счет применения и расширения (англ. upgrade) GroundStar Inform GmbH - единой комплексной системы управления

аэропортом посредством увеличения возможностей системы за счет добавления новых компонентов (рисунок 35).

Автором предложена разработка концептуального построения адаптивной ИУС технологической интеграции аэропортового комплекса. Логическим продолжением построения системы мониторинга кондиционности авиатоплива является создание, адаптивной информационно-управляющей системы (ИИУС) мониторинга чистоты авиатоплива на основе искусственного интеллекта. На основе прямых динамических средств измерений: гравиметрических (весовых) и



Рисунок 35 – Схема расширения конфигурации GroundStar

гранулометрических параметров чистоты авиатоплива, с применением мультипараметрических преобразователей и вычислителей, основанных на одновременном (синхронном) использовании нескольких динамических методов прямых динамических измерений кондиционности (фотометрия кондуктометрия перепад давления), взаимодополняющих и повышающих результирующую точность и достоверность измерения параметров чистоты авиатоплива на всех этапах подготовки авиатоплива к заправке ВС.

На основе формирования базы данных о природе естественных загрязнителей, анализа истории онлайн мониторинга оценки чистоты и интеграции с лабораторной информационно-управляющей системой возможна реализация прогностического подхода к управлению безопасностью полетов, в соответствии с требованиями системы управления безопасностью (СУБП) – Safety Management System (SMS) (рисунок 36), способствующей непрерывному повышению безопасности полетов посредством определенных методов прогнози-рования аварийных ситуаций.



Рисунок 36 – Система управления безопасностью– Safety Management System (SMS)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе изложены новые научно обоснованные технические и технологические решения проблемы контроля качества авиатоплива с применением автоматизированной системы, разработана концепция новой системы дозирования ПВКЖ в авиатопливо, а также разработана адаптивная информационно-управляющая система авиатопливообеспечения ВС направленная на системную интеграцию топливозаправочного и аэропортового комплексов в условиях коллаборативного их взаимодействия, позволяющая реализацию прогностического подхода к управлению безопасностью и регулярностью полетов.

При решении заявленной проблемы получены следующие результаты.

1 На основании анализа нормативно-технической документации и статистических данных об инцидентах, авариях и катастрофах с ВС коммерческой ГА РФ в период с 2010 по 2023 год установлено, что одной из причин событий является недостаточный уровень промышленной чистоты авиатоплива, показатели которой строго регламентируются.

2 Установлено, что применяемые методы контроля кондиционности авиатоплива являются статическими и косвенными, и основаны на дифференцированном отборе проб из назначенных точек, точность и достоверность которых может быть недостаточной и имеют низкую степень автоматизации и интеграции в системы коллаборативного взаимодействия (аэропорт, ТЗК), что требует разработки и создания информационно-управляющих систем динамического мониторинга кондиционности заправляемого авиатоплива.

3 Выявлено, что существующие системы дозирования ПВКЖ топливозаправщика не автоматизированы, имеют низкую надежность, требуют постоянного трудоемкого и затратного контроля с высоким уровнем негативного влияния человеческого фактора, а применяемые дозаторы ПВКЖ в потоке топлива являются агрегатами зарубежного производства, которые в силу конструктивных и технологических недостатков осуществляют неравномерность дозирования жидкости и не позволяют осуществлять учёт отпущенной ПВКЖ в массовых единицах.

4 Разработана математическая модель с использованием дебаевских уравнений и формул Клаузиуса-Моссотти, позволяющая производить измерения уровня влагосодержания и концентрации механических примесей в авиатопливе, показавшая 97,5% сходимости при экспериментальном исследовании.

5 Установлены зависимости комплексной диэлектрической проницаемости авиатоплива от частоты электромагнитных колебаний и проводимости авиатоплива при различных значениях критической (резонансной) частоты, что позволяет реализовать динамическое измерение веса механических примесей в потоке авиатоплива, а также получена зависимость диэлектрической проницаемости водной эмульсии в авиатопливе от ее концентрации, позволяющая количественно оценить содержание свободной воды в авиатопливе.

6 Проведен расчёт параметров измерительных схем и размеры устройств измерителей – диэлькометрических фильтров мониторов, а также разработан гидравлический стенд для исследований их характеристик.

7 Установлено, что диэлектрическая проницаемость авиатоплива зависит от концентрации молекул диэлектрика и поляризуемости каждой молекулы, поэтому зависит от природы диэлектрика, температуры и от частоты приложенного напряжения, а максимум достигается в интервале $2 \dots 20 \text{ г/м}^3$.

8 Впервые разработано устройство динамического измерения гранулометрических и гравиметрических показателей мехпримесей в топливе с точностью до 0,5%, а также устройство динамического измерения количества нерастворенной (эмульсионной) воды в потоке авиатоплива на основе измерения комплексной диэлектрической проницаемости механических примесей и воды, что позволяет принимать адаптивные решения по выбору технологических режимов подготовки авиатоплива и его применения на ВС.

9 Разработан метод динамического измерения мехпримесей и воды в авиатопливе, что позволяет контролировать чистоту авиатоплива непрерывно в потоке, предоставляя мгновенные данные о его кондиционности для принятия решения о пригодности авиатоплива к заправке ВС и характеризующийся относительной погрешностью определения содержания мехпримесей не более 4,6 %.

10 Разработана адаптивная информационно-управляющая система (ИИУС) мониторинга чистоты авиатоплива на основе прямых динамических средств измерений, позволяющая в онлайн режиме иметь объективные данные о кондиционности авиатоплива на всех этапах авиатопливообеспечения ВС и осуществлять проектирования систем диспетчерского управления с целью принятия управленческих решений по применению авиатоплива на ВС.

11 Теоретически обоснована и разработана концепция новой системы дозирования ПВКЖ на основе гибридного сервошагового привода насоса-дозатора и программируемого логического контроллера, позволяющая автоматизировать процесс ее ввода в поток авиатоплива, снизить влияние человеческого фактора и повысить безопасность полетов, а также исключить недостатки существующих систем дозирования и обеспечить импортозамещение оборудования ТЗК.

12 Разработан прототип дозатора, на который получен патент РФ № 223152 и экспериментально подтверждены возможности создания системы дозирования ПВКЖ в авиатопливе, показавший высокую сходимость с нормативными показателями, а именно при нормативных дозах: $0,1 \pm 0,05\%$; $0,2 \pm 0,02\%$ и $0,3 \pm 0,03\%$.

13 Разработан опытный образец универсального дозатора ПВКЖ, позволяющий:

- обеспечивать высокую точность введения присадки ПВКЖ, за счет применения энкодера (датчика угла поворота) механически связанного с сервошаговым двигателем;
- дозирование как в объемных пропорциях, так и в пропорциях массовых единиц;
- интеграцию в систему как с объемными счетчиками, так и с массовыми расходомерами любых конструкций и исполнений (с индивидуальной калибровкой);
- вариативный выбор дозы присадки ПВКЖ (0,1; 0,2 и 0,3%), а также любой другой концентрации;
- проводить точную подстройку (компенсацию) за счет обратной связи с плотномером и детектором % содержания ПВКЖ, что позволяет решить существующую на сегодня техническую проблему с ежесменными проверками работоспособности дозатора.

14. Разработана методология системной интеграции топливозаправочного и аэропортового комплексов в условиях коллаборативного их взаимодействия на основе предложенной автоматизированной адаптивной информационно-управляющей системы авиатопливообеспечения ВС, позволяющая реализацию прогностического подхода к управлению безопасностью и регулярностью полетов.

Полученные результаты дают возможность дальнейшего совершенствования системы непрерывного контроля чистоты авиатоплива в системе ТЗК для его подготовки к заправке в ВС, а также обеспечения регулярности и безопасности полетов за счет системной интеграции взаимодействия топливозаправочного и аэропортового комплексов.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные публикации в изданиях, рекомендованных ВАК при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации (по транспорту):

1. Грядунов К. И., Браилко А. А., Балышин К. Э., Савушкин С. А., Харина В. К. Применение методов оценки термоокислительной стабильности реактивных топлив в гражданской авиации. // Научный вестник МГТУ ГА. - Т.26, №3. - 2023. - С. 38-52. DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-3-38-52

2. Савушкин С.А., Балышин К.Э., Козлов А.Н., Браилко А.А. Особенности эксплуатации авиационных топливозаправщиков в условиях Крайнего Севера. //Научный вестник МГТУ ГА. - Т.26, №5. – 2023. - С.53-64. DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-5-53-64
3. Браилко А.А., Самойленко В.М., Дружинин Н.А., Дружинин Л.А. Адаптивная информационно-управляющая система динамического мониторинга фактической обводненности авиатоплива в технологических процессах авиатопливообеспечения. // Научный вестник МГТУ ГА. -Т.25, №02. - 2022. -С. 20-29. DOI: 10.26467/2079-0619-2022-25-2-20-29
4. Браилко А.А., Громов О.В., Литинский Г.И., Громов В.К. Исследование рабочей зоны средств очистки авиатоплива при выполнении заправочных операций воздушных судов. // Научный вестник МГТУ ГА. -Т.24, №4. -2021. - С. 20-27. DOI: 10.26467/2079-0619-2021-24-4-20-27
5. Браилко А.А., Громов О.В., Дружинин Л.А. Цифровые технологии – база цифровой экономики топливозаправочных комплексов аэропортов гражданской авиации. // Научный вестник МГТУ ГА. -Т.23, №4. – 2020. - С. 20-32. DOI: 10.26467/2079-0619-2020-23-4-20-32
6. Браилко А.А., Дружинин Н.А., Самойленко В.М. Устройство непрерывного мониторинга чистоты авиатоплива в технологической схеме топливообеспечения воздушных судов. //Научный вестник МГТУ ГА. -Т. 20, № 06. – 2017. - С.44-53.
7. Браилко А.А. Автоматизированная система сокращения потерь от испарения и обводнения авиатоплива в резервуарах топливозаправочного комплекса. //Научный вестник МГТУ ГА. -Т.26, №1. – 2023. - С.22-33. DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-1-22-33
8. Браилко А.А. Кинетика накопления загрязнений в авиатопливе при технологическом процессе его подготовки для заправки в воздушные суда. //Научный вестник МГТУ ГА. - Т. 20, № 06. - 2017. -С.73-80.
9. Brailko A.A., Samoylenko V.M., Druzhinin N.A., Druzhinin L.A. Adaptive information management system of dynamic monitoring of actual water content in jet fuel in technological processes of aviation fuel supply. Civil Aviation High Technologies. 2022. T. 25. № 2. С. 20-29.
10. Brailko A.A., Gromov O.V., Litinsky G.I., Gromov V.K. Mathematical modeling of the process of functioning of objects and technical means of ensuring airfield control \ Civil Aviation High Technologies. 2021. T. 24. № 4. С. 20-27.

Патенты на изобретения:

1. Патент RU ПМ №223152, U1, МПК В67D 7/04 В64F 1/28 «Устройство дозирования противоводокристаллизационной жидкости (ПВКЖ) в авиатопливе» Браилко А.А. и др. (10 соавторов). Опубликовано от 02.02. 2024 г.
2. Патент RU ПМ №122491 РФ, МПК G01N 35/08, G01N 33/22 «Устройство для определения содержания воды в углеводородном топливе или в воздухе» /А.А. Браилко, Дружинин Н.А. Смутьский А.В./ Опубликовано от 27.11. 2012 г.
3. Патент RU №2502069, РФ, МПК G01N 33/22, B01D 25/00 «Способ определения содержания воды в углеводородном топливе и устройство для его осуществления» А.А. Браилко, Дружинин Н.А. Смутьский А.В. Опубликовано от 20.12. 2013 г.
4. Патент RU ПМ №141654, РФ, МПК G01N 33/22, B01D 25/00. «Устройство контроля содержания механических примесей в жидкости и система мониторинга содержания механических примесей в потоке жидкости». / Браилко А.А. и др. (5 соавторов). Опубликовано от 30.04. 2014 г.
5. Патент RU №2563813, РФ, МПК G01N 33/22 «Способ контроля содержания механических примесей в жидкостях, для его осуществления и система мониторинга содержания механических примесей в потоке жидкости». Браилко А.А. Дружинин Н.А. (7 соавторов), Опубликован от 26.08.2015.
6. Патент RU 2673004 C1, РФ, МПК В65D 90/28 «Дыхательная система резервуара для легкоиспаряющихся жидкостей» А.А. Браилко, Н.А. Дружинин, Л.А. Дружинин, А.В. Смутьский/ Опубликовано от 29.08.2018 г.
7. Патент RU ПМ №182746 U1, РФ, МПК В65D 90/28 «Дыхательная система резервуара для легкоиспаряющихся жидкостей» А.А. Браилко, Н.А. Дружинин, Л.А. Дружинин, А.В. Смутьский/ Опубликовано от 21.11.2018 г.

Научные публикации на конференциях:

1. Браилко, А.А., Козлов, А.Н., Грядунов, К.И., Балышин, К.Э., Савушкин, С.А. «Разработка дозатора противоводокристаллизационной жидкости в интеграции с массовым расходомером». В книге: Гражданская авиация на современном этапе развития науки, техники и общества. Сборник

тезисов докладов Международной научно-технической конференции, посвященной 100-летию отечественной гражданской авиации. Москва, 2023. С. 65-66.

2. Браилко, А.А., Айрапетов, С.Н., Зубов, О.Е., Бальшин, К.Э. «Экспериментальное исследование и оптимизация параметров неполнопоточного контрольного фильтра для непрерывного мониторинга чистоты авиатоплива». В книге: Гражданская авиация на современном этапе развития науки, техники и общества. Сборник тезисов докладов Международной научно-технической конференции, посвященной 100-летию отечественной гражданской авиации. Москва, 2023. С. 87-89.

3. Грядунов, К.И., Браилко, А.А., Козлов, А.Н., Марчук, Н.В. «Обеспечение кондиционности авиационных топлив при использовании ПВКЖ». В книге: Гражданская авиация на современном этапе развития науки, техники и общества. Сборник тезисов докладов Международной научно-технической конференции, посвященной 100-летию отечественной гражданской авиации. Москва, 2023. С. 95-97.

4. Бальшин К.Э., Браилко А.А. Процедурный тренажёр как инструмент реализации повышения профессиональных компетенций специалистов ОАТО. МГТУ ГА. Наука. Техника. Человек: исторические, мировоззренческие и методологические проблемы. 2023. Т. 1. № 13. С. 325-333.

Публикации в других изданиях:

1. Браилко, А.А., Смульский А.В. Оценка остаточного ресурса фильтроэлементов// Информационный сборник Ассоциации организаций авиатопливообеспечения воздушных судов гражданской авиации. М., Ассоциация ОАТО ВС ГА № 8, 2013, С. 66-69.

2. Васильев, С.Б., Браилко А.А. Практические вопросы строительства ЦЗС в аэропорту Внуково. // Информационный сборник Ассоциации организаций авиатопливообеспечения воздушных судов гражданской авиации. М., Ассоциация ОАТО ВС ГА №6, 2011, С.21-23.

3. Васильев С.Б., Браилко А.А., Дружинин Н.А. Особенности строительства объектов ТЗК в аэропорту Внуково. / Информационный сборник Ассоциации организаций авиатопливообеспечения воздушных судов гражданской авиации. М., Ассоциация ОАТО ВС ГА. №7, 2012, С.34-39.

4. Васильев С.Б., Браилко А.А., Дружинин Н.А. Внуково принимает суперлайнеры, // Информационный сборник Ассоциации организаций авиатопливообеспечения воздушных судов гражданской авиации М., Ассоциация ОАТО ВС ГА №8, 2013, С.34-39.

5. Васильев С.Б. Браилко А.А. Толстова Л.В. Качество на земле – безопасность в воздухе. // Информационный сборник Ассоциации организаций авиатопливообеспечения воздушных судов гражданской авиации. М., Ассоциация ОАТО ВС ГА №8, 2013, С.62-63.

6. Васильев С.Б. Браилко А.А. Дружинин Н.А. На крыльях времени, Информационный сборник Ассоциации организаций авиатопливообеспечения воздушных судов гражданской авиации. // М., Ассоциация ОАТО ВС ГА №9, 2014 г, С.56-59.

7. Васильев С.Б. Браилко А.А. Дружинин Н.А. Реконструкция комплекса авиатопливообеспечения аэропорта «Внуково» // М., Аэрокосмический курьер 6(83)2012 С.38-40.

8. Браилко, А. А., Елисеев Б. П., Жаркова В., Немец В. Теоретические предварительные исследования контроля качества авиационного топлива как инструмента обеспечения безопасности полетов воздушных судов гражданской авиации / Acta Avionica Journal, Декабрь 2020 года, Том XXII, 43 – № 2 технического университета Кошице (Словакия) <http://acta-avionica.tuke.sk>

Соискатель



Браилко А. А.