

Е.В. Дятлова

*Ульяновский институт гражданской авиации имени Главного маршала
авиации Б.П. Бугаева, г. Ульяновск, Россия*

К.А. Калякина

*Ульяновский институт гражданской авиации имени Главного маршала
авиации Б.П. Бугаева, г. Ульяновск, Россия*

О.А. Белоусов

*Ульяновский институт гражданской авиации имени Главного маршала
авиации Б.П. Бугаева, г. Ульяновск, Россия*

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ ДЛЯ НЕПРЕРЫВНОГО МОНИТОРИНГА ОСТАТКОВ И КАЧЕСТВА АВИАТОПЛИВА В ТОПЛИВОЗАПРАВОЧНОМ КОМПЛЕКСЕ АЭРОПОРТА

Аннотация. Статья посвящена цифровой трансформации системы управления запасами и качеством авиатоплива на топливозаправочных комплексах (ТЗК). В работе проведен анализ технологических разрывов традиционных методов контроля, основанных на ручных замерах уровня авиатоплива в резервуарах и отборе проб. Предложена архитектура промышленного интернета вещей (IoT), включающая три ключевых измерительных компонента: массовые кориолисовые расходомеры, оптические анализаторы чистоты топлива и измерительную систему «Струна+». Обосновано влияние данных технологий на ключевые показатели эффективности (KPI) ТЗК, проведен анализ технических и нетехнических барьеров внедрения и предложены пути их преодоления.

Ключевые слова: авиатопливо, Интернет вещей (IoT), кибербезопасность, КПЭ (KPI), мониторинг качества, плотность, система «Струна+», топливозаправочный комплекс (ТЗК), чистота.

Abstract. The article is devoted to the digital transformation of the aviation fuel inventory and quality management system at refueling complexes. The paper analyzes the technological gaps of traditional control methods based on manual measurements of the level of jet fuel in tanks and sampling. The architecture of the industrial Internet of Things (IoT) is proposed, which includes three key measuring components: mass coriolis flowmeters, optical fuel purity analyzers and the String+ measuring system. The influence of these technologies on key performance indicators (KPIs) is substantiated. Technical and non-technical barriers to implementation have been analyzed and ways to overcome them have been proposed.

Keywords: jet fuel, Internet of Things (IoT), cybersecurity, KPI, quality monitoring, density, String+ system, refueling complex, cleanliness.

Введение

Современный топливозаправочный комплекс (ТЗК) аэропорта представляет собой сложную логистическую систему, связывающую склады горюче-смазочных материалов (ГСМ), трубопроводный транспорт и парк топливозаправочной техники. Обеспечение бесперебойности заправки воздушных судов (ВС) является критической задачей авиационной безопасности, поскольку отказ ТЗК в «час пик» приводит к каскадным задержкам рейсов и многомиллионным убыткам.

Традиционная модель управления остатками и качеством топлива базируется на двух устаревающих парадигмах: дискретном измерении уровня в резервуарах и ручном отборе проб. Парадигма «ручного контроля» входит в противоречие с динамикой современного хаба, где время оборачиваемости резервуара сокращается до нескольких часов.

Внедрение технологий промышленного интернета вещей (Industrial IoT) позволяет перейти от периодического контроля к непрерывному мониторингу состояния топлива in-line (в потоке) и in-tank (в резервуаре). Цель данной работы – обоснование выбора конкретных технологических решений IoT,

анализ их влияния на КРІ ТЗК, выявление барьеров внедрения и разработка предложений по цифровизации топливной инфраструктуры.

Основная часть

Анализ проблематики и целевые КРІ

Анализ операционной деятельности типового ТЗК позволяет выделить три «слепые зоны», порождающие риски:

1. **Динамика расслоения топлива.** При хранении в резервуарах, особенно в условиях перепада температур, возможно образование градиента плотности.

2. **Контроль механических примесей.** Традиционный контроль отбора проб на содержание свободной воды и мехпримесей является точечным. Одиночная проба не гарантирует чистоту всей партии, перекачиваемой через систему фильтрации.

3. **Погрешность коммерческого учета.** Разница между данными бухгалтерского (по уровню) и массового учета приводит к дебалансам и скрытым потерям при приеме, хранении и выдаче авиатоплива.

Для количественной оценки эффективности цифровизации определены следующие целевые КРІ ТЗК:

- **КРІ-1:** минимизация риска инцидентов, связанных с попаданием некондиционного топлива в баки ВС (цель: нулевая частота событий);
- **КРІ-2:** снижение потерь от испарения и несливаемых остатков (цель: уменьшение на 0,5-1,5%);
- **КРІ-3:** увеличение точности инвентаризации (управление остатками).

Решение: технологии промышленного интернета вещей

Для создания цифрового двойника топливной системы предлагается интеграция трех реально существующих классов устройств и систем в единую IoT-платформу ТЗК.

1. Лазерный анализатор чистоты топлива (PAMAS S40 Portable, в стационарной интеграции)

Функционал. Автоматический счетчик частиц, работающий по принципу светоблокировки (светозранирования). Прибор встраивается в байпасную линию основной магистрали.

Измеряемые параметры. Анализатор классифицирует и считает твердые частицы в диапазонах >4 мкм, >6 мкм, >14 мкм и >21 мкм по стандарту ISO 4406 / ГОСТ 17216. Это ключевой параметр авиационной чистоты: попадание микрочастиц в топливный двигатель самолета критически опасно. Данные передаются в систему для анализа тренда загрязнения и прогноза остаточного ресурса фильтроэлементов.

2. Массовый кориолисовый расходомер Micro Motion 5700

Функционал. Датчик монтируется на трубопроводной обвязке выхода из резервуарного парка или на входе в фильтрационный блок. Устройство одновременно измеряет массовый расход, плотность авиатоплива и температуру.

Измеряемые параметры. В режиме реального времени датчик фиксирует отклонение плотности от эталонной. При попадании в топливо подтоварной воды плотность смеси мгновенно скачет вверх (вода имеет плотность ~ 1000 кг/м³), что вызывает срабатывание предаварийной сигнализации. Это позволяет детектировать водоземulsionный «линзовый» слой, который невозможно зафиксировать точечным отбором проб.

3. Система измерительная «Струна+»

Функционал. «Струна+» представляет собой отечественную резервуарную систему коммерческого учета, предназначенную для непрерывного автоматического измерения параметров нефтепродуктов в вертикальных и горизонтальных резервуарах. Система включает многоточечные датчики температуры (до 16 точек по высоте), прецизионные гидростатические датчики давления и контроллер вычисления параметров. В контексте IoT ТЗК «Струна+» выступает как интеллектуальный узел сбора и

передачи данных по цифровым протоколам (Modbus TCP, Ethernet/IP) в SCADA-систему верхнего уровня.

Измеряемые параметры. Система в реальном времени рассчитывает:

- уровень взлива топлива и уровень раздела сред «топливо-подтоварная вода» с точностью до ± 1 мм;
- среднюю температуру продукта (по массиву датчиков);
- плотность топлива (гидростатическим методом, по перепаду давления);
- массу брутто и нетто продукта с учетом фактической плотности и температурной коррекции.

Критически важной функцией является автоматическое обнаружение и количественная оценка подтоварной воды в донной части резервуара. В отличие от ручного замера водочувствительной пастой, «Струна+» выдает дискретный сигнал о высоте слоя воды, позволяя предотвратить ее попадание в трубопровод на выдачу. В совокупности с кориолисовым расходомером, измеряющим плотность в потоке, система создает дублирующий контур контроля качества и количества, что полностью исключает выпуск некондиционного топлива из резервуарного парка.

Анализ улучшения KPI ТЗК

Внедрение описанной системы IoT приводит к синергетическому улучшению операционных показателей.

Влияние на KPI-1 (безопасность заправки):

Это наиболее значимый эффект. Лазерный анализатор PAMAS блокирует выдачу топлива в аэродромный топливозаправщик или гидрантную систему при скачке класса чистоты (например, при разрушении фильтроэлемента). Датчик плотности расходомера и гидростатические датчики «Струны+» совместно отслеживают появление воды. Исключается человеческий фактор («не заметил», «не проверил»).

Влияние на KPI-2 (снижение потерь):

Массовые расходомеры Emerson обеспечивают учет топлива «в массе», а не в объеме, что нивелирует погрешность температурного расширения. Система «Струна+» дает прямые массовые остатки в резервуарах с точностью до 0,1% (класс точности А по ГОСТ 8.595). Сопоставление массы, отгруженной через расходомер, и изменения массы в резервуаре по данным «Струны+» позволяет выявлять дебаланс в реальном времени. Выявление несливаемого остатка или утечек происходит немедленно, а не по итогам инвентаризации раз в месяц. Система позволяет экономить до 1% годового оборота за счет исключения «бумажных» пересортиц и переливов.

Влияние на KPI-3 (управление остатками):

Многоточечная термометрия «Струны+» и расчет массы в реальном времени позволяют начальнику смены ТЗК видеть точные коммерческие остатки топлива без выхода авиатехника по ГСМ на резервуар в любую погоду. Это повышает оперативность планирования приемки и отгрузки, исключая простои ТЗК из-за неожиданного опустошения резервуаров.

Барьеры внедрения и пути их преодоления

Несмотря на зрелость описанных технологий, их внедрение в авиатопливную отрасль сталкивается со специфическими барьерами.

Технические барьеры

1. Гидроудары и вибрации. Магистральные насосы большой мощности создают вибрации и пульсации потока, снижающие точность массометров. В резервуарах динамические нагрузки при закачке могут создавать колебания уровня, внося погрешности в работу гидростатической системы.

- Решение: монтаж кориолисового датчика на антивибрационных опорах, программная компенсация пульсаций (алгоритмы API MPMS). Для «Струны+» – включение в алгоритм обработки временного демпфирования и усреднения за период не менее 30 секунд, синхронизированного с графиком работы насосов.

2. Обрастание датчиков. Оптические окна лазерных анализаторов частиц в реальных условиях авиатоплива подвержены образованию пленок и смолистых отложений (особенно при наличии присадок). Гидростатические датчики «Струны+» могут быть подвержены заиливанию импульсных линий, что приведет к дрейфу показаний плотности.

- Решение: реализация контура автоматической промывки измерительной кюветы РАМАС в байпасе с периодичностью, защитой в алгоритм. Для «Струны+» – применение мембранных разделителей с защитным покрытием и периодическая продувка импульсных трубок инертным газом.

3. Электромагнитная совместимость и взрывозащита. Кориолисовые расходомеры, лазерный анализатор и датчики системы «Струна+» должны монтироваться во взрывоопасных зонах класса В-1г (зона 1). Любое искрение неприемлемо.

- Решение: использование приборов с активным взрывозащитным барьером «искробезопасная цепь» (Ex ia). Прокладка резервированных оптоволоконных линий для передачи данных между насосной и серверной станцией для гальванической развязки.

Нетехнические (регуляторные и организационные) барьеры

1. Квалификация персонала. Службы ГСМ укомплектованы операторами с компетенциями в механике, но не в ИТ. Сложная многопараметрическая система «Струна+», требующая понимания гидростатического принципа и настройки температурной коррекции, вызывает недоверие и отторжение.

- Решение: создание дублированного человеко-машинного интерфейса SCADA с визуализацией измерений в привычных единицах (мм уровня, тонны массы, проценты подтоварной воды) и автоматической «подсказкой» оператору. Корпоративное обучение специалистов ТЗК основам цифровой диагностики и принципам работы системы учета.

2. Кибербезопасность критической инфраструктуры (КИИ).

Подключение датчиков расхода, лазерного анализатора и контроллера «Струны+» к единой шине данных ТЗК делает систему учета уязвимой для кибератак, которые могут исказить коммерческие остатки или санкционировать выдачу некондиции.

- Решение: сегментирование сети (разделение промышленной шины Profinet/Modbus TCP и офисной сети). Применение межсетевых экранов, сертифицированных для АСУ ТП, а также односторонних диодных шлюзов передачи данных для исключения возможности несанкционированного воздействия на исполнительные механизмы.

3. Нормативный консерватизм. Традиционная процедура контроля топлива жестко регламентирована ведомственными документами, предписывающими ручной отбор проб в бутылку и визуальный контроль качества «на глаз». Признание автоматического оптического счетчика RAMAS и гидростатической системы «Струна+» в качестве арбитражных методов пока не закреплено в отечественной нормативной базе для проведения контроля качества и коммерческого акта приема-передачи.

- Решение: на первом этапе внедрять систему не как арбитражную, а как информационно-предупредительную (дублирующую). Параллельно вести валидацию данных и инициировать внесение изменений в отраслевые стандарты, доказывая сходимость результатов лазерной гранулометрии с весовым методом, а «Струны+» – с ручными замерами по ГОСТ.

Эффекты от внедрения

Экономическая модель внедрения IoT на среднем ТЗК (объемом перевалки около 300 000 тонн авиатоплива в год) показывает следующие прогнозные эффекты:

1. Эффект «прозрачности топлива». Для авиакомпаний внедрение данных стандартов является показателем культуры безопасности наземного обслуживания, что повышает конкурентоспособность ТЗК в аэропортах, где присутствуют альтернативные операторы заправки.

2. Эффект автоматизации арбитража. При расхождении массы принятого топлива с документами поставщика система генерирует отчет-протокол на основе массомера и данных «Струны+», что позволяет выигрывать споры с НПЗ и транспортными компаниями. Сочетание динамического (в трубе) и статического (в резервуаре) методов измерений создает надежную доказательную базу.

3. Эффект сокращения несливаемых остатков и потерь. За счет точного контроля уровня системой «Струна+» и плотности в потоке (Emerson 5700) при сливе автоцистерн экономия составляет до 0,25% от объема приемки. В денежном выражении это составляет десятки миллионов рублей ежегодно при текущих биржевых ценах на авиатопливо.

Выводы

1. Традиционная система контроля качества и учета остатков авиатоплива в ТЗК исчерпала резервы повышения эффективности ввиду высокой зависимости от человеческого фактора.

2. Применение промышленных IoT-технологий (кориолисовый массомер, оптический счетчик частиц, автоматизированная система «Струна+») позволяет создать контур непрерывного мониторинга качества топлива «от приемного патрубка до крыла самолета», включающий измерение массы, плотности, чистоты и уровня подтоварной воды.

3. Главным техническим вызовом является обеспечение стабильности измерений в условиях вибрации и загрязнения чувствительных элементов, что решается конструктивными доработками, алгоритмической компенсацией и регламентом продувок/промывок.

4. Главным нетехническим барьером остается нормативное закрепление данных средств измерения как доверительных для оформления авиационной документации, что требует межведомственной кооперации и адаптации стандартов.

Предложения

1. **По пилотированию:** внедрить описанную архитектуру в качестве пилотного проекта на одном из узловых аэропортов с созданием «цифрового полигона ТЗК». Особое внимание уделить интеграции «Струны+» с существующими АСУ ТП резервуарных парков и валидации ее данных с ручными замерами в течение года.

2. **По стандартизации:** инициировать разработку ГОСТ Р на «автоматические системы контроля чистоты, обводненности и массы авиационных топлив в резервуарах и потоке», гармонизированного с международными стандартами ASTM D7619 (счетчики частиц) и рекомендациями OIML R 85 для систем измерений уровня и массы в резервуарах.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare that there is no conflict of interest.

Список источников

1. Бодырев А.В. Типовые решения по автоматизации складов ГСМ и нефтепродуктов // Журнал «ИСУП». – 2020. - № 5 (89). – С. 63-67. – URL: <http://isup.ru/articles/2/1609>.

2. Клокотов И.Ю. Актуальность внедрения автоматизации технологических процессов и производств на современном этапе развития нашего общества // Международный журнал прикладных наук и технологий «Integral». – 2019. – № 1. – С. 143-147. – URL: <https://cyberlenika.ru/article/n/aktualnost-vnedreniya-avtomatizatsii-tehnologicheskikh-protsessov-i-proizvodstv>.

3. Король Р., Дубинский В., Витковский С., Тайлаков С., Быстров И. Автоматизация склада ГСМ // Журнал: Разработка / Нефтегазовая промышленность. – 2017. – СТА 1. – С. 32-43. – URL: <http://cta.ru/articles/cta/otrasli>.

4. Горбоконенко В.Д., Шикина В.Е. Массовый кориолисовый расходомер // Вестник УлГТУ. – 2005. – №3 (31). – с. 75. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/massovyy-koriolisovyy-rashodomer>.

5. Шувалов Г. В. Приборы экспресс-анализа нефтепродуктов // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2007. – №2. – с. 56-61 – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/pribory-ekspress-analiza-nefteproduktov>.

6. Паничкин Г. Н., Миронычев Д. А., Каргин К. А. Цифроизация технологического процесса и документооборота предприятия авиатопливообеспечения // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. – 2020. – №6-2 – с. 60-62 – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tsifroizatsiya-tehnologicheskogo-protssesa-i-dokumentooborota-predpriyatiya-aviatoplivoobespecheniya>.

References

1. Bodyrev A.V. Standard solutions for automation of fuel and petroleum products warehouses // ISUP magazine". – 2020. - № 5 (89). – Pp. 63-67. – URL: <http://isup.ru/articles/2/1609>

2. Klokotov I.Y. The relevance of the introduction of automation of technological processes and production at the present stage of development of our society // International Journal of Applied Sciences and Technologies "Integral". – 2019. – № 1. – Pp. 143-147. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/aktualnost-vnedreniya-avtomatizatsii-tehnologicheskikh-protsessov-i-proizvodstv>.

3. Korol R., Dubinsky V., Vitkovsky S., Tailakov S., Bystrov I. Automation of the fuel and lubricants warehouse // Journal: Development / Oil and gas industry. – 2017. – STA 1. – PP. 32-43. – URL: <http://cta.ru/articles/cta/otrasli>.

4. Gorbokonenko V.D., Shikina V.E. Mass coriolis flow meter // Bulletin of UISTU. – 2005. – №3 (31). – p. 75. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/massovyy-koriolisovyy-rashodomer>.

5. Shuvalov G. V. Devices for express analysis of petroleum products // Interexpo Geo-Siberia. - 2007. – No. 2. – pp. 56-61 – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/pribory-ekspress-analiza-nefteproduktov>.

6. Panichkin G. N., Mironychev D. A., Kargin K. A. Digitalization of the technological process and document management of an aviation fuel supply company // International Journal of Humanities and Natural Sciences, 2020, No.6-2– pp. 60-62– URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tsifroizatsiya-tehnologicheskogo-protssessa-i-dokumentoooborota-predpriyatiya-aviatoplivoobespecheniya>

Информация об авторах

Дятлова Екатерина Владимировна, студент 2-го курса, Ульяновский институт гражданской авиации имени Главного маршала авиации Б.П. Бугаева, Ульяновск, Россия.

Калякина Ксения Алексеевна, студент 2-го курса, Ульяновский институт гражданской авиации имени Главного маршала авиации Б.П. Бугаева, Ульяновск, Россия.

Белюсов Олег Анатольевич, студент 2-го курса, Ульяновский институт гражданской авиации имени Главного маршала авиации Б.П. Бугаева, Ульяновск, Россия.

Authors information

Dyatlova Ekaterina V., second-year student, Ulyanovsk Institute of Civil Aviation named after Chief Marshal of Aviation B. P. Bugaev, Ulyanovsk.

Kalyakina Ksenia A., second-year student, Ulyanovsk Institute of Civil Aviation named after Chief Marshal of Aviation B. P. Bugaev, Ulyanovsk.

Belousov Oleg A., second-year student, Ulyanovsk Institute of Civil Aviation named after Chief Marshal of Aviation B. P. Bugaev, Ulyanovsk.