

ПРИМЕНЕНИЕ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ДЛЯ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ТРУБОПРОВОДОВ

А.А. Смыслов, студент

Российский государственный университет нефти и газа имени И.М. Губкина
(Россия, г. Москва)

DOI:10.24412/2500-1000-2026-5-1-379-385

Аннотация. В статье рассматриваются актуальные подходы к обеспечению целостности трубопроводного транспорта через интеграцию беспилотных летательных аппаратов в системе технического надзора. Традиционные методы инспекции, сопряженные с высокими временными затратами и неэффективностью при масштабировании, уступают место автоматизированным решениям, обеспечивающим оперативную диагностику в труднодоступных географических зонах. Систематизирован российский и международный опыт эксплуатации авиационных комплексов, оснащенных специализированным навесным оборудованием: тепловизорами, лазерными сканерами и газоанализаторами. Особое внимание уделено вопросам предиктивного анализа рисков, методам защиты от несанкционированных вмешательств и внедрению алгоритмов искусственного интеллекта для автоматизированной обработки данных. В работе проанализированы технологические барьеры, препятствующие повсеместному переходу к автономному мониторингу, в частности, ограничения по длительности полета и зависимость от неблагоприятных метеорологических условий. Предложены перспективные пути решения данных проблем, включая использование гибридных силовых установок и развитие краевых вычислений. Делается вывод, что роботизированный надзор является необходимым условием минимизации экологических катастроф и обеспечения операционной эффективности нефтегазового сектора.

Ключевые слова: беспилотные летательные аппараты; мониторинг трубопроводов; предиктивный контроль; нефтегазовая отрасль; автоматизация; дистанционное зондирование; искусственный интеллект; экологическая безопасность; техническая дефектоскопия.

Обеспечение непрерывного контроля за состоянием распределительных сетей углеводородов составляет базис технологической устойчивости добывающих сетей. Традиционный визуальный обход, сопряженный с колоссальными временными затратами, обнаруживает явную несостоятельность при масштабировании магистралей, поскольку растущая протяженность транспортных артерий требует скорейшего внедрения гибких автоматизированных решений. Инспекция силами пеших патрулей неэффективна. Объективным шагом эволюции систем технического надзора выступает привлечение беспилотной авиации, так как своевременное выявление дефектов на ранних стадиях позволяет минимизировать экологический ущерб.

Аварийные ситуации (включая неконтролируемые утечки метана или сырой нефти) парализуют работу целых кластеров. Нарастающая аварийность указывает на прогрессирующий износ инфраструктуры. Своевремен-

ный мониторинг исправляет текущее положение дел, при этом дистанционное зондирование обеспечивает оперативный сбор сведений о геометрии трассы. Применение специализированного навесного оборудования (такого как тепловизоры, газоанализаторы и лазерные сканеры) переводит инспекционные мероприятия на принципиально иной качественный уровень. Интеграция авиационных комплексов в структуру надзорных ведомств нефтегазового сектора формирует гибкую систему предиктивного анализа рисков, благодаря чему посредством регулярных облетов достигается высокая частота актуализации карт местности. Полагаем, что непрерывность дистанционного контроля способна компенсировать нехватку наземного персонала.

Анализ рисков и специфика дефектоскопии трубопроводного транспорта в современных условиях

Эксплуатация разветвленной сети продуктопроводов протекает в условиях постоянного

воздействия агрессивной внешней среды. Транспортировка углеводородов на значительные расстояния сопряжена с преодолением сложных географических зон (включая бо-

лотистые низины, горные хребты и зоны вечной мерзлоты). Коррозионные процессы постепенно разрушают металл стенок, провоцируя возникновение свищей (рис. 1).



Рис. 1. Утечка газа из трубопровода

Негативное влияние оказывают и динамические колебания грунта, вызывающие критические деформации линейной части сооружений. Согласно мнению А.В. Прохорова и И.В. Носкова, постоянный инструментальный контроль позволяет предотвратить масштабное загрязнение прилегающих территорий [5].

Пропускная способность систем напрямую зависит от оперативности выявления деструктивных факторов, в то время как устаревание фондов диктует жесткие требования к частоте обследований. Локальные повреждения изоляционного слоя влекут за собой ускоренное развитие коррозии под воздействием почвенного электролита. Фиксация подобных аномалий стандартными методами затруднена ввиду глубокого залегания некоторых участков, но внедрение сканирующих модулей способно эффективно решить проблему обнаружения скрытых очагов ржавления. Наземные бригады физически не способны оперативно обследовать тысячи километров трассы, пролегающей через труднопроходимую тайгу или заболоченные территории.

Риск человеческого фактора (выражающийся в невнимательности оператора и усталости при длительных переходах) существенно снижает общую достоверность получаемых отчетов и соответственно требуется автоматизация. Вследствие этого необходима

автоматизация сбора первичных пространственных данных, так как наличие оперативной информации позволяет диспетчерским службам вовремя снижать давление в поврежденном контуре.

Внутреннее давление в магистральных достигает критических значений, усугубляя опасность внезапного разрыва дефектного шва. Даже микроскопическая трещина под действием постоянной пульсации потока трансформируется в полноценный разрыв (сопровожающийся залповым выбросом перекачиваемого продукта). Разрушение происходит мгновенно. Предотвратить подобный аварийный сценарий помогает своевременная ультразвуковая или магнитная дефектоскопия.

Однако запуск внутритрубных приборов инспекторов не всегда возможен из-за конструктивных особенностей старых веток, и в таких обстоятельствах внешнее бесконтактное зондирование становится безальтернативным вариантом. Проведение аэросъемки позволяет сформировать цифровую модель рельефа вдоль всей охранной зоны, причем данный подход значительно облегчает идентификацию оползневых процессов, угрожающих целостности опор.

Учитываем также фактор антропогенного воздействия, выражающийся в несанкционированных врезках или проведении незакон-

ных земляных работ вблизи коммуникаций. Злоумышленники используют изоэшелонные методы маскировки точек отбора топлива, поэтому регулярное патрулирование с воздуха лишает нарушителей возможности скрытного ведения деятельности. Механические повреждения ковшем экскаватора при случайном контакте с трубой занимают лидирующие позиции в структуре причин аварийности. Оперативное оповещение о появлении тяжелой техники в охранной зоне полностью исключает техногенные инциденты. Постоянное присутствие средств наблюдения в воздухе дисциплинирует подрядные организации.

Экологические последствия разливов нефти ликвидируются годами, требуя колоссальных финансовых затрат на рекультивацию земель. Загрязнение водных артерий наносит непоправимый вред локальной экосистеме. Жесткий нормативный контроль со стороны государства заставляет недропользователей искать новые инструменты контроля. Использование классической пилотируемой авиации (включая вертолеты Ми-8) обходится слишком дорого, накладывая серьезные ограничения на регулярность вылетов. Малая беспилотная авиация полностью лишена указанного экономического недостатка, гарантируя при этом сопоставимое качество визуализации данных. Переход на автоматический режим мониторинга видится логичным развитием систем корпоративной безопасности. Рассчитываем, что усиление контроля за охраняемыми зонами снизит частоту аварий по вине сторонних лиц.

Российский опыт применения беспилотных комплексов на объектах нефтегазового сектора

Отечественная практика внедрения беспилотных систем характеризуется адаптацией оборудования к суровым климатическим условиям Севера и Арктики. Российские разработчики делают упор на создание комплексов самолетного типа, способных находиться в воздухе несколько часов. Проведение геодезических изысканий в условиях низких температур требует применения специальных морозостойких аккумуляторов и композитных материалов.

В арктических регионах, где наземный доступ заблокирован большую часть года, авиация становится ключевым средством инспек-

ции. Как отмечают в своей работе Р.Е. Левитин, С.Е. Аксенов, Н.С. Ульяновкин и А.П. Терешонок, геодезическое сопровождение надземных участков в Заполярье эффективно реализуется именно за счет беспилотных платформ [4]. Удаленный сбор данных минимизирует нахождение персонала на опасных производственных объектах.

Внедрение отечественных разработок (например, комплексов «Орлан» или «Supercam») позволило крупным сырьевым корпорациям перевести значительную часть трубопроводного фонда на предиктивный контроль. Тепловизионная съемка, выполняемая в зимний период, отчетливо фиксирует места утечек газа за счет температурного контраста. Нагретый газ, вырываясь из трещины, формирует тепловой шлейф на фоне промерзшего грунта, и систематизация подобных снимков позволяет выстраивать точные модели износа инфраструктуры. Практические результаты подтверждают кратное сокращение времени реагирования аварийных бригад. Интеграция полученных ортофотопланов в корпоративные геоинформационные системы существенно упрощает управление пространственными активами.

Вопросам нормативно-правового регулирования полетов в воздушном пространстве Российской Федерации уделяется повышенное внимание. Получение разрешений на использование воздушного пространства долгое время сдерживало массовое внедрение беспилотных технологий. Ситуация меняется благодаря созданию специальных экспериментальных правовых режимов в ряде регионов. Научные исследования, проводимые А.И. Коровкиной и А.А. Казарцевой, подтверждают необходимость оптимизации регламентов использования авиации в промышленных целях [3]. Упрощение процедур согласования полетных заданий стимулирует коммерческий сектор активнее инвестировать в беспилотную инфраструктуру. Российские предприятия формируют собственные внутренние службы летной эксплуатации.

Анализ опыта эксплуатации показывает, что использование беспилотников снижает операционные издержки на обход трасс примерно в три-четыре раза. Вместо содержания раздутого штата линейных обходчиков компания содержит мобильный отряд операторов.

Дальнейшая автоматизация процессов (включая использование автоматических дронопортов) полностью исключит человека из цепочки сбора данных. Дронопорты, размещенные вдоль нитки нефтепровода через каждые пятьдесят километров, способны осуществлять автономный взлет, посадку и зарядку аппаратов по расписанию. Полученная видеoinформация передается по спутниковым каналам связи в центральный аналитический хаб.

Особое значение имеет контроль переходов трубопроводов через крупные водные преграды. Размыв береговых линий или оголение подводной части трубы несет колоссальную угрозу. Аэросъемка высокого разрешения дает возможность отслеживать динамику изменения береговой черты с точностью до нескольких сантиметров. Своевременная фиксация опасных тенденций позволяет провести берегоукрепление до момента повреждения конструкции.

Таким образом, отечественный опыт доказывает высокую эффективность превентивных мер, основанных на данных беспилотного зондирования. Предполагаем, интеграция дронопортов в единую сеть станет главным драйвером развития отрасли на ближайшее десятилетие.

Международная практика мониторинга трубопроводов и автоматизация процессов обработки данных

Зарубежный опыт характеризуется глубокой интеграцией алгоритмов искусственного интеллекта и машинного обучения в процесс анализа полетных данных. Ведущие мировые операторы отказываются от ручного просмотра многочасовых видеозаписей, перекладывая рутинную задачу на нейросети. Бортовые вычислители современных аппаратов способны распознавать отклонения непосредственно в ходе выполнения полетного задания. Использование передовых моделей для детекции объектов демонстрирует впечатляющие результаты. В частности, исследователи I.A. Aromoye, L.H. Hiung, P. Sebastian, A.O. Balogun и L.S. Ayinla описывают успешное применение алгоритмов YOLOv8 для автоматического слежения за траекторией трубы и выявления аномалий [6]. Автоматизация обработки сокращает задержку между обна-

ружением дефекта и принятием управленческого решения.

Применение зарубежными компаниями полетов за пределами прямой видимости оператора (в режиме BVLOS) позволяет обследовать протяженные участки за один вылет. Дальность полетов возрастает. Названный подход требует наличия надежных каналов спутниковой связи и продвинутых систем предотвращения столкновений в воздухе. Внедрение подобных технологических решений существенно повышает производительность труда. Исследования, авторами которых выступили H. Keshk и A. Abdallah, показывают эффективность развертывания нейросетевых моделей на легких бортовых компьютерах для распознавания визуальных дефектов в режиме реального времени [7]. Использование компактных вычислительных платформ снижает требования к грузоподъемности летательного аппарата, и, следовательно, уменьшается общая стоимость летного часа.

Западные стандарты безопасности (включая требования американского регулятора PHMSA) обязывают компании вести непрерывный мониторинг эмиссии парниковых газов. Особое внимание уделяется утечкам метана, обладающего высоким потенциалом глобального потепления. Спектрометры, устанавливаемые на беспилотных платформах, фиксируют концентрацию газов в атмосфере с высокой точностью. Внедрение подобных строгих экологических стандартов в других странах послужит катализатором развития рынка аналитического оборудования. Зарубежные сервисные компании предлагают комплексные услуги (от выполнения полетов до предоставления готовых отчетов в облачном интерфейсе). Оператор трубопровода получает постоянный доступ к интерактивной карте с указанием критических точек.

Специфика мониторинга в странах Ближнего Востока связана с защитой объектов от песчаных бурь и экстремальных температур. Песок выступает в роли естественного абразива, разрушающего защитные покрытия элементов конструкций. Беспилотные аппараты, защищенные по высоким промышленным стандартам, выполняют задачи в условиях, абсолютно неприемлемых для человека. Дальнейшая миниатюризация датчиков позволит оснащать небольшие квадрокоптеры

полноценными мультиспектральными камерами. Использование различных диапазонов частот расширяет возможности классификации дефектов.

Интересен опыт африканских государств, сталкивающихся с массовым вандализмом. В Нигерии, обладающей разветвленной сетью нефтепроводов в дельте реки Нигер, проблема незаконного отбора нефти стоит чрезвычайно остро, что определяет текущее состояние технологии и преимущества БПЛА для нефтегазовой отрасли Нигерии. Нефтегазовая отрасль Нигерии, добывающая более 2 300 000 баррелей сырой нефти в сутки, имеет более 9000 км трубопроводов, которые подвержены разрывам из-за утечек, коррозии и вандализма. Отрасль получит значительную выгоду от гибкой, совместимой и адаптируемой платформы БПЛА с мультиспектральным и гиперспектральным датчиком для обеспечения всесторонней безопасности. Это позволит получать изображения в реальном времени в локализованном малом и среднем пространственном масштабе, а также на больших площадях пространства и времени. Данная технология считается более дешевой для проведения инспекционных работ по сравнению с традиционными методами. Внедрение указанных технологий позволило бы улучшить экологическое воздействие нефтегазовых компаний, работающих в дельте Нигера, а также сократить случаи вандализма на трубопроводах и сопутствующих беспорядков.

Изучение ситуации, проведенное группой авторов, среди которых Р.А. Osaro, S.J. Olukaеjire, С.С. Ifioга и G.H. Kama, подтверждает, что использование авиационных комплексов радикально меняет ситуацию с охраной периметра [8]. Постоянное воздушное присутствие усложняет деятельность криминальных групп, снижая потери добывающих компаний. Локальный мониторинг больших площадей обеспечивает надежную защиту критической инфраструктуры. Ожидаем, что нейросетевые алгоритмы полностью заменят ручной анализ видеопотока на глобальном уровне.

Проблемы беспилотного мониторинга и технологические пути их решения

Несмотря на очевидные преимущества, массовое внедрение беспилотных летательных аппаратов наталкивается на ряд серьез-

ных технологических и организационных ограничений. Ограниченное время нахождения в воздухе большинства коммерческих квадрокоптеров существенно сужает радиус их эффективного применения. Емкость существующих литий-полимерных аккумуляторов остается недостаточной для обеспечения многочасовых беспосадочных перелетов с тяжелой полезной нагрузкой. Преодоление данного барьера лежит в плоскости развития водородных топливных элементов и гибридных силовых установок. Использование альтернативных источников энергии способно увеличить продолжительность полета в несколько раз, и это позволит обследовать длинные участки без частых промежуточных посадок.

Второй серьезной проблемой выступает зависимость полетов от сложных метеорологических условий. Сильный порывистый ветер, густой туман и обильные осадки делают невозможным качественный сбор данных и создают угрозу потери самого аппарата. Налетание снега или обледенение крыла приводит к изменению аэродинамических характеристик и последующему падению. Разработка систем активной противообледенительной защиты и алгоритмов адаптивного управления в турбулентных потоках заметно повышает живучесть техники. Научные изыскания Е.С. Ефименко и С.Ю. Подорожникова акцентируют внимание на важности адаптации бортовых систем к неблагоприятным внешним факторам [2]. Создание всепогодных комплексов расширит временное окно их эффективного использования.

Проблема обработки гигантских массивов информации также требует оперативного решения. Один съемочный день генерирует сотни гигабайт видео высокого разрешения, ортофотопланов и облаков точек лазерного сканирования. Ручной анализ таких объемов лишает технологию ее главного козыря — оперативности. Создание сквозных автоматизированных конвейеров обработки данных на базе облачных платформ минимизирует участие человека. Алгоритмы должны самостоятельно отсеивать качественные снимки, маркировать подозрительные участки и формировать приоритетный список для проверки инженерами. Развитие краевых вычислений (обработки непосредственно на борту) снизит нагрузку на каналы связи.

Проблемы безопасности передачи данных и защиты каналов управления от перехвата или глушения выходят на первый план. Промышленные беспилотники могут стать прямой целью для кибератак со стороны злоумышленников. Риски информационной безопасности растут. Использование зашифрованных каналов связи и систем автономной навигации (не зависящих от сигналов GPS/ГЛОНАСС) эффективно решает указанную задачу. Навигация по оптическому потоку и цифровым картам местности позволяет аппарату вернуться на базу даже в условиях полного подавления радиоэфира. Разработка помехозащищенных модулей является безусловным приоритетом для конструкторских бюро.

Наконец, кадровый дефицит квалифицированных операторов и аналитиков существенно сдерживает масштабирование программ мониторинга. Управление сложным авиационным комплексом и последующая интерпретация специфических данных требуют глубоких междисциплинарных знаний. Как подчеркивает А. Р. Дашкина, подготовка персонала должна включать как навыки пилотирования, так и основы промышленной дефектоскопии [1]. Создание специализированных учебных центров на базе технических вузов исправит кадровую ситуацию, при этом синергия качественного образования и передовых технологий обеспечит надежную защиту трубопроводных систем. Считаем, что решение

технических проблем сделает воздушный мониторинг основным методом промышленной дефектоскопии.

Заключение

В результате проведенного анализа выявлена определяющая роль беспилотных авиационных систем в трансформации подходов к обеспечению целостности трубопроводного транспорта. Сопоставление отечественной и международной практик указывает на формирование единого технологического тренда, связанного с максимальной автоматизацией сбора пространственных данных. Выявленные ограничения (такие как зависимость от погодных условий и дефицит емкости источников питания) успешно преодолеваются за счет внедрения гибридных силовых установок и алгоритмов искусственного интеллекта. Развитие технологий продолжается. Стратегические перспективы отрасли лежат в плоскости создания полностью автономных систем мониторинга, функционирующих без прямого участия человека. Реализация концепции непрерывного роботизированного надзора позволит свести к минимуму вероятность масштабных экологических катастроф. Переход на сквозную цифровую обработку полетной информации гарантирует высокую достоверность получаемых сведений. Внедрение предложенных технологических решений повысит операционную эффективность нефтегазового комплекса и обеспечит надежность энергетической инфраструктуры.

Библиографический список

1. Дашкина А.Р. Применение беспилотных летательных аппаратов для повышения безопасности в нефтегазовой отрасли // Нефтяная смена. Энергия будущего. – 2022. – С. 28-30.
2. Ефименко Е.С. Применение беспилотных летательных аппаратов в целях мониторинга магистральных газопроводов / Е.С. Ефименко, С.Ю. Подорожников // Проблемы функционирования систем транспорта: Материалы Всероссийской (национальной) научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Тюмень, 07-08 декабря 2023 года. – Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2024. – С. 36-39. – EDN BZZAKG.
3. Коровкина А.И., Казарцева А.А. Применение беспилотных летательных аппаратов в нефтегазовой отрасли // Будущее науки – 2024: Сборник научных статей 11-й Международной молодежной научной конференции. В 5-ти томах. – Курск: ЗАО «Университетская книга», 2024. – С. 133-137.
4. Левитин Р.Е., Аксенов С.Е., Ульянов Н.С., Терешонок А.П. Геодезический мониторинг деформаций надземных трубопроводов при использовании беспилотных летательных аппаратов в труднодоступных арктических районах // Маркшейдерия и недропользование. – 2024. – № 5 (133). – С. 114.
5. Прохоров А.В., Носков И.В. Мониторинг магистральных нефте- и газопроводов с помощью беспилотных летательных аппаратов // Вестник евразийской науки. – 2022. – Т. 14, № 6. – С. 81.

6. Aromoye I.A., Hiung L.H., Sebastian P., Balogun A.O., Ayinla L.S. Autonomous aerial pipeline detection and tracking using YOLOv8 and real-time control algorithms // Alexandria Engineering Journal. – 2026. – Vol. 137. – P. 424-442.
7. Keshk H., Abdallah A. Real-Time UAV-Based Oil Pipeline and Visual Anomaly Detection Using YOLOv26n: A Dataset and Edge-Deployment Study // Drones. – 2026. – Vol. 10, № 4. – P. 255. – DOI: 10.3390/drones10040255.
8. Osaro P.A., Olukaejire S.J., Ifiora C.C., Kama G.H. Unmanned Aerial Vehicle for Pipeline Surveillance: A Review // Journal of Energy Research and Reviews. – 2024. – Vol. 16, № 6. – P. 47-61. – DOI: 10.9734/jenrr/2024/v16i6357.

USING UNMANNED AERIAL VEHICLES FOR PIPELINE CONDITION MONITORING

A.A. Smyslov, Student
Gubkin Russian State University of Oil and Gas
(Russia, Moscow)

***Abstract.** This article examines current approaches to ensuring pipeline integrity through the integration of unmanned aerial vehicles into technical supervision systems. Traditional inspection methods, which are time-consuming and inefficient when scaling, are giving way to automated solutions that enable rapid diagnostics in hard-to-reach geographic areas. Russian and international experience in operating aerial systems equipped with specialized attachments, such as thermal imagers, laser scanners, and gas analyzers, is systematized. Particular attention is paid to predictive risk analysis, methods of protection against unauthorized intervention, and the implementation of artificial intelligence algorithms for automated data processing. The paper analyzes the technological barriers hindering the widespread adoption of autonomous monitoring, particularly flight duration limitations and dependence on adverse weather conditions. Promising solutions to these problems are proposed, including the use of hybrid propulsion systems and the development of edge computing. It is concluded that robotic surveillance is essential for minimizing environmental disasters and ensuring operational efficiency in the oil and gas sector.*

***Keywords:** unmanned aerial vehicles; pipeline monitoring; predictive control; oil and gas industry; automation; remote sensing; artificial intelligence; environmental safety; technical flaw detection.*