

ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ЗАЗОРОВ НА АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОНВЕРТОПЛАНА ТИПА «БАРС» ДЛЯ ЗАДАЧ АГРАРНОГО МОНИТОРИНГА

© 2026 Дмитриев А. В. ✉, Зинуров В. Э., Соловьев А. В., Прец М. А., Зангиров А. Ф.

*Казанский государственный энергетический университет
(г. Казань, Российская Федерация)
✉ ieremiada@gmail.com*

Реферат. Технологии точного земледелия требуют регулярного высокдетального мониторинга сельхозугодий с получением сопоставимых карт состояния посевов. Гибридные беспилотные аппараты вертикального взлета и посадки (конвертопланы) являются перспективным инструментом для решения этих задач, однако их эксплуатация в инфраструктуре дронопортов предъявляет особые требования к конструкции, в частности к технологическим зазорам в системе раскрытия балок силовой установки и люков. Цель работы — численное моделирование влияния конструктивных зазоров на аэродинамические характеристики конвертоплана «БАРС», оценка их влияния на эксплуатационные показатели аграрного мониторинга и выработка инженерных рекомендаций. Исследование выполнено с использованием 3D-модели и пакета ANSYS Fluent. Рассмотрены три варианта зазоров: 0, 10 и 30 мм. Установлено, что щелевые утечки в зоне «люк – обшивка» приводят к образованию вихревых структур и зон отрыва потока, вызывая снижение аэродинамического качества К. Максимальное К уменьшается с 13,1 (0 мм) до 9,8 (10 мм) и 6,6 (30 мм), рост сопротивления достигает 10 – 40%. В пересчете на эксплуатационные показатели это соответствует сокращению длительности вылета на 9–13% (при зазоре 10 мм) и на 29% (при зазоре 30 мм). Обследуемая площадь за один вылет снижается на 11 – 18 га и 35 – 40 га соответственно. Удельная стоимость мониторинга возрастает: при зазоре 10 мм — до 71 – 75 руб./га (эконом-сегмент) и 440–575 руб./га (высокая детализация); при зазоре 30 мм — до 92–107 руб./га и 564–705 руб./га соответственно. Минимизация технологических зазоров и применение уплотняющих решений в узлах люков являются критически важными мерами, обеспечивающими производительность, регулярность облетов и экономическую эффективность мониторинга.

Ключевые слова: беспилотные летательные аппараты, конвертоплан, дронопорт, аэродинамическое качество, агромониторинг, точное земледелие, VTOL-платформы.

Для цитирования: Влияние конструктивных зазоров на аэродинамические характеристики конвертоплана типа «БАРС» для задач аграрного мониторинга / А.В. Дмитриев, В.Э. Зинуров, А.В. Соловьев и др. // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2026. Т. 21. № 2(82). С. 79-87. doi: 10.31588/2073-0462-2026-21-2-79-87

INFLUENCE OF STRUCTURAL GAPS ON THE AERODYNAMIC CHARACTERISTICS OF “BARS” TYPE TILTROTOR FOR AGRICULTURAL MONITORING

© 2026 Dmitriev A. V. ✉, Zinurov V. E. , Solovlev A. V., Pretz M. A., Zangirov A. F.

*Kazan State Power Engineering University
(Kazan, Russian Federation)
✉ ieremiada@gmail.com*

Abstract. Precision farming technologies require regular, highly detailed monitoring of agricultural lands, producing comparable crop condition maps. Hybrid vertical takeoff and landing unmanned aerial vehicles (tiltrotors) are a promising tool for solving these problems, however, their use in drone port infrastructure places special demands on their design, particularly on clearances in the powerplant beam and hatch opening systems. The aim of the study is to numerically simulate the effect of design gaps on the aerodynamic characteristics of Bars-type tiltrotor, assess their impact on the operational performance of agricultural monitoring and develop engineering recommendations. The study was conducted using a 3D model and ANSYS Fluent package. Three gap options were considered: 0, 10 and 30 mm. It was found that crevice leaks in the hatch-to-skin zone lead to the formation of vortex structures and flow separation zones, causing a decrease in the aerodynamic quality K. The maximum K decreases from 13.1 (0 mm) to 9.8 (10 mm) and 6.6 (30 mm), with drag increasing by 10-40%. In terms of operational performance, this corresponds to a reduction in takeoff duration by 9-13% (with a gap of 10 mm) and by 29% (with a gap of 30 mm). The area surveyed per flight is reduced by 11-18 hectares and 35-40 hectares, respectively. The specific cost of monitoring increases: with a 10 mm clearance, it reaches 71-75 rubles/ha (economy segment) and 440-575 rubles/ha (high detail); with a 30 mm clearance, it reaches 92-107 rubles/ha and 564-705 rubles/ha, respectively. Minimizing technological gaps and using sealing solutions in hatch assemblies are critical measures to ensure productivity, flight regularity and

cost-effectiveness of monitoring.

Key words: unmanned aerial vehicles, tiltrotor, droneport, aerodynamic quality, agricultural monitoring, precision farming, VTOL platforms.

For citation: Dmitriev AV, Zinurov VE, Solovev AV, et al. [Influence of structural gaps on the aerodynamic characteristics of "BARS" type tiltrotor for agricultural monitoring]. *Vestnik of Kazan State Agrarian University*. 2026; Vol. 21. 2(82). 79-87 p. doi: 10.31588/2073-0462-2026-21-2-79-87

Введение. В условиях стремительной цифровизации агропромышленного комплекса и нарастающих климатических вызовов возрастают требования к оперативности и точности мониторинга сельскохозяйственных угодий [1]. Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) заняли ключевое место в технологиях точного земледелия благодаря высокой пространственно-временной детализации данных, гибкости применения и возможности интеграции с аналитическими платформами. Аэросъемка позволяет в реальном времени получать детализированные данные о состоянии посевов, влажности почвы, наличии патогенов и стрессовых зон, что способствует своевременному принятию управленческих решений [2]. Результативность мониторинга особенно критична на участках со сложными гидрологическими режимами (например, пойменные луга), для которых обоснованы специальные инженерно-технологические подходы к поверхностному улучшению [3].

Во многих странах мира доля сельскохозяйственных операций, выполняемых с использованием дронов, неуклонно растет: от оценки биомассы и определения нормализованного разностного вегетационного индекса (NDVI) до точечной обработки и внесения удобрений. БПЛА значительно снижают трудозатраты и расход ресурсов: экономия воды, средств защиты растений и удобрений достигает десятков процентов [4, 5].

Современная тенденция заключается в интеграции БПЛА с системами искусственного интеллекта и инфраструктурой Интернета вещей (IoT-инфраструктурой). Применение мультиспектральной, гиперспектральной и тепловой съемки в сочетании с последующей обработкой данными модулями машинного обучения позволяет перейти от фиксации изображений к потоковой аналитике, автоматическим сигналам тревоги и формированию предписаний для технологических операций. Это обеспечивает значительное сокращение временного интервала между наблюдением и практическим действием, что особенно важно при работе на мозаичных полях и в условиях погодной неопределенности [6].

Согласно отраслевому отчету DJI Agriculture, к середине 2024 года по всему миру в сельском хозяйстве эксплуатировалось свыше 300 тыс. агродронов, обработавших в совокупности более 500 млн. гектаров сельхозугодий. Широкое внедрение этих технологий позволило добиться значительной экономии ресурсов: по оценкам, суммарно было сэкономлено около 210 млн. тонн воды и 47 тыс. тонн пестицидов, выбросы парниковых газов сократились на 25,7 млн тонн. Эти цифры наглядно

показывают экологические и производственные преимущества беспилотной авиации в сельском хозяйстве.

Несмотря на значительные преимущества, широко применяемые в настоящее время мультикоптерные и самолетные БПЛА, обладают рядом ограничений, снижающих их эффективность при эксплуатации на больших территориях. Квадрокоптеры и другие много-роторные системы обеспечивают высокую маневренность и точность полета на малых высотах, однако ограничены по продолжительности и дальности полета, которая, как правило, не превышает нескольких десятков минут и нескольких километров радиуса из-за ограниченной емкости аккумуляторных батарей. В свою очередь, аппараты самолетной аэродинамической схемы более энергоэффективны и способны охватывать значительные площади, но требуют наличия взлетно-посадочной полосы или применения специализированных катапульти, что затрудняет их использование в полевых условиях.

Перспективным направлением развития являются гибридные БПЛА вертикального взлета и посадки (VTOL), в том числе конвертопланы с поворотными винтами [7]. Конвертоплан сочетает свойства вертолета и самолета. Он осуществляет вертикальный взлет и посадку, как много-роторный аппарат, но в крейсерском режиме переходит в самолетную конфигурацию с горизонтальным расположением несущих винтов. Такая конструкция обеспечивает высокую скорость и дальность полета при сравнительно низком энергопотреблении. Это позволяет отказаться от необходимости наличия взлетно-посадочной полосы и одновременно повысить эффективность полетов на большие дистанции.

VTOL-платформы рассматриваются как наиболее инновационный класс беспилотных авиационных систем, которому уделяется особое внимание благодаря уникальным возможностям конвертопланов и других гибридных схем (поворотное крыло, комбинированные решения) в различных сферах применения - от сельского хозяйства и картографирования до грузовых перевозок. Использование гибридных БПЛА может существенно расширить спектр задач, решаемых беспилотными системами, предоставляя инженерам и специалистам агропромышленного комплекса новые возможности для выбора оптимальных технологий мониторинга и обработки сельскохозяйственных угодий [8].

Для эффективного использования беспилотных систем в агромониторинге требуется развитая наземная инфраструктура, обеспечивающая автоматизацию и непрерывность

работы. Одним из перспективных решений является создание сетей дронопортов - автономных станций посадки и обслуживания БПЛА [9]. Такие комплексы оснащаются системами автоматической подзарядки или замены аккумуляторов, средствами навигации и связи, что позволяет исключить простои между вылетами и обеспечить быстрый возврат к выполнению задач.

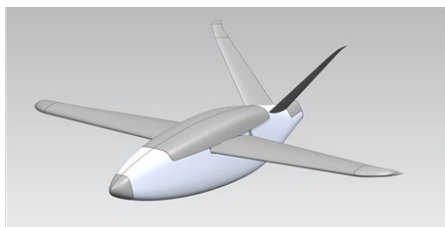
В российских условиях значение подобных решений усиливается макроэкономическими факторами: стабильность зернового производства и эффективное использование земельных ресурсов остаются приоритетными задачами агропромышленного комплекса [10, 11]. При этом цифровая трансформация и совершенствование отраслевого регулирования выступают важными условиями, ускоряющими внедрение беспилотных технологий в практику аграрного менеджмента [12].

БПЛА, предполагаемые к эксплуатации в сети дронопортов, должны обладать следующими ключевыми требованиями: надежность, предсказуемость поведения в переходных режимах (взлет, посадка, раскрытие и уборка узлов конструкции), минимальная удельная энергозатрата и др. Для конвертопланов особую значимость приобретают аэродинамические потери, обусловленные технологическими зазорами в механизмах раскрытия (люки, створки, балочные системы). Наличие таких зазоров инициирует образование вихревых структур, повышает аэродинамическое сопротивление и снижает устойчивость полета на

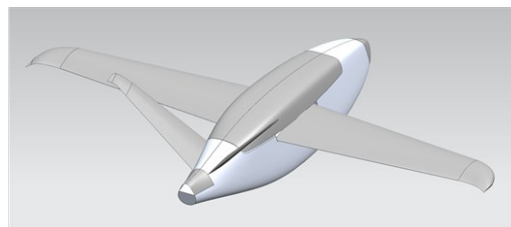
малых скоростях, которые характерны для операций в инфраструктуре дронопортов. В этой связи актуальной является инженерная оптимизация конструкций конвертопланов, направленная на минимизацию и нормирование допустимых зазоров, а также на оценку их влияния на аэродинамическое качество и энергетическую эффективность в режимах, критичных для задач агромониторинга [13].

Целью работы является численное моделирование влияния конструктивных зазоров в системе раскрытия балок и люков конвертоплана на его аэродинамические характеристики, а также оценка последствий данного влияния для эксплуатационных показателей задач аграрного мониторинга (производительность, стоимость обработки площади) и разработка инженерных рекомендаций по минимизации потерь.

Условия, материалы и методы. Объектом исследования являлся БПЛА конвертопланного типа «БАРС» длиной 2070 мм и размахом крыла 3330 мм, оснащенный убираемыми внутрь фюзеляжа балками силовой установки и V-образным хвостовым оперением (рис. 1, а и б). Предметом исследования являлось определение влияния технологических зазоров в системе раскрытия, формируемых между сдвижным люком и обшивкой фюзеляжа, на аэродинамические характеристики и устойчивость полета в режимах, характерных для эксплуатации в сети дронопортов, включая низко- и среднескоростные полеты, а также переходные фазы взлета и посадки.



а / а



б / б

Рис. 1 – Внешний вид БПЛА типа «БАРС»: (а) вид спереди; (б) вид сзади
Fig. 1 – External view of the BARS-type UAV: (a) front view; (b) rear view

На рисунке 2 представлена спроектированная система лучей в сложенном состоянии внутри фюзеляжа. Для удобства понимания конструкции сдвижной люк на изображении не показан. Данный вариант иллюстрирует взаимное расположение силовых элементов и механизмов в сложенном положении, что позволяет более наглядно продемонстрировать потенциальные зоны образования зазоров, влияющих на аэродинамическое качество аппарата.

Для численных экспериментов была построена твердотельная 3D-модель аппарата с раскрываемыми балками. Рассматривались три конфигурации проема люка: без зазора - 0 мм и с зазорами от 10 до 30 мм. Во всех случаях внешние обводы фюзеляжа, крыла и оперения оставались неизменными; варьировалась только величина просвета

вдоль кромок сдвижного люка, что позволило изолировать влияние утечек и срывных структур, формирующихся в области щелей.

В условиях эксплуатации в агропромышленном комплексе зазоры в системе раскрытия формируются и изменяются не только как результат технологических допусков, но и вследствие циклических операций «взлёт-посадка» в районе дронопорта, вибрационных нагрузок и загрязнения (пыль, растительные остатки и др.), характерных для работы над полями. Поэтому диапазон 0-30 мм рассматривается как технически обоснованная область возможных состояний узла, определяющих интенсивность утечек и особенности структуры обтекания в зоне люка при повторяемых полётных миссиях.

Аэродинамические расчеты выполнялись в программном комплексе ANSYS Fluent,

реализующем метод конечных объемов (FVM). В качестве модели турбулентности использовалась Transition SST (вариант Ментера), позволяющая воспроизводить ламинарно-переходные и срывные явления в окрестности щелей и кромок, а также в предсрывных

режимах. Также использовалось уравнение энергии. Расчеты выполнялись в стационарной постановке RANS с двойной точностью. Критериями сходимости служили снижение невязок ниже 10^{-5} и стабилизация интегральных коэффициентов аэродинамических сил.

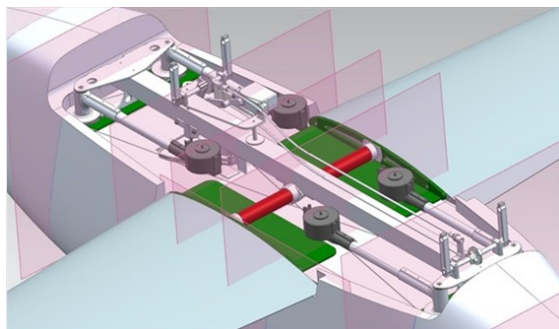


Рис. 2 – Система лучей (балок силовой установки) в сложенном состоянии внутри фюзеляжа (для наглядности сдвижной люк не показан)

Fig. 2 – System of beams (powerplant beams) in the folded state inside the fuselage (for clarity, the sliding hatch is not shown)

Для внешнего обтекания применялась полигонально-гексагональная сетка типа poly-hexcore, сочетающая гексаэдральное ядро с полиэдральными элементами в зонах сложной геометрии (проем люка, сопряжения поверхностей). В приповерхностных областях формировались призматические подслои для корректного разрешения пограничного слоя. Общее число элементов составило около 4,336 млн при максимальном размере ячейки 20 мм. Проверка независимости от разбиения показала инвариантность коэффициентов подъемной силы и сопротивления при дополнительном уплотнении сетки.

Моделирование проводилось в широком диапазоне углов атаки, охватывающем крейсерные и предсрывные значения, релевантные полетам над сельскохозяйственными угодьями и операциям в районе дронопортов. Скорость набегающего потока задавалась в диапазоне 90-105 км/ч, соответствующем эксплуатационным условиям. Радиус расчетной области составлял не менее десяти хорд крыла. На выходной границе поддерживалось фиксированное статическое давление.

Основными метриками служили коэффициенты подъемной силы C_y и сопротивления C_x , аэродинамическое качество $K = C_y/C_x$. Дополнительно фиксировался диапазон углов

атаки, обеспечивающих устойчивый полет, и запас по срыву.

Для агроинженерной интерпретации полученных коэффициентов дополнительно оценивалось влияние изменения аэродинамического качества на энергетическую эффективность миссии мониторинга в сценарии «поле-дропоорт». В этом случае результаты по C_x , C_y и K рассматривались не только как характеристики планера, но и как фактор производительности агромониторинга при фиксированных параметрах съёмки, заданных регламентом полётного задания. Съёмка, как правило, выполняется с высот порядка 80-120 м (пространственное разрешение составляет 2-3 см/пикс) с обеспечением продольного и поперечного перекрытия изображений не ниже 70 %.

Результаты и обсуждение. В результате серии численных расчетов получена детализированная картина внешнего обтекания БПЛА конвертопланного типа «БАРС» в области сдвижного люка и зоны размещения убираемых балок силовой установки. Визуализация распределения скорости по линиям тока позволила выявить закономерности формирования возмущенного следа и локальных вихревых структур над фюзеляжем и крылом (рис. 3).

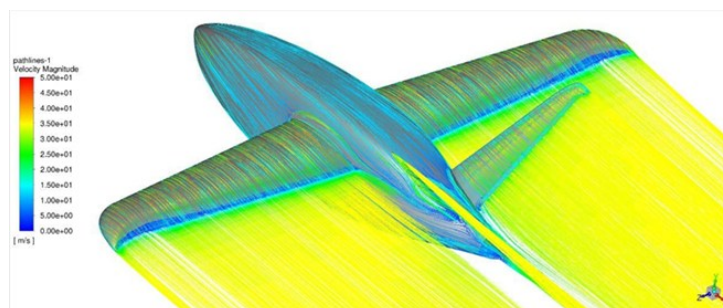


Рис. 3 – Профиль скоростей (линии тока) исследуемого БПЛА

Fig. 3 – Velocity profile (streamlines) of the UAV under study

Для базовой конфигурации без зазора поток на верхней поверхности крыла и фюзеляжа в диапазоне малых и средних углов атаки остается преимущественно пристенным. Вихревые вихри, формирующиеся у законцовок крыла, имеют характерную интенсивность и не вызывают преждевременного срыва потока на корневой части крыла. При введении технологического зазора между кромками люка и обшивкой от 10 до 30 мм в зоне прорези формируются локальные утечки, сопровождающиеся генерацией квазистационарных вихревых образований. Эти вихри взаимодействуют с пограничным слоем над фюзеляжем, увеличивают его толщину и инициируют переходную турбулентность. В результате усиливается сопротивление и появляются зоны частичного отрыва потока в области сопряжения «люк-обшивка». Деформация изолиний скорости особенно заметна в районе хвоста БПЛА. При увеличении зазора наблюдается «размазывание» следа в продольном направлении и рост возмущений набегающего потока на *V*-образное оперение, что ухудшает условия обтекания оперения и может снижать запас по устойчивости управления на малых скоростях.

Количественные результаты согласуются с выявленной картиной обтекания. На рисунке 4 представлена зависимость аэродинамического качества K от угла атаки α для трех вариантов конфигурации: без зазора, с зазором 10 мм и с зазором 30 мм. Во всех случаях наблюдается характерная зависимость: при малых углах атаки качество сначала возрастает вследствие опережающего роста подъемной силы по сравнению с сопротивлением, достигая максимальных значений в диапазоне α от 3 до 5°. В этом диапазоне подъемная

сила увеличивается почти линейно, тогда как сопротивление остается близким к минимальному уровню, что обеспечивает наиболее выгодное соотношение C_y/C_x . Данные углы атаки соответствуют оптимальным крейсерским режимам, при которых затраты энергии на преодоление сопротивления минимальны при заданной подъемной силе. Далее, при дальнейшем увеличении угла атаки, аэродинамическое качество начинает снижаться, что связано с ростом индуктивного сопротивления и развитием срывных явлений. Для задач агромониторинга указанный диапазон α от 3 до 5° следует рассматривать как предпочтительный с точки зрения получения воспроизводимых данных дистанционного зондирования при минимальных энергетических затратах.

Максимальное качество конфигурации составляет порядка 13,1 при зазоре 0 мм. При зазоре 10 мм максимальное значение снижается до 9,8, а при зазоре 30 мм до 6,6. Падение качества носит системный характер по всему диапазону углов атаки: кривые смещаются вниз и становятся более пологими, что указывает на общее снижение эффективности как в крейсерских, так и в предсрывных режимах.

С агроинженерной точки зрения снижение K уменьшает энергетическую эффективность маршрутных пролетов над угодьями при фиксированных параметрах съёмки. В картографических миссиях с регламентными перекрытиями площадь обследования за вылет определяется доступной продолжительностью полёта при выдерживании скорости и высоты, поэтому ухудшение K приводит к сокращению площади за один вылет и увеличению числа вылетов для покрытия заданного массива полей, особенно при повторных облётах в агрономически значимые временные окна.

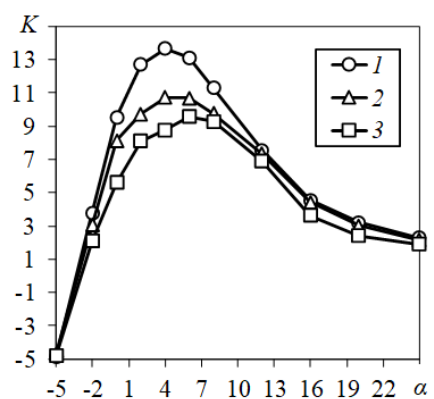


Рис. 4 – Аэродинамическое качество K в зависимости от угла атаки α при различных значениях зазора между люком и корпусом, мм: 1 - 0; 2 - 10; 3 - 30

Fig. 4 – Aerodynamic efficiency K versus angle of attack α at different values of the gap between the hatch and the fuselage, mm: 1 - 0; 2 - 10; 3 - 30

Вблизи нулевых углов атаки различия между вариантами наиболее показательны (рис. 5, а). Так, при $\alpha \approx 0^\circ$ расчетное значение C_y для базовой конфигурации составляет около 0,916, тогда как для вариантов с зазором 10 и 30 мм оно снижается до 0,325 и 0,287 соответственно. Таким образом, даже

умеренный зазор по кромке люка приводит к кратному снижению несущих свойств. С ростом угла атаки кривые $C_y(\alpha)$ сохраняют линейность, однако требуемые значения α для устойчивого горизонтального полета существенно возрастают: при отсутствии зазора устойчивая работа в диапазоне

эксплуатационных скоростей 90-105 км/ч достигается при $\alpha \approx 6-6,5^\circ$, для зазора 10 мм при $\alpha \approx 8-9^\circ$, для зазора 30 мм при $\alpha \approx 12,5-13^\circ$. Этот сдвиг сопровождается непропорциональным ростом сопротивления и дополнительным падением аэродинамического качества.

Увеличение зазора приводит к общему росту сопротивления, особенно при больших углах атаки, тогда как минимальные значения C_x наблюдаются в области α от 11 до 13° (рис. 5, б).

При фиксированной скорости горизонтального полета относительное увеличение требуемой мощности оказывается прямо

пропорциональным росту коэффициента лобового сопротивления C_x . Мощность силовой установки определяется выражением:

$$P = F_x W, \quad (1)$$

где F_x - сила аэродинамического сопротивления, Н; W - скорость полета БПЛА, м/с.

Сила аэродинамического сопротивления F_x рассчитывается по выражению:

$$F_x = C_x \frac{\rho W^2}{2} S, \quad (2)$$

где ρ - плотность воздуха, кг/м³; S - опорная площадь крыла, м².

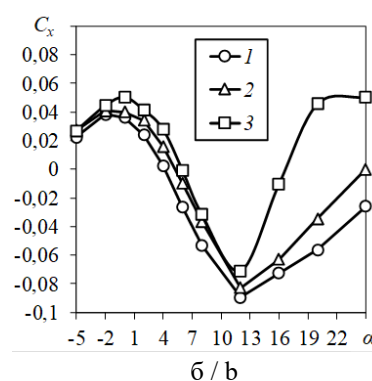
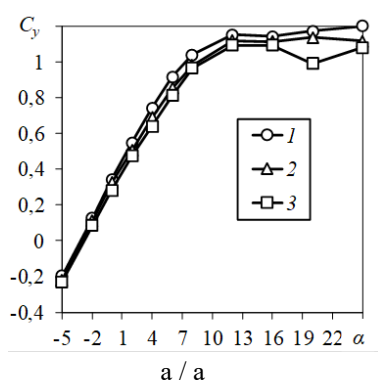


Рис. 5 – Зависимость коэффициента подъемной силы C_y (а) и коэффициента сопротивления C_x (б) от угла атаки α при различных значениях зазора между люком и корпусом, мм: 1 - 0; 2 - 10; 3 - 30
Fig. 5 – Dependence of the lift coefficient C_y (a) and the drag coefficient C_x (b) on the angle of attack α at different values of the gap between the hatch and the fuselage, mm: 1 - 0; 2 - 10; 3 - 30

Согласно выражениям (1) и (2) при увеличении технологического зазора до 10 мм сопротивление возрастает на 10-15% по сравнению с базовой конфигурацией, а при зазоре 30 мм примерно на 40%. Указанное возрастание сопротивления эквивалентно пропорциональному увеличению мощности, необходимой для работы силовой установки в крейсерском режиме. Для беспилотных платформ, функционирующих в составе сети дронопортов по циклическому графику, это приводит к сокращению продолжительности полетного интервала между сервисными циклами либо к уменьшению радиуса действия при фиксированном энергетическом бюджете. В масштабах флота, включающего несколько аппаратов и десятки вылетов в сутки, накопительный эффект роста C_x трансформируется в значительные потери производительности агромониторинга, измеряемые в сокращении площади обследуемых сельскохозяйственных угодий в расчете на сутки.

Количественно данный эффект может быть оценён через энергетический баланс полётной миссии. При фиксированном энергетическом бюджете бортового источника питания продолжительность полёта в первом приближении обратно пропорциональна потребной мощности силовой установки $1/P$. В таком случае увеличение P на 10-15% при зазоре 10 мм соответствует уменьшению длительности вылета примерно на 9-13%, а при росте

P на 40% (зазор 30 мм) приводит к снижению длительности вылета примерно на 29%. При неизменных параметрах съёмки и маршрутизации это эквивалентно пропорциональному сокращению площади обследования за один вылет и снижению суточной производительности комплекса мониторинга.

В прикладном и экономическом аспекте снижение суточной производительности прямо отражается на удельной стоимости агромониторинга в расчёте на 1 га при неизменных постоянных затратах (инфраструктура дронопорта, персонал, подготовка, обработка данных и др.). Стоимость услуг аэрофотосъёмки и ортофотопланов для площадных объектов варьируется от 6500 руб./км², что соответствует 65 руб./га до 15 000 руб./км², что соответствует 50 руб./га. При более высокой детализации стоимость составляет порядка 400-500 руб./га. Таким образом, при снижении производительности на 9-13% (зазор 10 мм) удельная стоимость мониторинга увеличивается примерно на 10-15%. Например, при исходном диапазоне 65-150 руб./га расчётные значения составят порядка 71-75 руб./га и 165-173 руб./га соответственно. При снижении производительности на 29% (зазор 30 мм) рост удельной стоимости достигает примерно 41%. Таким образом, увеличение зазоров приводит не только к ухудшению аэродинамических показателей, но и к количественно выражаемому росту затрат на мониторинг

сельскохозяйственных угодий в пересчёте на единицу площади. Оценочные результаты были получены на основании данных, представленных в работе [14].

Выводы. 1. Выполненное CFD-исследование подтвердило, что технологические зазоры в зоне сдвижного люка конвертоплана являются значимым источником аэродинамических потерь. Щелевые утечки формируют квазистационарные вихревые структуры, утолщают пограничный слой и провоцируют локальные отрывы потока, что системно ухудшает несущие и энергетические характеристики аппарата.

2. Аэродинамическое качество K чувствительно к величине зазора во всём диапазоне углов атаки: его максимум уменьшается с 13,1 (герметичная конфигурация) до 9,8 (зазор 10 мм) и до 6,6 (зазор 30 мм). Для сохранения требуемой подъёмной силы аппарат с зазором вынужден работать на больших углах атаки, что сопровождается ростом сопротивления и сокращением запаса по срыву.

3. Увеличение зазоров вызывает рост коэффициента сопротивления и, как следствие, потребной мощности на крейсерских режимах: при зазоре 10 мм – на 10-15%, при 30 мм – до 40% относительно базовой конфигурации.

4. Для сохранения производительности комплекса мониторинга рекомендуется нормировать допустимые зазоры в узлах раскрытия на уровне не более 10 мм, а также предусматривать применение уплотнительных контуров и систем самоочистки от пыли и растительных остатков. Экономический ущерб от деградации конструкции (рост стоимости мониторинга до 41%) превышает затраты на внедрение данных мер герметизации.

5. При планировании исследований на БПЛА с эксплуатационным износом узлов следует закладывать снижение площади облёта за один вылет на 10-30% относительно паспортных данных. В технико-экономическое обоснование закупок БПЛА для задач точного земледелия необходимо включать критерий герметичности силовых отсеков как фактор, напрямую влияющий на удельную стоимость обработки гектара.

Сведения о финансировании. Работа выполнена за счет предоставленного в 2024 году АН РТ гранта на осуществление фундаментальных и прикладных научных работ в научных и образовательных организациях, предприятиях и организациях реального сектора экономики РТ соглашение № 14/2024-ФИП от 24.12.2024.

Литература

- Guebsi R., Mami S., Chokmani K. Drones in precision agriculture: a comprehensive review of applications, technologies, and challenges // *Drones*. 2024. Vol. 8. No. 11. Article 686. doi: 10.3390/drones8110686.
- Agrawal J., Arafat I. Transforming farming: a review of AI-powered UAV technologies in precision agriculture // *Drones*. 2024. Vol. 8. No. 11. Article 664. doi: 10.3390/drones8110664.
- Техника и технология поверхностного улучшения пойменных лугов Республики Татарстан / Ф. Н. Сафиоллин, А. Р. Валиев, М. М. Хисматуллин и др. // *Вестник Казанского государственного аграрного университета*. 2023. Т. 17. № 4 (68). С. 50-55. doi: 10.12737/2073-0462-2023-50-55.
- A systematic review on the application of UAV-based thermal remote sensing for assessing and monitoring crop water status in crop farming systems / H. S. Ndlovu, J. Odindi, M. Sibanda, et al. // *International Journal of Remote Sensing*. 2024. Vol. 45. No. 15. P. 4923-4960. doi: 10.1080/01431161.2024.2368933
- Беляева А. С., Никитина А. А. О проблемах и перспективах цифровой трансформации отечественного АПК // *Достижения науки и техники АПК*. 2023. Т. 37, № 1. С. 34-40. doi: 10.53859/02352451_2023_37_1_34.
- Machine learning methods for precision agriculture with UAV imagery: A review / T. B. Shahi, C.-Y. Xu, A. Neupane, et al. // *Electronic Research Archive*. 2022. Vol. 30. No. 12. P. 4277-4317. doi: 10.3934/era.2022218.
- Design and validation of a new tilting rotor VTOL drone: structural optimization, flight dynamics, and PID control / H. Gong, W. He, S. Hou, et al. // *Sensors*. 2025. Vol. 25. No. 11. Article 3537. doi: 10.3390/s25113537.
- A review on vertical take-off and landing (VTOL) tilt-rotor and tilt-wing unmanned aerial vehicles (UAVs) / A. Misra, S. Jayachandran, S. Kenche, et al. // *Journal of Engineering*. 2022. Article 1803638. doi: 10.1155/2022/1803638
- Grlj C. G., Krznar N., Pranjić M. A decade of UAV docking stations: a brief overview of mobile and fixed landing platforms // *Drones*. 2022. Vol. 6. No. 1. Article 17. doi: 10.3390/drones6010017.
- Современное состояние зернового производства в Российской Федерации / Д. И. Файзрахманов, А. Р. Валиев, Б. Г. Зиганшин и др. // *Вестник Казанского государственного аграрного университета*. 2021. Т. 16. № 2 (62). С. 138-142. doi: 10.12737/2073-0462-2021-138-142.
- Криулина Е. Н., Катков К. А., Оганян Л. Р. Методические подходы к прогнозированию урожайности зерновых культур в Ставропольском крае // *Достижения науки и техники АПК*. 2023. Т. 37, № 5. С. 85-90. doi: 10.53859/02352451_2023_37_5_85.
- Государственное регулирование аграрного сектора в условиях санкций и развития цифровой экономики / Э. Ф. Амирова, И. Н. Сафиуллин, Л. Г. Ибрагимов и др. // *Вестник Казанского государственного аграрного университета*. 2019. Т. 14. № 3 (54). С. 133-137. doi: 10.12737/article_5db987940f8763.55129461.
- Оптико-электронные высотомеры-скоростемеры на основе полупроводниковых лазеров для БПЛА / В. Г. Вильнер, А. И. Ларюшин, А. С. Рябокуль // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2015. № 5-6. С. 127-133.
- Экономическая эффективность применения беспилотных летательных аппаратов как элемента цифровизации растениеводства / Ю. И. Бершицкий, А. Р. Сайфетдинов, А. А. Максименко, Д. А. Елфимов // *Вестник Академии знаний*. 2024. № 2(61). С. 66-69.

References

1. Guebsi R, Mami S, Chokmani K. Drones in precision agriculture: a comprehensive review of applications, technologies and challenges. *Drones*. 2024; Vol.8. No.11. Article 686. doi: 10.3390/drones8110686.
2. Agrawal J, Arafat I. Transforming farming: a review of AI-powered UAV technologies in precision agriculture. *Drones*. 2024; Vol.8. No.11. Article 664. doi: 10.3390/drones8110664.
3. Safiollin FN, Valiev AR, Khismatullin MM. [Technique and technology for surface improvement of flood-plain meadows of the Republic of Tatarstan]. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2023; Vol.17. 4 (68). 50-55 p. doi: 10.12737/2073-0462-2023-50-55.
4. Ndlovu HS, Odindi J, Sibanda M. A systematic review on the application of UAV-based thermal remote sensing for assessing and monitoring crop water status in crop farming systems. *International Journal of Remote Sensing*. 2024; Vol.45. No.15. 4923-4960 p. doi: 10.1080/01431161.2024.2368933
5. Belyaeva AS, Nikitina AA. [On the problems and prospects of digital transformation of domestic agro-industrial complex]. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK*. 2023; Vol.37. 1. 34-40 p. doi: 10.53859/02352451_2023_37_1_34.
6. Shahi TB, Xu CY, Neupane A. Machine learning methods for precision agriculture with UAV imagery: a review. *Electronic Research Archive*. 2022; Vol.30. No.12. 4277-4317 p. doi: 10.3934/era.2022218.
7. Gong H, He W, Hou S. Design and validation of a new tilting rotor VTOL drone: structural optimization, flight dynamics, and PID control. *Sensors*. 2025; Vol.25. No.11. Article 3537. doi: 10.3390/s25113537.
8. Misra A, Jayachandran S, Kenche S. A review on vertical take-off and landing (VTOL) tilt-rotor and tilt-wing unmanned aerial vehicles (UAVs). *Journal of Engineering*. 2022; Article 1803638. doi: 10.1155/2022/1803638
9. Grlj CG, Krznar N, Pranjic M. A decade of UAV docking stations: a brief overview of mobile and fixed landing platforms. *Drones*. 2022; Vol.6. No.1. Article 17. doi: 10.3390/drones6010017.
10. Fayzrakhmanov DI, Valiev AR, Ziganshin BG. [Current state of grain production in the Russian Federation]. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2021; Vol.16. 2 (62). 138-142 p. doi: 10.12737/2073-0462-2021-138-142.
11. Kriulina EN, Katkov KA, Oganyan LR. [Methodological approaches to forecasting grain yields in Stavropol Krai]. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK*. 2023; Vol.37. 5. 85-90 p. doi: 10.53859/02352451_2023_37_5_85.
12. Amirova EF, Safiullin IN, Ibragimov LG. [State regulation of the agricultural sector in the context of sanctions and digital economy development]. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2019; Vol.14. 3 (54). 133-137 p. doi: 10.12737/article_5db987940f8763.55129461.
13. Vilner VG, Laryushin AI, Ryabokul AS. [Optical-electronic altitude-speed meters based on semiconductor lasers for UAVs]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki*. 2015; 5-6. 127-133 p.
14. Bershtskiy YuI, Sayfetdinov AR, Maksimenko AA, Elfimov DA. [Economic efficiency of using unmanned aerial vehicles as an element of digitalization of crop production]. *Vestnik Akademii znaniy*. 2024; 2(61). 66-69 p.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об авторах:

Дмитриев Андрей Владимирович - доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автоматизации технологических процессов и производств Казанского государственного энергетического университета (420066, Российская Федерация, г. Казань, ул. Красносельская, д. 51), e-mail: ieremiada@gmail.com, ORCID 0000-0001-8979-4457

Зинуров Вадим Эдуардович - кандидат технических наук, и.о. зав. кафедрой инженерной графики Казанского государственного энергетического университета (420066, Российская Федерация, г. Казань, ул. Красносельская, д. 51), e-mail: vadd_93@mail.ru, ORCID 0000-0002-1380-4433

Соловьев Александр Вячеславович - руководитель МКБ «Энергия взлета», аспирант, действующий пилот БПЛА, инженер-конструктор БПЛА Казанского государственного энергетического университета (420066, Российская Федерация, г. Казань, ул. Красносельская, д. 51), e-mail: rsmodels.ru@yandex.ru

Прец Мария Арнольдовна - старший преподаватель кафедры инженерной графики Казанского государственного энергетического университета (420066, Российская Федерация, г. Казань, ул. Красносельская, д. 51), e-mail: precmari@gmail.com, ORCID 0009-0009-4434-3906

Зиангиров Айдар Фанлевич - ассистент кафедры инженерной графики Казанского государственного энергетического университета (420066, Российская Федерация, г. Казань, ул. Красносельская, д. 51), e-mail: zinaydar@mail.ru, ORCID 0009-0001-4025-828X

Вклад авторов:

А.В. Дмитриев - концептуализация исследования, разработка методологии численного моделирования, валидация полученных результатов, критический анализ и редактирование рукописи;

В.Э. Зинуров - формирование общей структуры статьи, постановка исследовательской задачи, анализ и интерпретация результатов численного моделирования, подготовка исходного текста рукописи, доработка выводов и инженерных рекомендаций;

А.В. Соловьев - разработка и уточнение конструктивной схемы БПЛА типа «БАРС», предоставление исходных технических данных по конвертоплану, экспертная оценка конструктивных зазоров и эксплуатационных режимов БПЛА, участие в интерпретации результатов с позиции практического применения;

М.А. Прец - подготовка и обработка графических материалов, визуализация результатов, оформление расчетных данных, участие в подготовке разделов «Условия, материалы и методы» и «Результаты и обсуждение»;

А.Ф. Зиангиров - обработка расчетных данных, систематизация литературных источников, техническое оформление рукописи, участие в подготовке библиографического списка и проверке соответствия текста требованиям журнала.

Все авторы ознакомились и одобрили окончательный вариант рукописи.

Поступила 18.09.2025; одобрена после рецензирования 24.03.2026; принята к публикации 25.06.2026.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Authors:

Dmitriev Vladimirovich Andrey – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department of Technological Processes and Production Automation Kazan State Power Engineering University (51 Krasnoselskaya St., Kazan, 420066, Russian Federation), e-mail: ieremiada@gmail.com, ORCID 0000-0001-8979-4457

Zinurov Vadim Eduardovich – Ph.D. of Technical Sciences, acting head of of Engineering Graphics Department Kazan State Power Engineering University (51 Krasnoselskaya St., Kazan, 420066, Russian Federation), e-mail: vadd_93@mail.ru, ORCID 0000-0002-1380-4433

Solovev Aleksandr Vyacheslavovich – Head of “Energiya vzleta” design bureau, post-graduate student, active UAV pilot, UAV design engineer Kazan State Power Engineering University (51 Krasnoselskaya St., Kazan, 420066, Russian Federation), e-mail: rsmodels.ru@yandex.ru

Prets Mariya Arnoldovna – senior lecturer of Engineering Graphics Department Kazan State Power Engineering University (51 Krasnoselskaya St., Kazan, 420066, Russian Federation), e-mail: precmari@gmail.com, ORCID 0009-0009-4434-3906

Ziangirov Aidar Failevich – Assistant Professor of Engineering Graphics Department Kazan State Power Engineering University (51 Krasnoselskaya St., Kazan, 420066, Russian Federation), e-mail: zinaydar@mail.ru, ORCID 0009-0001-4025-828X

Contribution of the authors:

A.V. Dmitriev - Conceptualization of the study, Development of numerical modeling methodology, Validation of the obtained results, Critical analysis and editing of the manuscript;

V.E. Zinurov - Development of the overall structure of the article, Formulation of the research problem, Analysis and interpretation of the numerical modeling results, Preparation of the original manuscript, Revision of the conclusions and engineering recommendations;

A.V. Soloviev - Development and refinement of the BARS-type UAV design, Provision of the initial technical data for the convertiplane, Expert assessment of the design clearances and operating modes of the UAV, Participation in the interpretation of the results from the perspective of practical application;

M.A. Pretz - Preparation and processing of graphic materials, Visualization of results, presentation of calculated data, Participation in the preparation of “Conditions, Materials and Methods” and “Results and Discussion” sections;

A.F. Zangirov - Processing of calculated data, Systematization of literary sources, Technical preparation of the manuscript, Participation in the preparation of the bibliography and verification of the text’s compliance with the journal’s requirements.

The authors have reviewed and approved the final manuscript.
Submitted 18.09.2025; revised 24.03.2026; accepted 25.06.2026.

