

**ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО
КОМПЛЕКСА/TECHNOLOGIES, MACHINES AND EQUIPMENT FOR THE AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX**

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.156.100>

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОФИЛЯ КРЫЛА БПЛА С ЗАКРЫЛКОМ ДЛЯ МОНИТОРИНГА
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ЗЕМЕЛЬ**

Научная статья

Осъкин С.В.¹, Бондарчук Е.В.², Оськин А.С.³, Цокур Д.С.^{4,*}

¹ORCID : 0000-0001-7274-5229;

⁴ORCID : 0000-0003-3291-810X;

^{1, 4} Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, Краснодар, Российская Федерация

^{2, 3} АО Концерн ГРАНИТ, Москва, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (dmitry_tsokur[at]mail.ru)

Аннотация

При моделировании профилей крыльев для БПЛА самолетного типа зачастую не учитывают влияние закрылков на его аэродинамические характеристики, в частности подъемную силу. Вместе с тем механизация крыла оказывает сильное воздействие на величину подъемной силы, что приводит к неточности при моделировании. В статье проведено компьютерное моделирование профилей с закрылком и без. Наглядно показано, что наличие даже небольшого зазора между крылом и закрылком приводит к падению подъемной силы на 11–16%. Также в статье даны рекомендации по положению фюзеляжа самолета при взлете и посадке БПЛА, т.е. в момент, когда закрылки открыты. При этом определено, что угол установки закрылков (15°–30°) на коэффициент подъемной силы оказывает незначительное воздействие.

Ключевые слова: профиль крыла, моделирование, Comsol Multiphysics, подъемная сила, закрылок.

MODELLING OF UAV WING PROFILE WITH FLAP FOR AGRICULTURAL LAND MONITORING

Research article

Oskin S.V.¹, Bondarchuk Y.V.², Oskin A.S.³, Tsokur D.S.^{4,*}

¹ORCID : 0000-0001-7274-5229;

⁴ORCID : 0000-0003-3291-810X;

^{1, 4} Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin, Krasnodar, Russian Federation

^{2, 3} Concern GRANIT JSC, Moscow, Russian Federation

* Corresponding author (dmitry_tsokur[at]mail.ru)

Abstract

When modelling wing profiles for aircraft-type UAVs, the influence of flaps on its aerodynamic characteristics, in particular lifting force, is often not taken into account. At the same time, wing mechanisation has a strong influence on the lifting force, which leads to inaccuracies in modelling. In the article, computer modelling of profiles with and without flap is carried out. It is clearly shown that the presence of even a small gap between the wing and the flap leads to a drop in lift by 11–16%. The paper also gives recommendations on the position of the aircraft fuselage during take-off and landing of the UAV, i.e. at the moment when the flaps are open. It is determined that the angle of flap installation (15°–30°) has an insignificant effect on the lifting force coefficient.

Keywords: wing profile, modelling, Comsol Multiphysics, lifting power, flap.

Введение

На сегодняшний день применение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в различных отраслях промышленности и сельского хозяйства многократно возросло. В частности, в АПК нашей страны уже давно применяются БПЛА в виде квадрокоптеров с целью малообъемного опрыскивания сельскохозяйственных полей [1]. Помимо этого, возникает необходимость в постоянном мониторинге земель, который включает систематическое наблюдение и оценку состояния земельных ресурсов, их использования и изменений [2]. Одним из перспективных инструментов для реализации этой задачи являются БПЛА самолетного типа, которые демонстрируют высокую эффективность в сельском хозяйстве. Благодаря своей конструкции они способны покрывать большие площади за один полет, что делает их идеальными для масштабных сельскохозяйственных задач. Они позволяют значительно расширить возможности аграриев, включая:

- создание электронных карт полей с высокой детализацией;
- инвентаризацию земельных участков и учет сельхозугодий;
- определение объемов работ и контроль их выполнения;
- отслеживание вегетационного индекса NDVI для оценки здоровья растений;
- контроль внесения удобрений и оценку их эффективности;
- прогнозирование урожайности на основе оценки всхожести растений;
- экологический мониторинг земель, включая выявление эрозии и деградации почв;
- выявление пораженности посевов вредителями и грызунами;
- оценку плодородия почвы и планирование севооборотов.

В последнее время для исследования характеристик БПЛА активно применяются специализированные программы, способные анализировать и оптимизировать параметры летательных аппаратов. Например, для изучения аэродинамических профилей крыльев используются программы численного моделирования [3]. Эти инструменты позволяют уточнять параметры полета и даже оптимизировать геометрию крыльев, что в итоге способствует снижению энергопотребления, увеличению времени полета и повышению грузоподъемности БПЛА. Для повышения эффективности технологии важно учитывать оптимальные характеристики режимов полета (взлет, полет, посадка) и геометрические параметры БПЛА. Большинство исследований профилей крыльев БПЛА самолетного типа связано с моделированием цельной формы, без учета элементов механизации, например закрылков [4], [5], [6], [7]. Основываясь на данных, представленных в [8], [9], это может приводить к неточности в аэродинамических расчетах, т.к. закрылки или любая другая механизация крыла существенно влияют на его подъемную силу и сопротивление, особенно на низких скоростях (например, при взлете и посадке).

Материалы и методы исследования

Моделирование аэродинамики выбранного профиля крыла для БПЛА самолетного типа, используемого в сельском хозяйстве, проводили в ПО Comsol Multiphysics. Данное ПО хорошо себя зарекомендовало при решении подобных задач. В качестве исследуемого профиля был выбран профиль близкий к NACA 6410 при использовании, которого, как и в случае с NACA 8410, отмечается увеличение дальности полета БПЛА самолетного типа и коэффициента его продолжительности по сравнению с часто встречаемым у таких БПЛА профилем NACA 2410 или NACA 4410 [10]. Длина хорды рассматриваемого профиля составляет 0,36 м. Угол установки крыла составляет 3°. На рис. 1 представлены варианты рассматриваемого профиля крыла с закрылком и без. Эти профили использовались для определения влияния зазора, образующегося в верхней части между закрылком и крылом на коэффициент подъемной силы. Толщина этого зазора составляла 1 мм. На рис. 1 в зазор сверху закрыт тонкой линией.

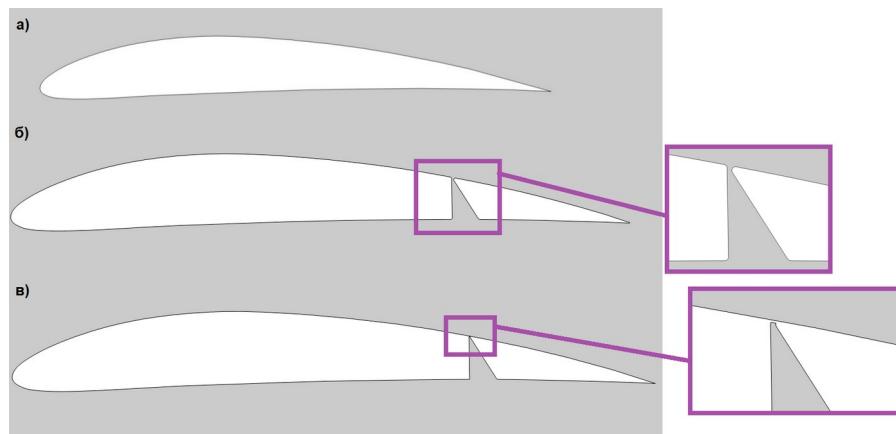


Рисунок 1 - Изображения профилей крыла без закрылка (а), с закрылком, но с зазором между крылом и закрылком (б) и с закрылком без зазора (в)

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.156.100.1>

На рис. 2. представлены варианты исследуемого профиля с закрылком, повернутым на 15° и 30°. Эти режимы используются при взлете и посадке БПЛА.

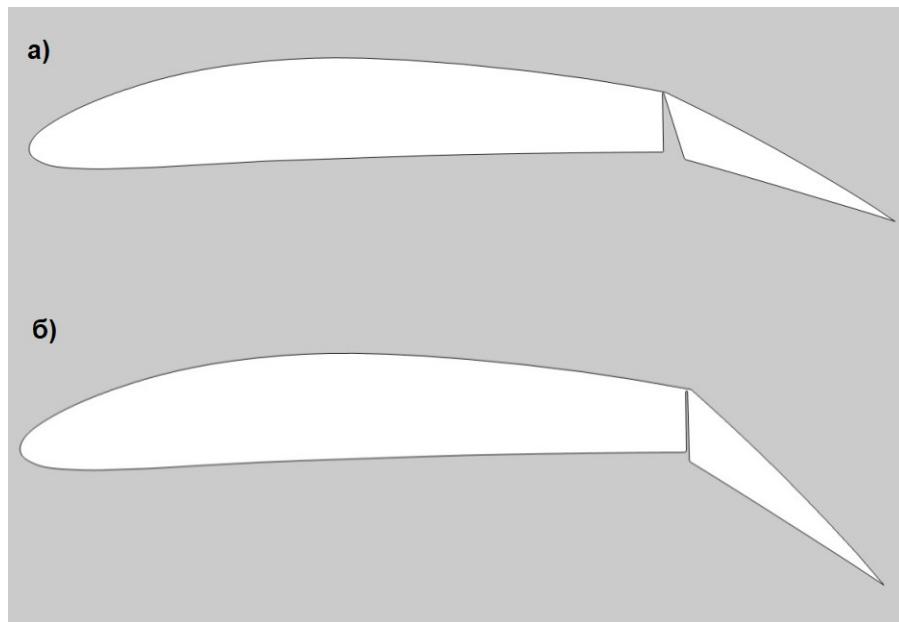


Рисунок 2 - Изображения профилей крыла с закрылком, повернутым на 15° (а) и с закрылком, повернутым на 30° (б)
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.156.100.2>

Для моделирования методом конечных элементов была построена расчетная сетка. Для профиля без механизации использовалась структурированная четырехугольная сетка типа Mapped (рис. 3а). Построить такую сетку для профиля с закрылком оказалось затруднительно ввиду более сложной геометрии рассматриваемого профиля, поэтому в этом случае использовалась комбинированная сетка, которая включала в себя четырехугольные элементы типа Mapped, которые были использованы в области за профилем и Free Quad, которые использовались вблизи профиля («кокон» на рис. 3б). Также были задействованы треугольные элементы типа Free Triangular, которые использовались на остальной геометрической области (рис. 3б). Помимо этого, все профили имели погранслойную сетку с количеством слоев не менее 40 для точного расчета скоростей и давлений воздуха в пристеночных областях (рис. 3).

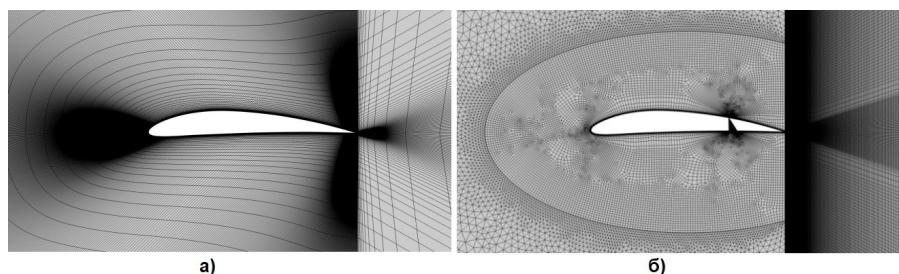


Рисунок 3 - Изображение расчетной сетки используемой в исследовании подъемной силы для выбранного профиля крыла БПЛА самолетного типа используемого в АПК
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.156.100.3>

Температура воздуха в исследовании составляла 20°C . Исследования аэродинамических процессов проводились с использованием нескольких моделей турбулентности. Наиболее стабильные результаты показала модель турбулентности SST. Данная модель — это хороший компромисс между точностью и вычислительной стоимостью для типовых режимов полета БПЛА, сочетающий преимущества моделей $k-\omega$ (в пристеночной области) и $k-\epsilon$ (в основном потоке). Наибольшим ее минусом является неточность при расчете задач с большими углами атаки. Поэтому в данной статье не рассматриваются углы атаки больше 15° . Задача решалась в стационарной постановке в два шага. На первом шаге использовалось исследование Wall Distance для облегчения расчета модели SST в пристеночных областях. На втором шаге производился расчет данной модели при различных углах атаки и скоростях воздуха v на входной границе (границочное условие Inlet на рис. 4).

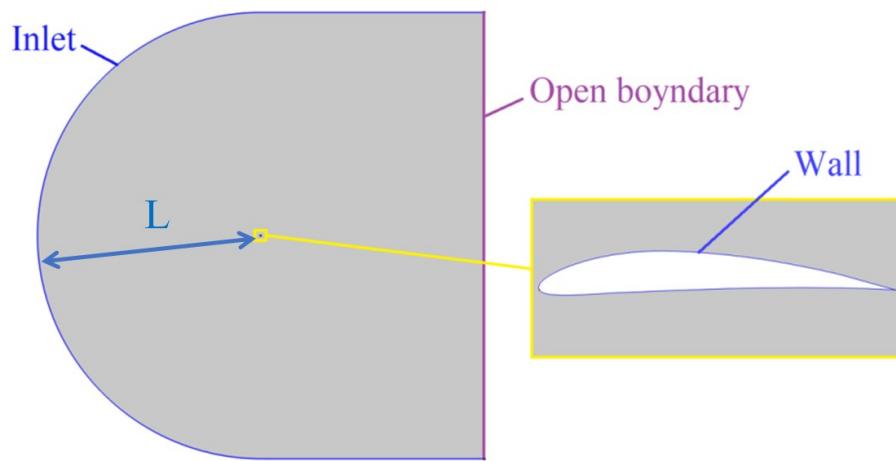


Рисунок 4 - Изображение расчетной области и заданных на ней граничных условий

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.156.100.4>

Для того чтобы свести к минимуму влияние применяемых граничных условий, расстояние L от стенок профиля до внешних границ расчетной области, показанных на рис. 4, составляло не менее 40 м. От параметра L в модели зависят кинетическая энергия турбулентности свободного потока k и удельная скорость диссипации ω :

$$k = 0,1 \frac{\mu v}{\rho L}, \omega = 10 \frac{v}{L} \quad (1)$$

где μ — динамическая вязкость воздуха, кг/(м·с); v — скорость набегающего потока, м/с; ρ — плотность воздуха, кг/м³.

Коэффициент подъемной силы определялся по формуле:

$$C_p = \frac{\Delta p}{\frac{\rho v^2}{2}}, \Delta p = \int_0^b p_B dx - \int_0^b p_H dx \quad (2)$$

где Δp — перепад давления между верхней и нижней поверхностями профиля крыла, Па.

Исследование осуществлялось в два этапа. На первом этапе проводили сравнение подъемной силы, создаваемой профилями с закрылком и без него при разных углах атаки. Скорости полета БПЛА используемых в сельском хозяйстве варьируются от 60 до 100 км/ч. Минимальные скорости используются в качестве крейсерских непосредственно при проведении мониторинга, а максимальные для перелета между полями. Поэтому в исследовании рассматривались такие скорости, как 16,7, 22,2 и 27,7 м/с, т.е. 60, 80 и 100 км/ч соответственно. Эти скорости сопоставимы со скоростями таких известных аграрных БПЛА, как SenseFly eBee SQ и PrecisionHawk Lancaster 5. На втором этапе проводили исследование подъемной силы при углах поворота закрылка 15° и 30°. Так как такой режим работы закрылок соответствует взлету и посадке, то скорости в этом исследовании были меньше, чем в предыдущем и составили 6 и 10 м/с.

Результаты и обсуждение

Моделирование профиля крыла при разных углах атаки и разных скоростях потока показало сильное влияние зазора на коэффициент подъемной силы (табл. 1). Это хорошо видно из рис. 5, где показано сравнение двух профилей с закрылком: в одном зазор не закрыт, в другом закрыт сверху тонкой линией.

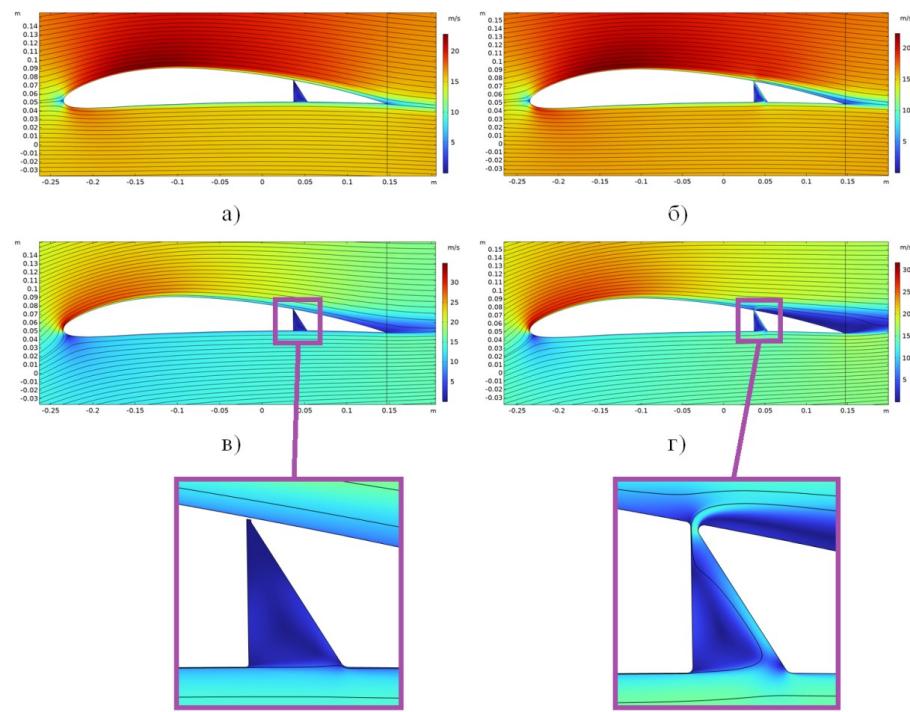


Рисунок 5 - Изображения распределения полей скоростей воздуха вокруг рассматриваемого профиля с закрылком при скорости 16,7 м/с:

а) профиль без зазора, угол атаки 0°; б) профиль с зазором, угол атаки 0°; в) профиль без зазора, угол атаки 9°; г) профиль с зазором, угол атаки 9°

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.156.100.5>

В случае не закрытого зазора между крылом и закрылком формируется дополнительный поток воздуха, нарушающий ламинарное течение в верхней части, крыла из-за чего падает подъемная сила и ухудшается управляемость БПЛА.

Таблица 1 - Результаты моделирования по влиянию зазора закрылка на коэффициент подъемной силы

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.156.100.6>

Угол атаки, °	Скорости воздушного потока, м/с					
	16,7		22,2		27,7	
	с зазором	без зазора	с зазором	без зазора	с зазором	без зазора
0	0,538	0,637	0,541	0,642	0,544	0,647
3	0,833	0,967	0,839	0,974	0,844	0,98
6	1,08	1,27	1,09	1,283	1,1	1,292
9	1,281	1,519	1,301	1,542	1,31	1,557
12	1,433	1,685	1,445	1,714	1,455	1,737
15	1,523	1,717	1,55	1,765	1,568	1,803

Анализ данных из табл. 1 показывает, что зазор приводит к снижению коэффициента подъемной силы при горизонтальном полете на 11–16%. Существенное снижение подъемной силы требует скрытия зазора между крылом и закрылком с помощью специальных накладок из гибкого, растягивающегося материала (рис. 6).

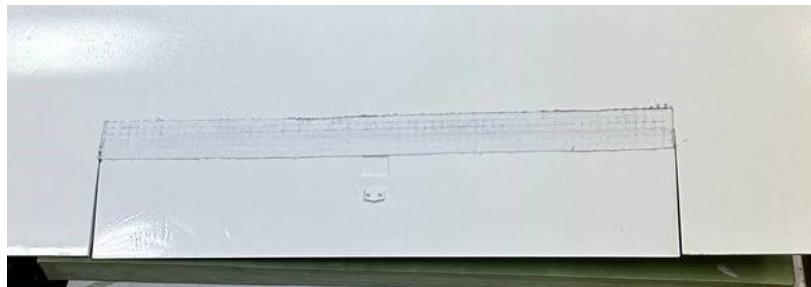


Рисунок 6 - Изображение части крыла БПЛА с закрытым зазором между закрылком и крылом
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.156.100.7>

Также проведено сравнение профиля с закрытым зазором между крылом и закрылком и сплошного профиля без закрылка, который представлен на рис. 1.а. Профиль с закрылком имеет небольшое пространство в нижней части крыла, которое по-разному повлияло на коэффициент подъемной силы при разных углах атаки: при углах атаки от 0° до 6° коэффициент увеличился на 6–2% по сравнению со сплошным профилем без закрылка. А при углах атаки от 9° до 15° наоборот уменьшился на 0,4–9,7% (таблица 2).

Таблица 2 - Сравнение подъемной силы создаваемой сплошным профилем (без закрылка) с подъемной силой создаваемой профилем с закрылком в котором закрыт зазор

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.156.100.8>

Угол атаки, °	Скорости потока, м/с								
	16,7		22		27				
	Тип профиля	Степен ь измене ния	Тип профиля	Степен ь измене ния	Тип профиля	Степен ь измене ния	Тип профиля	Степен ь измене ния	
	Сплош . проф	Проф. с закрыл .	%	Сплош . проф	Проф. с закрыл .	%	Сплош . проф	Проф. с закрыл .	%
0	0,601	0,637	6,6	0,607	0,642	5,8	0,611	0,647	5,9
3	0,93	0,967	4,0	0,936	0,974	4,1	0,943	0,98	3,9
6	1,243	1,27	2,2	1,256	1,283	2,1	1,265	1,292	2,1
9	1,525	1,519	-0,4	1,542	1,541	-0,1	1,556	1,557	0,1
12	1,756	1,685	-4	1,779	1,714	-3,7	1,796	1,737	-3,3
15	1,902	1,717	-9,7	1,941	1,765	-9,7	1,966	1,803	-8,3

Следующим этапом было проведение исследований аэродинамических характеристик профиля крыла с закрылком при разных углах его поворота. Поворачивание закрылок происходит при режимах полета «Взлет» и «Посадка». Повороты закрылок приводят к увеличению коэффициентов подъемной силы, но срывы воздушных потоков начинаются при меньших углах атаки. Так, на рисунках 7 и 8 представлены поля скоростей при углах атаки 3° и 12°. При угле атаки 12° уже видны закручивание воздушных масс, что может привести к поверхностному срыву и резкому снижению коэффициента подъемной силы.

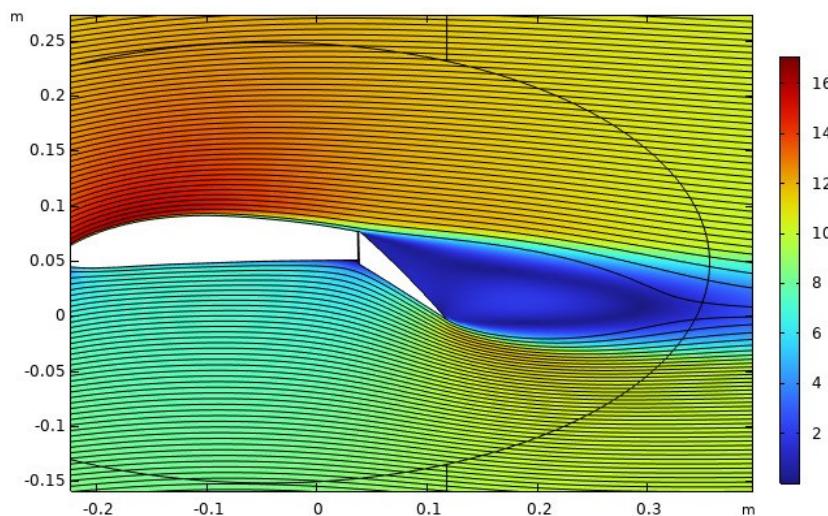


Рисунок 7 - Поле скоростей вокруг профиля при угле закрылка 30° и угле атаки 3°
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.156.100.9>

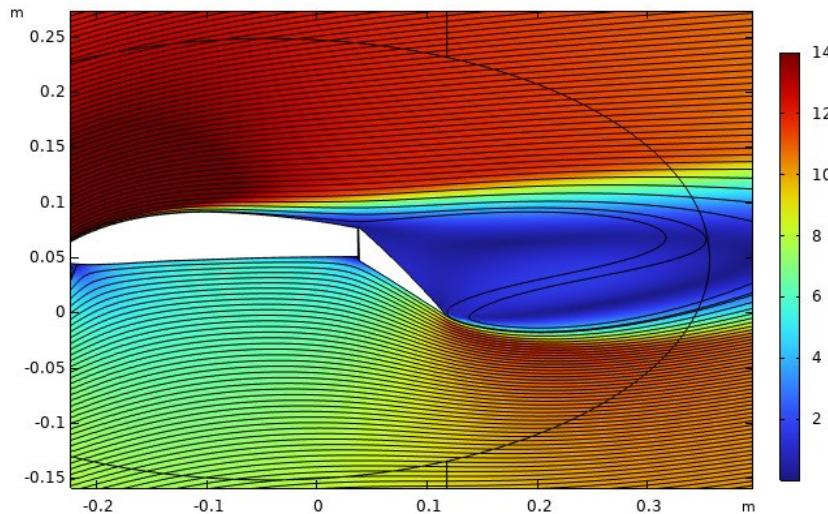


Рисунок 8 - Поле скоростей вокруг профиля при угле закрылка 30° и угле атаки 12°
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.156.100.10>

Проведено моделирование аэродинамических процессов вокруг профиля крыла при разных скоростях воздушного потока и разных углах атаки. Результаты сведены в таблицу 3. Из данной таблицы видно, что при угле атаки 3° (базовая ось БПЛА при этом расположена горизонтально) закрылки дают прибавку подъемной силы 85%, а при угле атаки 6° уже прибавка составляет только 20%. При угле поворота закрылок на 15° при угле атаки более 6° наблюдался уже срыв воздушных потоков и расчет не сходился.

Таблица 3 - Результаты моделирования аэродинамических процессов на профилях крыла при разных скоростях воздушного потока и разных углах атаки

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.156.100.11>

Угол атаки	Скорости воздушного потока, м/с					
	6			10		
	Угол поворота закрылка			Угол поворота закрылка		
	0°	15°	30°	0°	15°	30°
0	0,57	1,341	1,30	0,586	1,342	1,307
3	0,88	1,524	1,537	0,909	1,529	1,547
6	1,20	1,669	1,746	1,218	1,705	1,762
9	1,45	-	1,876	1,487	-	1,923

Угол атаки	Скорости воздушного потока, м/с					
	6		10			
	Угол поворота закрылка			Угол поворота закрылка		
12	1,6	-	1,807	1,699	-	1,91

Заключение

По результатам проведенного исследования можно сделать следующие выводы. Моделирование участка крыла с закрылком показало следующее: наличие зазора (1 мм) в верхней части примыкания закрылка к крылу приводит к снижению коэффициента подъемной силы при горизонтальном полете и скорости потока воздуха от 16,7 до 27 м/с на 11–16%. Следовательно, зазор нужно ликвидировать. С закрытым зазором в нижней части крыла между закрылком и крылом появляется воздушное пространство, которое по разному повлияло на коэффициент подъемной силы при разных углах атаки по сравнению с профилем без закрылка: при углах атаки от 0° до 6° коэффициент увеличился на 6 – 2%, а при углах атаки от 9° до 15° наоборот уменьшился на 0,4–9,7%. При данном закреплении крыла (3°) и горизонтальном полете в данном участке крыла будет увеличение подъемной силы на 4%. Моделирование аэродинамических процессов на профилях крыла с закрылками при разных скоростях воздушного потока и разных углах атаки показали, что при угле атаки 3° (горизонтальный полет) закрылки дают прибавку подъемной силы 85%, а при угле атаки 6° уже прибавка составляет только 20%. Следовательно, в режимах «Взлет» и «Посадка» рациональней держать угол подъема фюзеляжа на уровне 0° и не превышать 3°. На коэффициент подъемной силы не значительно влияет угол установки закрылков (15°–30°). Скорее всего этот угол будет больше влиять на лобовое сопротивление.

Таким образом, можно дать следующие практические рекомендации для инженеров-конструкторов при проектировании аграрных БПЛА с профилем NACA 6410 или близким к нему:

1. Ликвидировать зазор в верхней части примыкания закрылка для предотвращения потери подъемной силы.
2. Оптимизировать нижний зазор для минимизации негативного влияния на аэродинамику при углах атаки более 6°, если они требуются.
3. В режимах взлета и посадки удерживать угол атаки в пределах 3°–6° для максимальной эффективности закрылок.
4. Угол отклонения закрылка (15°–30°) выбирать исходя из минимизации лобового сопротивления, а не подъемной силы.

Данные рекомендации позволяют улучшить аэродинамические характеристики крыла и повысить эффективность использования закрылок в различных режимах полета.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Бережнов Н.Н. Особенности использования беспилотных летательных аппаратов в сельском хозяйстве / Н.Н. Бережнов, Н.В. Дуничев // Современные тенденции сельскохозяйственного производства в мировой экономике: материалы XVIII Международной научно-практической конференции. — Кемерово: Кузбасская ГСХА, 2019. — С. 153–157.
2. Сорокин А.Е. Использование БПЛА для мониторинга сельскохозяйственных земель / А.Е. Сорокин, М.В. Желонкин, С.С. Огородников // СТИН. — 2022. — № 10. — С. 16–19.
3. Вождаев В. Численное моделирование ламинарно-турбулентного перехода на профиле крыла, выполненное в программном комплексе ANSYS CFX / В. Вождаев // САПР и графика. — 2012. — № 6(188). — С. 90–92.
4. Бузыкин О.Г. Численное моделирование аэродинамических характеристик малоразмерного летательного аппарата / О.Г. Бузыкин, А.В. Казаков, А.В. Шустов // Ученые записки ЦАГИ. — 2010. — Т. 41, № 5. — С. 21–32.
5. Аэродинамическое проектирование летательного аппарата ромбовидной формы в плане / В.В. Лазарев, А.А. Павленко, А.А. Разов [и др.] // Ученые записки ЦАГИ. — 2011. — Т. 42, № 4. — С. 30–37.
6. Буй В.Т. Моделирование обтекания модели в закрытой рабочей части аэродинамической трубы малых скоростей и в свободном потоке / В.Т. Буй, В.И. Лагыгин // Теплофизика и аэромеханика. — 2015. — Т. 22, № 3. — С. 365–372.
7. Азиз М.А. Численное исследование и оптимизация управления течением на крыле с использованием пассивных струй воздуха / М.А. Азиз, А.М. Эльсайд // Теплофизика и аэромеханика. — 2019. — Т. 26, № 3. — С. 391–406.
8. Srivastava S. Analysis on NACA 2412 airfoil for UAV based on high-lift devices / S. Srivastava, C.V.N. Aditya // International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology. — 2016. — Vol. 1, Issue 6. — P. 13–16.
9. Кузьмин К.Е. Моделирование аэродинамики крыла с элементами механизации / К.Е. Кузьмин, И.В. Тетерина // Фундаментальные и прикладные исследования. Актуальные проблемы и достижения: сборник избранных статей Всероссийской (национальной) научной конференции. — Санкт-Петербург: НАЦРАЗВИТИЕ, 2022. — С. 30–32.

10. Jo B.W. Enhanced Range and Endurance Evaluation of a Camber Morphing Wing Aircraft / B.W. Jo, T. Majid // Biomimetics. — 2023. — Vol. 8, No. 1. — P. 34. — DOI: 10.3390/biomimetics8010034

Список литературы на английском языке / References in English

1. Berezhnov N.N. Osobennosti ispol'zovaniya bespilotnykh letatel'nykh apparatov v sel'skom hozjajstve [Features of Using Unmanned Aerial Vehicles in Agriculture] / N.N. Berezhnov, N.V. Dunichev // Sovremennye tendencii sel'skohozjajstvennogo proizvodstva v mirovoj ekonomike: materialy XVIII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii [Modern trends of agricultural production in the world economy: Proceedings of the XVIII International Scientific and Practical Conference]. — Kemerovo: Kuzbass State Agricultural Academy, 2019. — P. 153–157. [in Russian]
2. Sorokin A.E. Ispol'zovanie BPLA dlja monitoringa sel'skohozjajstvennyh zemel' [Use of UAVs for Agricultural Land Monitoring] / A.E. Sorokin, M.V. Zhelonkin, S.S. Ogorodnikov // STIN. — 2022. — № 10. — P. 16–19. [in Russian]
3. Vozhdaev V. Chislennoe modelirovanie laminarno-turbulentnogo perehoda na profile kryla, vypolnennoe v programmnom kompleksse ANSYS CFX [Numerical Simulation of Laminar-Turbulent Transition on a Wing Profile Performed in ANSYS CFX Software] / V. Vozhdaev // SAPR i grafika [CAD and graphics]. — 2012. — № 6(188). — P. 90–92. [in Russian]
4. Buzykin O.G. Chislennoe modelirovanie aerodinamicheskikh harakteristik malorazmernogo letatel'nogo appara [Numerical Simulation of Aerodynamic Characteristics of Small-Sized Aircraft] / O.G. Buzykin, A.V. Kazakov, A.V. Shustov // Uchenye zapiski CAGI [Scientific Notes of CAI]. — 2010. — Vol. 41, № 5. — P. 21–32. [in Russian]
5. Aerodinamicheskoe proektirovanie letatel'nogo appara rombovidnoj formy v plane [Aerodynamic Design of Diamond-Shaped Aircraft] / V.V. Lazarev, A.A. Pavlenko, A.A. Razov [et al.] // Uchenye zapiski CAGI [Scientific Notes of CAI]. — 2011. — Vol. 42, № 4. — P. 30–37. [in Russian]
6. Buj V.T. Modelirovanie obtekaniya modeli v zakrytoj rabochej chasti aerodinamicheskoy truby malyh skorostej i v svobodnom potoke [Simulation of Model Flow in Closed Test Section of Low-Speed Wind Tunnel and in Free Stream] / V.T. Buj, V.I. Lapygin // Teplofizika i aeromehanika [Thermophysics and aeromechanics]. — 2015. — Vol. 22, № 3. — P. 365–372. [in Russian]
7. Aziz M.A. Chislennoe issledovanie i optimizacija upravlenija techeniem na kryle s ispol'zovaniem passivnyh struj vozduha [Numerical Study and Optimization of Flow Control on a Wing Using Passive Air Jets] / M.A. Aziz, A.M. Jehl'sajed // Teplofizika i aeromehanika [[Thermophysics and aeromechanics]]. — 2019. — Vol. 26, № 3. — P. 391–406. [in Russian]
8. Srivastava S. Analysis on NACA 2412 airfoil for UAV based on high-lift devices / S. Srivastava, C.V.N. Aditya // International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology. — 2016. — Vol. 1, Issue 6. — P. 13–16.
9. Kuz'min K.E. Modelirovanie aerodinamiki kryla s jelementami mehanizacii [Simulation of Wing Aerodynamics with High-Lift Devices] / K.E. Kuz'min, I.V. Teterina // Fundamental'nye i prikladnye issledovaniya. Aktual'nye problemy i dostizheniya: sbornik izbrannyyh statej Vserossijskoj (nacional'noj) nauchnoj konferencii [Fundamental and applied research. Current problems and achievements: a collection of selected articles of the All-Russian (National) Scientific Conference]. — Saint Petersburg: NACRAZVITIE, 2022. — P. 30–32. [in Russian]
10. Jo B.W. Enhanced Range and Endurance Evaluation of a Camber Morphing Wing Aircraft / B.W. Jo, T. Majid // Biomimetics. — 2023. — Vol. 8, No. 1. — P. 34. — DOI: 10.3390/biomimetics8010034