

Моделирование и конструктивные особенности импеллера беспилотного воздушного судна самолётного типа

И.И. Хасанов, И.И. Слатов

Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации

Аннотация: В статье рассматривается процесс разработки и моделирования импеллера для беспилотного воздушного судна самолётного типа. Проведены аэродинамические и прочностные расчеты, определены ключевые конструктивные параметры, включая количество лопастей, мощность двигателя и выбор материала. Разработанные модели созданы в САД-системе Компас 3D и изготовлены методом 3D - печати с использованием PETG-пластика. Проведены испытания тяги импеллера в зависимости от оборотов двигателя, что позволило оптимизировать конструкцию для максимальной эффективности.

Ключевые слова: импеллер, беспилотное воздушное судно, аэродинамика, 3D-моделирование, Компас 3D, аддитивные технологии, тяга, испытания, АРМ FEM.

С развитием беспилотных летательных аппаратов самолётного типа возрастает необходимость в эффективных и компактных силовых установках. Беспилотные воздушные суда, в том числе, различные летательные аппараты самолётного типа, занимают важное место в современных технологиях. Эти устройства находят применение в широком спектре отраслей: от военной авиации и исследований до гражданского использования и коммерческих услуг. Одним из ключевых элементов в конструкции беспилотного воздушного судна (далее БВС) является пропульсивная система, которая включает в себя двигатели и импеллеры, ответственные за подъем и маневренность устройства [1].

Моделирование импеллера БВС самолётного типа представляет собой сложную инженерную задачу, требующую учета множества факторов, включая аэродинамические, конструктивные и эксплуатационные характеристики [2]. В последние десятилетия особое внимание уделяется созданию многофункциональных воздушных судов самолётного типа, что

делает импеллеры перспективными для различных сфер применения, таких как гражданская и военная авиация.

Импеллеры, используемые в беспилотных воздушных судах самолетного типа, являются ключевыми элементами силовой установки. Их конструкция должна обеспечивать эффективное преобразование мощности двигателя в тягу, необходимую для поддержания полета и выполнения маневров [3]. Подобные решения по оптимизации конструкции, как например изменение угла установки лопастей, продемонстрировали рост полезной нагрузки на 7,8% в исследовании [9], что может быть учтено и при проектировании импеллеров. Основной конструктивной особенностью импеллеров является наличие кольцевого обтекателя, который уменьшает концевое обтекание и повышает аэродинамическую эффективность. Применение импеллеров в беспилотных летательных аппаратах обеспечивает высокую эффективность, низкий уровень шума и повышенную безопасность [10].

Основные конструктивные требования к импеллерам включают несколько ключевых аспектов. Во-первых, требуется обеспечить минимальный вес конструкции для повышения общей эффективности полета. Это достигается использованием легких и прочных материалов, способных выдерживать высокие эксплуатационные нагрузки. Во-вторых, необходимо учитывать геометрические параметры, такие как угол установки и форма лопастей, которые напрямую влияют на эффективность создания тяги. Также важна высокая точность изготовления, особенно в случае применения технологий 3D-печати, для обеспечения сбалансированности конструкции и предотвращения вибраций во время работы.

Аэродинамические характеристики играют важную роль в работе импеллера. Основное внимание уделяется оптимальной форме лопастей,

которая минимизирует сопротивление воздуха и обеспечивает максимальную тягу. При этом важно учитывать соотношение между числом оборотов двигателя и создаваемой тягой, чтобы обеспечить стабильность и эффективность полета. Для этого проводится детальное моделирование воздушных потоков и расчет нагрузок, которым подвергаются элементы конструкции во время работы [4].

Прочностные характеристики также являются важным фактором. Материалы, используемые для изготовления импеллера, должны обладать высокой устойчивостью к механическим нагрузкам, температурным перепадам и вибрациям. Это особенно критично для элементов, подверженных интенсивным нагрузкам, таких как лопасти и соединительные узлы. Использование современных материалов, таких как PETG-пластик, позволяет обеспечить необходимую прочность при сохранении минимального веса конструкции.

Таким образом, успешная разработка импеллера для БВС самолетного типа требует комплексного подхода, учитывающего как конструктивные, так и аэродинамические особенности. Важным этапом является оптимизация конструкции для достижения максимальной эффективности при сохранении прочностных характеристик, необходимых для надежной и безопасной эксплуатации [5].

В то же время, несмотря на относительную доступность на рынке уже готовых решений, для решения некоторых задач экспериментальных исследований они часто представляют собой готовое решение, не позволяющий вносить изменения в аппаратную часть [6].

В рамках данной работы был проведен анализ, благодаря которому определены, какие аэродинамические, конструктивные и эксплуатационные характеристики необходимы для будущей модели. Были рассчитаны

ключевые параметры, такие как количество лопастей импеллера, мощность двигателя, прочностные характеристики материалов, а также требования к весу. Общие характеристики конструкции модели импеллера представлены в таблице №1.

Таблица №1

Общие характеристики модели импеллера

Параметр	Обозначение параметра	Единица измерения	Значение
Тяга	P	г	400 – 450
Радиус	R	мм	45
Вес	P	г	200 – 210

На основе проведенного анализа были сформированы эскизные наброски, которые легли в основу разработки варианта модели прототипа импеллера. В результате комплексного исследования их параметров был выбран оптимальный вариант для дальнейшего проектирования (рис.1). Разработка моделей велась в программе Компас 3D – системе сквозного проектирования класса CAD/CAM/CAE, которая дает возможность выполнять проектные работы комплексно [7].

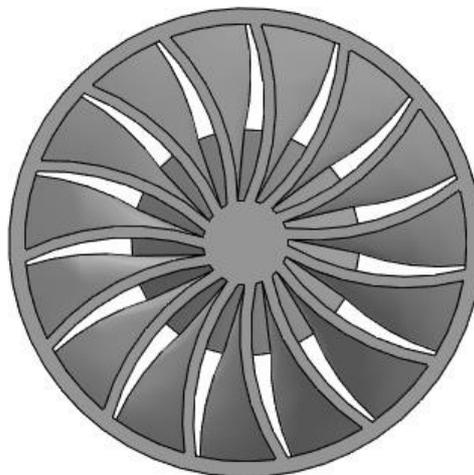


Рис. 1. – Модель крыльчатки, вид сверху

Спроектированная крыльчатка импеллера обладает рядом преимуществ, делающих её оптимальной для использования в составе беспилотных воздушных судов, а именно:

1. Повышенная аэродинамическая эффективность

Изогнутая форма и оптимизированный профиль лопаток способствуют максимальному увеличению тяги при минимальных аэродинамических потерях.

Конструкция снижает турбулентность воздушного потока, что повышает КПД воздушного винта и улучшает динамику полета.

2. Высокая структурная прочность и устойчивость к нагрузкам

Наличие внешнего кольца придает конструкции дополнительную жесткость, предотвращая деформацию лопаток при высоких оборотах.

Конструкция устойчива к высоким перегрузкам, что особенно важно для БВС, работающих в экстремальных условиях.

3. Эффективность при высоких оборотах

Конструкция крыльчатки позволяет работать на высоких оборотах без значительных потерь КПД, что важно для высокоскоростных дронов и беспилотных самолетов с реактивной тягой.

Высокая степень сжатия воздушного потока улучшает тяговые характеристики при ограниченных размерах.

Для достоверности выбранной формы крыльчатки были произведены расчеты в приложении АРМ FEM, которое предназначено для выполнения экспресс-расчетов твердотельных объектов в системе КОМПАС-3D. На рис. 2 представлена визуализация результатов выполненных расчетов.

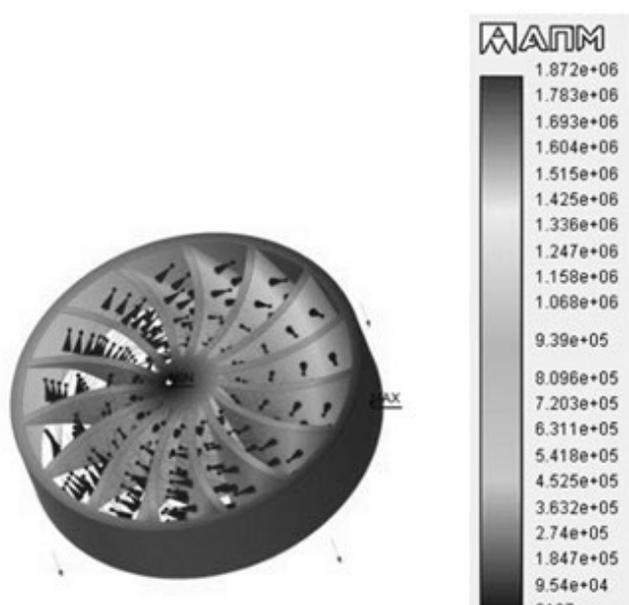


Рис. 2. – Суммарное линейное перемещение

Исходя из произведенного моделирование в приложении АРМ FEM следует отметить следующее:

– максимальные напряжения сосредоточены по внешнему краю импеллера. Это указывает на влияние центробежных сил, возникающих при вращении.

– центральная зона (место крепления) испытывает минимальные напряжения

– данный анализ подтверждает, что конструкция крыльчатки в составе импеллера рассчитана на высокие нагрузки (таблица №2).

Таблица №2

Инерционные характеристики модели крыльчатки

Наименование	Единица измерения	Значение
Масса модели	кг	0.052057
Центр тяжести модели	мм	(-0.000048; -0.000046; 9.247315)
Моменты инерции модели относительно центра масс	кг·мм ²	(23.774962; 23.774797; 44.25216)
Реактивный момент относительно центра масс	Н·мм	(-0.93867; 0.489288; 0.131145)
Суммарная реакция опор	Н	(0; 0; -0.309974)
Абсолютное значение реакции	Н	0.307874
Абсолютное значение момента	Н·мм	1.057679

При проектировании корпуса особое необходимо обеспечить оптимальный поток воздуха и защиту вращающихся частей от внешних воздействий. Конструкция корпуса включает в себя ряд конструктивных особенностей, влияющих на его эксплуатационные характеристики (рис. 3)

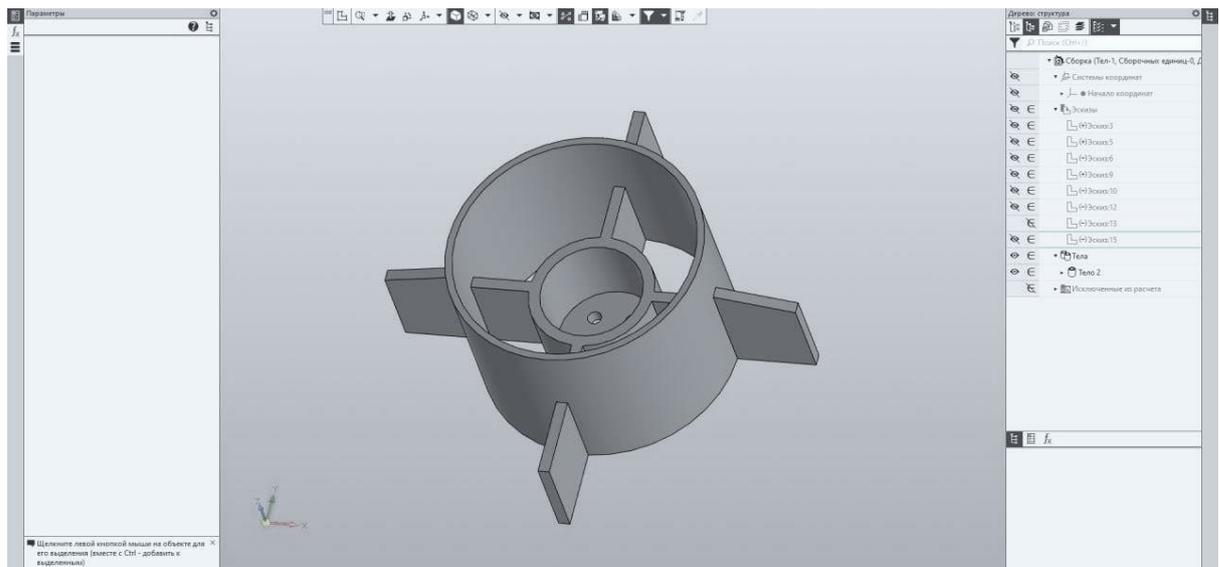


Рис. 3. – 3D – модель корпуса

Корпус спроектирован таким образом с учетом следующих требований:

- обеспечение жёсткости конструкции и направление воздушного потока.
- уменьшение аэродинамических потерь, для обеспечения равномерного распределения давления в рабочей зоне импеллера.
- усиление прочности конструкции для предотвращения деформации при высоких нагрузках.
- стабилизации потока воздуха при входе в рабочую зону.

Таким образом, спроектированный корпус выполняет следующие основные функции:

- защита крыльчатки от внешних воздействий.
- оптимизация воздушного потока для повышения КПД системы.
- жёсткость конструкции, предотвращающая вибрации и механические повреждения (рис. 4).

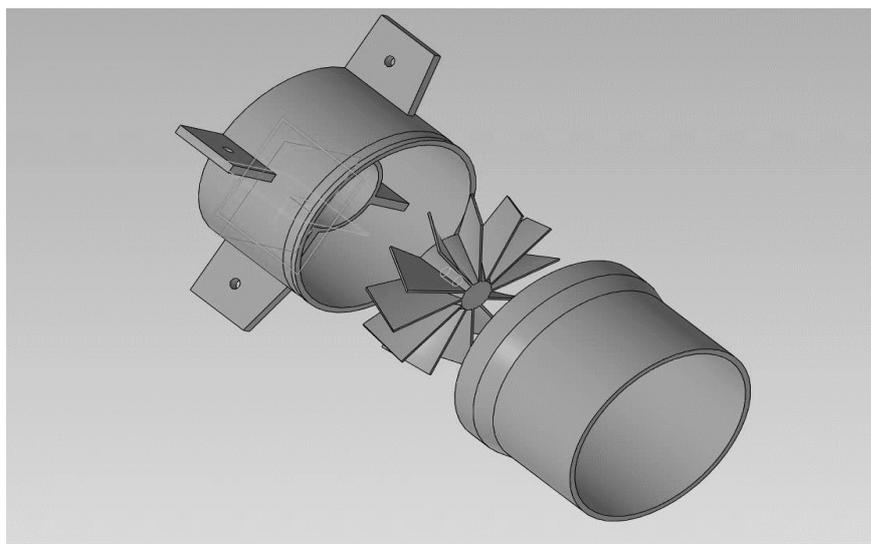


Рис. 4. – Основная модель кожуха, крыльчатки и корпуса

Для прототипирования был использован аддитивный технологический процесс. Данная технология имеет высокое разрешение печати и может создавать объекты со сложными геометрическими формами и мелкими деталями, а также быстрая передача данных и сокращение задержек позволяет осуществлять мониторинг и контроль операций 3D-печати в режиме реального времени, повышая эффективность и минимизируя ошибки [8]. В качестве сырья для печати использовался PETG-пластик, так как он имеет широкий диапазон рабочих температур, высокую прочность. Также у данного пластика отсутствует усадка, что дает высокую точность размеров.

Была проведена серия испытаний с использованием весов для измерения тяги импеллера и ее зависимости от оборотов двигателя (рис. 5). В ходе тестирования была выявлен оптимальный вариант корпуса импеллера для максимизации тяги. На основании результатов тестирования были внесены дополнительные коррективы, направленные на улучшение аэродинамических характеристик и дальнейших доработок прототипа.



Рис. 5. – Лабораторный стенд для проведения испытани модели

Данный импеллер обладает оптимизированной аэродинамической и конструктивной конфигурацией, обеспечивающей высокую эффективность работы при минимальных потерях энергии. Довольная малая масса и симметричное распределение моментов инерции способствуют улучшенной балансировке и устойчивости к вибрациям, что критично для применения в беспилотных летательных аппаратах. Анализ реактивных моментов показал их незначительное влияние на систему управления, а расчёт нагрузок на опоры подтвердил достаточную прочность конструкции. Таким образом, смоделированный импеллер представляет собой перспективное решение для применения данной конфигурации в различных отраслях, требующих высокой надёжности, компактности и аэродинамической эффективности.

Литература

1. Булат П.В., Дудников С.Ю., Кузнецов П.Н. Основы аэродинамики беспилотных воздушных судов: Учебное пособие. – М.: Издательство «Спутник +», 2021. – 273 с.
2. Бородкин С.Ф., Киселев М.А. Прикладные методы математического моделирования движения беспилотных воздушных судов: учебное пособие. – М. : ИД Академии Жуковского, 2023. – 124 с.
3. Легконогих, Д. С., Крылов, А. А., Иванов, М. С. Современное состояние и перспективы развития силовых установок беспилотных летательных аппаратов // Военная мысль. 2019. №4. С.57-71.
4. Назаров Д. В. Никитин А.Н, Тарасова Е.В. Экспериментальная аэродинамика: Учебное пособие. – Самара: Издательство Самарского университета, 2020. – 176 с.
5. Лавров В. А., Петров И. В. Сравнительная оценка лётно-технических характеристик скоростных винтокрылых летательных аппаратов различных схем // Материалы XXXIV научно-технической конференции ЦАГИ. 2024.
6. Лукьянов, О.Е., Золотов, Д.В., Эспиноса Барсенас, О.У., Комаров, В.А. Определение аэродинамических характеристик малоразмерных беспилотных летательных аппаратов в лётном эксперименте // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2023. Т. 22, № 3. С. 59-74. DOI: 10.18287/2541-7533-2023-22-3-59-74
7. Асеева Е.Н., Авдеюк О.А., Асеева С.Д., Авдеюк Д.Н. Алгоритмы и программные средства машинной графики для построения и визуализации твердотельных моделей // Инженерный вестник Дона. 2019. №1. URL:

ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_22_Avseeva_Avdeuk.pdf_11db8cee1f.pdf (дата обращения 23.03.2025)

8. Figovsky O. Novel US Patents on the 3D – print // Инженерный вестник Дона. 2024. № 7. URL: ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_83__7_Figovsky.pdf_33d364f47f.pdf (дата обращения 22.02.2025)

9. Li, H.; Liu, K. Aerodynamic Design Optimization and Analysis of Ducted Fan Blades in DEP UAVs. // Aerospace 2023, 10, p.13. URL: doi.org/10.3390/aerospace10020153 (дата обращения 22.03.2025)

10. Yiwei LUO, Tianfu AI ,Yuhang HE, Bin XU, Yuping QIAN, Yangjun ZHANG Numerical investigation on unsteady characteristics of ducted fans in ground effect // Chinese Journal of Aeronautics. Volume 36, Issue 9, pp. 79-95. URL: doi.org/10.1016/j.cja.2023.04.004 (дата обращения 22.03.2025)

References

1. Bulat P.V., Dudnikov S.Ju., Kuznecov P.N. Osnovy ajerodinamiki bespilotnyh vozdushnyh sudov [Fundamentals of Unmanned Aerial Vehicle Aerodynamics]: Uchebnoe posobie. M.: Izdatel'stvo «Sputnik +», 2021. 273 p.

2. Borodkin S.F., Kiselev M.A. Prikladnye metody matematicheskogo modelirovanija dvizhenija bespilotnyh vozdushnyh sudov [Applied methods of mathematical modeling of unmanned aerial vehicle movement]: uchebnoe posobie. M. : ID Akademii Zhukovskogo, 2023. 124 p.

3. Legkonogih D. S., Krylov A. A., Ivanov M. S. Voennaja mysl'. 2019. №4. pp.57-71.

4. Nazarov D. V. Nikitin A.N, Tarasova E.V. Jeksperimental'naja ajerodinamika [Experimental Aerodynamics]: Uchebnoe posobie. Samara: Izdatel'stvo Samarskogo universiteta, 2020. 176 p.

5. Lavrov, V. A., Petrov, I. V. Materialy XXXIV nauchno-tehnicheskoy konferencii CAGI. 2024.
6. Luk'janov, O.E., Zolotov, D.V., Jespinosa Barsenas, O.U., Komarov, V.A. Vestnik Samarskogo universiteta. Ajerokosmicheskaja tehnika, tehnologii i mashinostroenie. 2023. T. 22, № 3. pp. 59-74. DOI: 10.18287/2541-7533-2023-22-3-59-74
7. Aseeva E.N., Avdejuk O.A., Aseeva S.D., Avdejuk D.N. Inzhenernyj vestnik Dona. 2019. №1. URL: ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_22_Avseeva_Avdeuk.pdf_11db8cee1f.pdf
8. Figovsky O. Inzhenernyj vestnik Dona. 2024. № 7. URL: ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_83__7_Figovsky.pdf_33d364f47f.pdf.
9. Li, H.; Liu, K. Aerospace 2023, 10, p. 13. URL: doi.org/10.3390/aerospace10020153
10. Yiwei LUO, Tianfu AI ,Yuhang HE, Bin XU, Yuping QIAN, Yangjun ZHANG Chinese Journal of Aeronautics. Volume 36, Issue 9, pp. 79-95 URL: doi.org/10.1016/j.cja.2023.04.004

Дата поступления: 7.03.2025

Дата публикации: 25.04.2025