



РАЗРАБОТКА И ПРОИЗВОДСТВО ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ БЕСПИЛОТНОЙ СИСТЕМЫ МУЛЬТИРОТОРНОГО ТИПА КЛАССА 75 ММ

А. М. Борышнев, А. С. Костин

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

В работе рассматриваются этапы разработки и изготовления корпуса для беспилотной системы класса 75 мм. На основе анализа исходной конструкции и регламента соревнований сформулированы требования к корпусу: обеспечение крепления FPV-камеры с регулируемым углом наклона, интеграция платы светодиодной подсветки, защита электронных компонентов при минимальной массе и низкой себестоимости изготовления. Выполнено твердотельное 3D-моделирование рамы, корпуса и элементов крепежа, подготовка модели к изготовлению методом вакуумной формовки, спроектирована матрица и оборудование для формования листовых термопластов. Экспериментально опробованы материалы PETG и ПНД, проведено сравнение полученных оболочек по толщине, жесткости и технологичности последующей обработки. Показано, что сочетание вакуумной формовки для тонкостенного корпуса и 3D-печати для мелких деталей крепления позволяет получить легкий, ремонтопригодный и недорогой корпус беспилотной системы, удовлетворяющий требованиям регламента и обеспечивающий возможность индивидуализации внешнего вида.

Ключевые слова: беспилотные системы, БАС, 3D-моделирование, вакуумная формовка, листовые термопласти.

Для цитирования:

Борышнев, А. М. Разработка и производство элементов конструкции беспилотной системы мультироторного типа класса 75 мм / А. М. Борышнев, А. С. Костин // Системный анализ и логистика. – 2025. – № 5(48). – с. 111-120. DOI: 10.31799/2077-5687-2025-5-111-120.

DEVELOPMENT AND PRODUCTION OF UNMANNED SYSTEM ELEMENTS OF THE 75 MM CLASS MULTIROTOR TYPE

A. M. Boryshnev, A. S. Kostin

St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

This paper examines the development and manufacturing stages of a housing for a 75mm-class unmanned aerial vehicle (UAV) system. Based on an analysis of the initial design and competition regulations, the requirements for the housing were formulated: mounting an FPV camera with an adjustable tilt angle, integrating an LED backlight board, and protecting the electronic components while minimizing weight and reducing manufacturing costs. Solid-state 3D modeling of the frame, housing, and fasteners was performed, the model was prepared for vacuum forming, and a mold and equipment for forming sheet thermoplastics were designed. PETG and HDPE materials were experimentally tested, and the resulting shells were compared in terms of thickness, rigidity, and subsequent processing. It is shown that a combination of vacuum forming for the thin-walled housing and 3D printing for small fastening parts allows for a lightweight, repairable, and affordable UAV housing that meets regulations and allows for customization of the exterior.

Keywords: unmanned systems, UAS, 3D modeling, vacuum forming, sheet thermoplastics.

For citation:

Boryshnev, A. M. Development and production of unmanned system elements of the 75 mm class multirotor type / A. M. Boryshnev, A. S. Kostin // System analysis and logistics. – 2025. – № 5(48). – p. 111-120. DOI: 10.31799/2077-5687-2025-5-111-120.

Введение

Основным элементом любого квадрокоптера является его рама. Для крупных дронов (диагональю более 100 мм) она, как правило, представлена сборной конструкцией из карбона и металла [1, 2]. Такой выбор материалов обусловлен необходимостью обеспечить максимальную жёсткость конструкции, что способствует улучшению лётных характеристик. Однако для малых дронов, представленных в современном спорте классом 75 мм (к которому также относятся дроны с диагональю 65 мм), рамы создаются из ударопрочных пластиков методом литья под давлением. Как известно, с уменьшением линейного размера объекта его вес изменяется с кубической зависимостью. Это правило относится и к дронам: модели малых размеров получаются сверхлёгкими (вес спортивных квадрокоптеров в классе 75 мм на



момент написания статьи составляет в среднем 40-45 граммов). Столь малый вес позволяет обеспечить достаточную жёсткость конструкции без использования тяжёлых композитных материалов, а производство из пластика даёт возможность получить полностью функциональную раму как единую деталь, включающую крепления для всех электронных компонентов и защиту винтов. Внешний вид одной из наиболее популярных рам (Air75) представлен на рисунке 1.



Рис. 1. Рама BetaFPV Air75

Данная рама, как и абсолютное большинство её аналогов, представленных сейчас на рынке, обладает всеми необходимыми креплениями для установки комплектующих квадрокоптера: полётного контроллера, моторов, аккумулятора [3]. Единственный компонент, крепление которого на типовых рамках отсутствует – это камера. Это обусловлено личными предпочтениями пилотов дронов: каждый самостоятельно подбирает комфортный угол установки камеры, поэтому её крепление должно быть подвижным, позволяя изменять этот угол, или производиться индивидуально. Обычно производители гоночных дронов избегают универсальных креплений т.к. они тяжелее вариантов с фиксированным углом камеры [4]. Большинство пилотов же предпочитает печатать крепления для камеры на 3D принтере, выбирая их модель с тем углом установки, который им комфортен. Некоторым «промежуточным» вариантом является крепление с несколькими заранее заготовленными углами установки. По весу оно лишь незначительно уступает варианту с фиксированным углом, обеспечивая при этом некоторую вариативность. Декоративный корпус, который требуется разработать, должен не только обеспечивать аккуратный внешний вид дрона, скрывая под собой платы и провода, но и выполнять функцию крепления камеры, обеспечивая возможность регулировки угла её наклона и не утяжеляя конструкцию.

Согласно действующему регламенту соревнований, разработанному Федерацией Гонок Дронов России, на болидах класса 75мм должно располагаться как минимум 3 светодиода адресной ленты, направленных назад. Это нужно для обозначения себя во время вылета, чтобы дрон был хорошо виден как зрителям, так и другим пилотам. Эти диоды также должны располагаться на корпусе [4-6].

По результатам анализа исходной конструкции можно выделить ряд требований к разрабатываемому корпусу:

- Наличие крепления камеры с регулируемым углом установки
- Низкий вес
- Дешевизна и простота изготовления
- Скрытие электронных компонентов дрона, обеспечение их защиты
- Наличие крепления подсветки

Подготовка к созданию 3D модели

Перед началом моделирования корпуса необходимо обеспечить себя исходными



данными – моделями компонентов, окружающих создаваемый корпус. Это необходимый шаг при создании любой сборочной конструкции, он позволяет избежать пересечений компонентов и обеспечить идеальную стыкуемость всех частей.

Лучшим вариантом работы над моделями-исходниками является ручное моделирование: измерение всех компонентов штангенциркулем и перенос их размеров в модель. Такой подход гарантирует правильность получаемых моделей и минимизирует шанс ошибки. Однако ручное моделирование трудоёмко и не всегда оправдано [5].

Некоторые компоненты не требуют идеальной проработки т.к. контактируют с разрабатываемыми элементами лишь частично или служат только для визуального отображения конструкции в целом. Для таких элементов ручное моделирование является избыточным. Вместо него можно воспользоваться готовыми моделями с различных интернет-ресурсов. Это экономит время, а небольшие неточности, если они есть в критически важных элементах, можно скорректировать вручную. Те же участки модели, что служат лишь для более полного отображения прорабатываемого изделия, можно оставить без проверки на точность т.к. их задача – передать внешний вид, а не использоваться в качестве привязки для моделирования [5,6].

Для создания сборки основных элементов гоночного дрона было решено воспользоваться готовыми моделями рамы, моторов и пропеллеров. Последние используются лишь «для красоты» общей сборки, а рама была проверена на соответствие размеров обтекателей винтов и точек крепления электроники. 3D модели камеры и полётного контроллера были созданы вручную т.к. они непосредственно контактируют с корпусом и будут критически важны при его моделировании [7]. Внешний вид получившейся сборки представлен на рисунке 2



Рис. 2. Сборка с исходными компонентами.

Создание 3D модели корпуса

Когда стоит задача разработать корпус для какого-либо устройства или набора компонентов, первым шагом является моделирование «болванки» без каких-либо пустот внутри, учитывающей лишь внешние габариты необходимого корпуса и расположение точек его крепления. Результат такого моделирования представлен на рисунке 3.

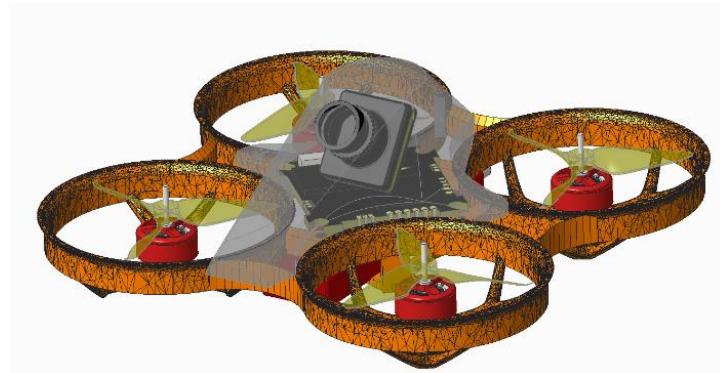


Рис. 3. Сборка с корпусом подходящих габаритов

Когда получена исходная геометрия можно приступать к проработке внутренних элементов корпуса и креплений компонентов. Первым шагом является создание пустого объёма внутри. В большинстве САПР это достигается с помощью элемента «оболочка».

После того, как модель стала тонкостенной, в неё необходимо проделать отверстия. В данном случае речь об отверстиях под камеру. Сборка с пустотелым корпусом с вырезами под камеру представлена на рисунке 4.

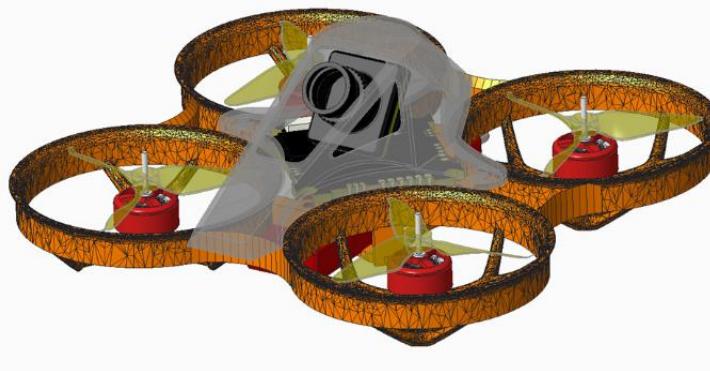


Рис. 4. Сборка с пустотелым корпусом

Уже на этом этапе работы необходимо думать над внешним видом конечного изделия. Дизайн является не менее важной составляющей любого продукта, чем функционал. В данном случае внешний вид вырезов под камеру был вдохновлён кокпитами космических кораблей и самолётов, а угловатая форма самого корпуса находит продолжение в форме получившихся «окон» [8-9].

Финальный шаг моделирования – подготовка посадочных мест под крепёж и создание декоративных элементов (в данном случае – углублений под наклейки, которыми корпус будет украшен). Также были добавлены места установки крепления камеры. Их положение можно будет изменить позже, если это потребует компоновки. На данном же этапе они необходимы для размещения в модели самого крепления, которое будет создано на следующем этапе работы [10-12]. Получившийся корпус представлен на рисунке 5.

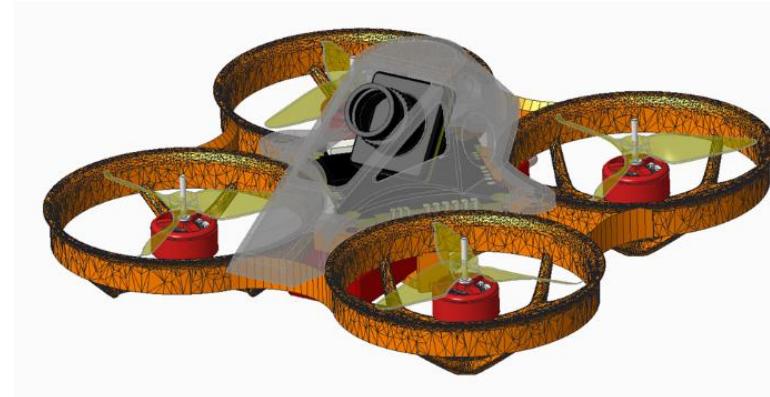


Рис. 5. Сборка с законченным корпусом

Создание 3D модели крепления камеры и платы подсветки

Тесные габариты корпуса не позволяют разместить внутри значительный объём материала, поэтому для крепления камеры было решено выполнить в виде тонкой пластинки, обхватывающей объектив подобно хомуту. Такое решение позволит надёжно закрепить камеру без необходимости использовать большое количество тяжёлого крепежа.

Добавив в сборку крепление можно скорректировать положение отверстий, созданных ранее в корпусе. Также необходимо добавить модели крепежа. Получившаяся конструкция представлена на рисунке 6.



Рис. 6. Сборка с креплением камеры

Для соблюдения условий регламента соревнований дрон должен обладать подсветкой. Полукруглая форма задней части корпуса мешает удобно разместить на ней светодиодную ленту. Поэтому было решено сделать собственную печатную плату. Она обладает простейшим устройством, имея лишь ряд адресных светодиодов, светящих вбок, и контакты, расположенные на специальном выступе, проходящем внутрь корпуса, где к ним можно припаять провода питания и управления. Вид платы, установленной в задней части корпуса представлен на рисунке 7.

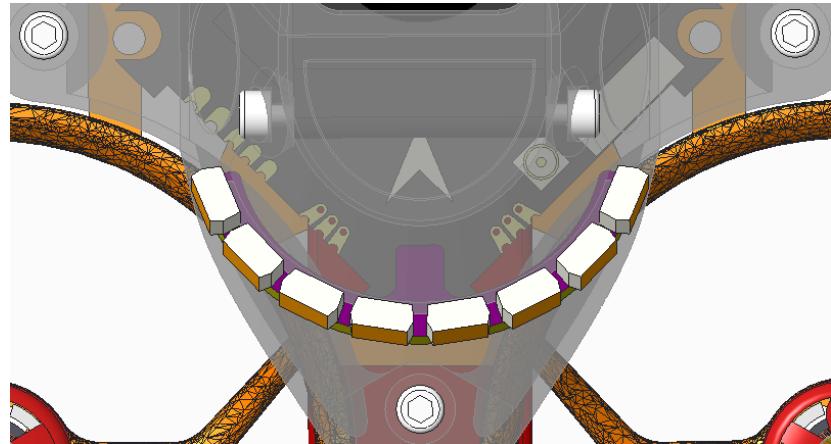


Рис. 7. Плата подсветки на дроне

Выбор технологии производства дрона

Получившаяся конструкция дрона является тонкостенной. При этом она не имеет никаких внутренних креплений и выпирающих элементов за исключением переднего крепления к раме, то есть внутренняя поверхность детали непрерывна. Она имеет лишь несколько отверстий (под винты и камеру). Всё это признаки детали, подходящей для производства методом вакуумной формовки. Хотя изначально данный корпус предполагалось печатать на 3D принтере, вакуумная формовка [13-15] сможет обеспечить значительно меньший вес, а главное куда более аккуратный внешний вид, лишённый текстуры слоёв и прочих особенностей, присущих 3D печати [15-17].

Подготовка под вакуумную формовку потребует изменения модели, превращения её в специальную матрицу, на которую будет «натянут» пластик при производстве. Для этого была удлинена её нижняя часть, запечатаны «кокна» (они будут вырезаться после формовки) и добавлены внутренние каналы, по которым воздух сможет быть откачен из закрытых полостей [17-20]. На рисунке 8 показан каркасный вид матрицы для вакуумной формовки, где скрытыми линиями отображены внутренние каналы для отвода воздуха.

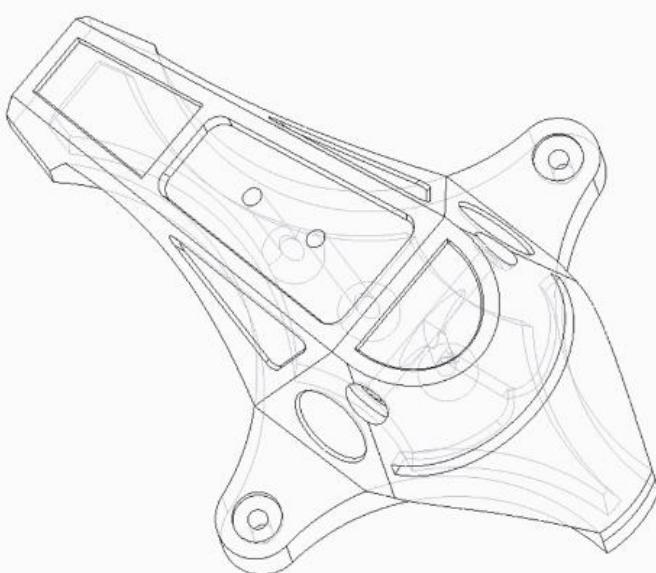


Рис. 8. Каркасный вид матрицы для вакуумной формовки



Для производства крепления камеры необходимо прибегнуть к технологии 3D печати т.к. оно имеет сложную форму, произвести которую возможно только литьём под давлением. Но эта технология является слишком дорогостоящей и нерентабельна для единичного и мелкосерийного производства столь маленькой детали.

Производство деталей и сборка дрона, анализ получившейся конструкции

Для вакуумной формовки был собран примитивный станок, обладающий перфорированным столом, к которому подключается строительный пылесос, и рамки, которая удерживает разогретый лист пластика во время формовки. В качестве нагревательного элемента использованы 5 галогеновых ламп мощностью по 1 кВт. Как выяснилось в дальнейшем, это решение было неудачным: поток тепла от ламп был очень сконцентрированным и перегревал пластик в ближайших к лампам точках, не успевая прогревать его на удалённых участках. Для лучшего прогрева стоило распределить мощность более равномерно по площади листа, использовав большее число ламп меньшей мощности [17-19].

Несмотря на неоптимальную и крайне примитивную конструкцию самодельный станок показал себя достаточным для формовки небольших деталей. С его помощью были получены корпуса дронов разной толщины и из разных материалов. Их вид сразу после формовки на рисунке ниже.



Рис. 9. Детали после формовки (слева – материал PETG, справа – ПНД)

Вырезать детали и извлекать их с матриц пришлось вручную. Для массового производства можно было бы создать специальную оснастку для фрезерного станка, чтобы он вырезал детали автоматически, но для производства небольшого числа достаточно ручных инструментов [19]. Толщина получившихся корпусов не превышает 0,8 мм, благодаря чему они легко режутся ножом.

После вырезания получается прозрачный корпус [20,21], который можно покрасить изнутри. Благодаря этому слой краски не будет повреждаться при внешнем воздействии на деталь.

После печати крепления камеры дрон получилось собрать полностью. Его вид до и после покраски корпуса представлен на рисунке 10.



Рис. 10. Собранный дрон до (слева) и после (справа) покраски корпуса

Благодаря 3D моделированию все детали идеально подошли друг к другу, а вакуумная формовка способствовала сохранению низкого веса. Угол камеры можно регулировать в диапазоне от 30 до 50 градусов. Самодельная печатная плата обеспечивает подсветку задней полусферы дрона, что сделало его заметным на трассе.

Заключение

В ходе проведённого исследования был разработан и изготовлен элемент конструкции беспилотной системы класса 75 мм, соответствующий требованиям спортивного регламента и конструктивным ограничениям рамы BetaFPV Air75. На основании анализа исходной конструкции сформированы ключевые требования к корпусу: минимальная масса, технологичность изготовления, обеспечение защиты электронных компонентов, интеграция платы светодиодной подсветки и создание регулируемого крепления FPV-камеры.

Использование методов твердотельного 3D-моделирования позволило получить точную сборочную модель квадрокоптера, включающую геометрию всех критически важных компонентов. На её основе спроектирован корпус с необходимыми функциональными элементами и выполнена подготовка модели к производству методом вакуумной формовки. Проведён анализ возможности применения альтернативных технологий, в том числе FDM-печати, что подтвердило преимущества вакуумной формовки по весу, скорости получения изделия и качеству внешней поверхности.

Изготовление корпуса на самодельном оборудовании показало, что предложенная технологическая схема работоспособна даже при упрощённой оснастке. В результате были получены детали толщиной менее 0,8 мм из материалов PETG и ПНД, пригодные к дальнейшей обработке, окраске и установке. 3D-печать использована для производства крепления камеры, имеющего сложную геометрию, недоступную при термоформовании.

Сборка готового изделия подтвердила корректность проектных решений: корпус точно соответствует геометрии дрона, обеспечивает регулировку угла наклона камеры в диапазоне 30–50°, скрывает электронику и включает интегрированную заднюю подсветку. Итоговая масса и себестоимость корпуса удовлетворяют требованиям спортивных соревнований, а внешний вид обладает высоким уровнем эстетической проработки.

Таким образом, разработанная технология сочетания 3D-моделирования, вакуумной формовки и аддитивного производства позволяет создавать лёгкие, прочные и визуально привлекательные корпуса для гоночных квадрокоптеров малого класса. Полученные результаты демонстрируют перспективность метода для малосерийного изготовления кастомных компонентов и могут быть использованы при дальнейшем совершенствовании спортивных БАС и их индивидуального дизайна.



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Костин А. С. Исследование моделей и методов маршрутизации и практического выполнения автономного движения беспилотными транспортными системами для доставки грузов / Н. Н. Майоров, А. С. Костин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. – 2023. – Т. 15. – № 3. – С. 524-536.
2. Костин А. С. Разработка автоматизированных решений для исследования вариантов маршрутов доставки при совместном использовании транспортного средства и беспилотной авиационной системы в границах города / А. С. Костин, Н. Н. Майоров // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2022. – № 7. – С. 348-357.
3. Костин А. С. Построение модели полетного задания для многоадресной доставки грузов на основе беспилотных авиационных систем / А. С. Костин, Н. Н. Майоров // «Логистика: современные тенденции развития»: Материалы XXI Международной научно-практической конференции. – СПб.: ВШЭ, 2022. – С. 183-190.
4. Астахова Н. Л. Дроны и их пилотирование. С чего начать / Н. Л. Астахова, В. А. Лукашов. – СПб.: БХВ-Петербург, 2021. – 224 с.
5. Килби Т. Дроны с нуля: собери и настрой свой квадрокоптер / Т. Килби, Б. Килби; пер. с англ. В. Яценкова. – СПб.: БХВ-Петербург, 2016. – 191 с.
6. Гололобов В. Н. Беспилотники для любознательных / В. Н. Гололобов, В. И. Ульянов. – СПб.: Наука и Техника, 2018. – 256 с.
7. Василин Н. Я. Беспилотные летательные аппараты / Н. Я. Василин. – Минск: Попурри, 2003. – 272 с.
8. Ковалёв М. А. Беспилотные летательные аппараты вертикального взлёта: сборка, настройка и программирование: учеб. пособие / М. А. Ковалёв, Д. Н. Овакимян. – Самара: Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С.П. Королёва, 2023. – 96 с.
9. Ермаченков Д. И. Разработка конструкции рамы квадрокоптера для удаленного мониторинга объектов / Д. И. Ермаченков, Т. Г. К. Фазли, Е. О. Петренко // Интернет-журнал «Науковедение». – 2016. – Т. 8, № 6. – 18 с. DOI: 10.15862/45TVN616
10. Рукавицын А. Н. Проектирование рамы автономного летательного аппарата с применением композиционных материалов / А.Н. Рукавицын, Л.А. Сантьяго Мартинес // Вестник Астраханского государственного технического университета. Сер.: Технические и естественные науки. – 2021. – № 2. – С. 56-63.
11. Ширшов А. А. Создание рамы квадрокоптера на основе собственного композитного материала / А. А. Ширшов, А. А. Спиридовон // Юный ученый. – 2025. – № 11 (96). – С. 38-40.
12. Шерышев М. А. Технология переработки пластмасс. Современные особенности технологии термоформования: учеб. пособие для вузов / М. А. Шерышев, А. Е. Шерышев. – М.: Юрайт, 2022. – 267 с.
13. Шерышев М. А. Производство изделий из полимерных листов и пленок / М. А. Шерышев. – СПб.: Научные основы и технологии, 2011. – 556 с.
14. Шерышев М. А. Пневмо-вакуумформование / М. А. Шерышев. – СПб.: ЦОП «Профессия», 2010. – 192 с.
15. Шварцманн П. Термоформование. Практическое руководство / П. Шварцманн, А. Иллиг; пер. с нем.; под ред. М. А. Шерышева. – СПб.: Профессия, 2007. – 288 с.
16. Минаев А. А. Вакуумная формовка / А. А. Минаев, Е. Б. Ноткин, В. А. Сазонов. – М.: Машиностроение, 1984. – 216 с.
17. Мусаев Э. А. Определение граничных условий температурного поля листовой



заготовки / Э. А. Мусаев, М. А. Шерышев // Успехи в химии и химической технологии. – 2016. – Т. 30, № 10 (179). – С. 59–60.

18. Musaev E. A. Technological support for production of articles of polymers by free thermoforming / E. A. Musaev, A. E. Sheryshev, M. A. Sheryshev // Polymer Science. Series D. – 2017. – Vol. 10, No. 2. – P. 165–168.

19. Андрушко И. Н. Технологическое оборудование для термоформования полимерных и комбинированных материалов: учеб. пособие / И. Н. Андрушко, А. П. Пономарев, О. А. Мишурина. – Магнитогорск: Изд-во МГТУ им. Г.И. Носова, 2020. – 42 с.

20. Никитин В. С., Балькаев Д. А., Амирова Л. М. Моделирование и оптимизация термоформования стеклопластиков на основе полипропилена // Королевские чтения: перспективные материалы и технологии изготовления изделий ракетно-космической техники: Материалы Междунар. молодежной научной конференции. – М, 2021. – С. 72–73.

21. ООО «Фирма Элмика». Формообразование термопластов. Формообразующая оснастка и основные методы формования: информационная брошюра [Электронный ресурс]. – URL: <https://polimer1.ru/assets/files/downloads/iistovki/formovanie-termoplastov.pdf> (дата обращения: 27.11.2025).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Борышнев Арсений Маркович

Магистрант кафедры системного анализа и логистики
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения
Россия, 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д.67, лит. А
E-mail: boryshnevam@yandex.ru

Костин Антон Сергеевич

Заведующий лабораторией беспилотных авиационных систем, доцент кафедры системного анализа и логистики
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения
Россия, 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д.67, лит. А
E-mail: anton13258@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Boryshnev Arseniy Markovich

Master's student of the department of systems analysis and logistics
Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation
67, Bolshaya Morskaia str., Saint-Petersburg, 190000, Russia
E-mail: boryshnevam@yandex.ru

Kostin Anton Sergeevich

Head of the laboratory of unmanned aircraft systems, associate professor of the department of systems analysis and logistics
Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation
67, Bolshaya Morskaia str., Saint-Petersburg, 190000, Russia
E-mail: anton13258@mail.ru

Дата поступления: 07.12.2025

Дата принятия: 07.12.2025