

## МЕТОДИКА ПРОФИЛИЗАЦИИ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ НА ОСНОВЕ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

А. И. Власов<sup>1</sup>, А. В. Гараев<sup>2</sup>, В. О. Захарова<sup>3</sup>, К. В. Селиванов<sup>4</sup>, Д. Д. Чернышов<sup>5</sup>

<sup>1, 2, 3, 4, 5</sup> Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана, Москва, Россия

<sup>1</sup> vlasovai@bmstu.ru, <sup>2</sup> garaevalexei@yandex.ru, <sup>3</sup> valeriyashe@yandex.ru,

<sup>4</sup> selivanov\_kv@mail.ru, <sup>5</sup> saints@fan20012.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Проводится анализ современных аддитивных технологий и их применение для производства беспилотных аппаратов. Проведены систематизация и обобщение методов и средств профилизации беспилотных летательных аппаратов на основе аддитивных технологий. Систематизированы возможности аддитивных технологий и их преимущества по сравнению с традиционными технологиями производства деталей различных машин. *Материалы и методы.* Основное внимание уделяется методикам создания компонентов беспилотных аппаратов на основе аддитивных технологий. Сформирован модельный ряд деталей беспилотных аппаратов, изготовление которых возможно при использовании аддитивных технологий, проанализированы преимущества и недостатки использования данных деталей при производстве беспилотных машин. *Результаты и выводы.* Был разработан алгоритм методики профилизации беспилотных летательных аппаратов на основе аддитивных технологий и даны рекомендации инженерам-технологам по оптимизации и внедрению аддитивных технологий для создания деталей для компонентов беспилотных летательных аппаратов.

**Ключевые слова:** аддитивные технологии, беспилотный летательный аппарат, дрон, квадрокоптер, селективное лазерное плавление, моделирование методом послойного наплавления, лазерная стереография

**Финансирование:** отдельные результаты получены в проекте «ПРИОР/СН/НУ/22/СП2/5» по Программе развития МГТУ им. Н. Э. Баумана в рамках Программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030».

**Для цитирования:** Власов А. И., Гараев А. В., Захарова В. О., Селиванов К. В., Чернышов Д. Д. Методика профилизации беспилотных летательных аппаратов на основе аддитивных технологий // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 4. С. 95–110. doi: 10.21685/2307-4205-2023-4-9

## ADDITIVE TECHNOLOGIES AND PROFILING OF GENERAL PURPOSE DRONES: THE FUTURE OF AVIATION

A.I. Vlasov<sup>1</sup>, A.V. Garaev<sup>2</sup>, V.O. Zakharova<sup>3</sup>, K.V. Selivanov<sup>4</sup>, D.D. Chernyшов<sup>5</sup>

<sup>1, 2, 3, 4, 5</sup> Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

<sup>1</sup> vlasovai@bmstu.ru, <sup>2</sup> garaevalexei@yandex.ru, <sup>3</sup> valeriyashe@yandex.ru,

<sup>4</sup> selivanov\_kv@mail.ru, <sup>5</sup> saints@fan20012.ru

**Abstract.** *Background.* The paper analyzes modern additive technologies and their application for the production of unmanned aerial vehicles. The methods and means of UAV profiling based on additive technologies have been systematized and generalized. The possibilities of additive technologies and their advantages in comparison with traditional technologies for the production of parts of various machines are systematized. *Materials and methods.* The main attention is paid to the methods of creating components of UAVs based on additive technologies. The model range of drone parts, the production of which is possible by using additive technologies is formed, the advantages and disadvantages of using these parts in the production of unmanned machines are analyzed. *Results and conclusions.* An algorithm for UAV profiling methodology based on additive technologies has been developed and recommendations for engineers and technologists on optimization and implementation of additive technologies for creating parts and components for unmanned aerial vehicles have been given.

**Keywords:** additive technologies, unmanned aerial vehicle, drone, quadcopter, selective laser melting, layer-by-layer fusion modeling, laser stereography

**Financing:** some results were obtained in the PRIOR/CH/NU/22/SP2/5 project under the Bauman Moscow State Technical University Development Program within the framework of the Priority 2030 Strategic Academic Leadership Program.

**For citation:** Vlasov A.I., Garaev A.V., Zakharova V.O., Selivanov K.V., Chernyshov D.D. Additive technologies and profiling of general purpose drones: the future of aviation. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2023;(4):95–110. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2023-4-9

## Введение

Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) – это автономные летательные аппараты, которые могут быть управляемыми оператором или функционировать в автономном режиме [1]. Развитие этой технологии началось еще в 20-х гг. прошлого века, но наибольшее развитие БПЛА получили в последние десятилетия благодаря прорывам в области электронных компонентов, компьютерных технологий и алгоритмов управления. БПЛА широко применяются в различных отраслях, включая гражданскую и военную авиацию, аэрофотосъемку, картографию, мониторинг и дрон-доставку [2].

В статье объектом исследования являются аддитивные технологии и профилизация электронных аппаратов общего назначения под конкретно решаемые задачи, а также производство современных беспилотных аппаратов.

Профилизация в производстве беспилотных летательных аппаратов может относиться к анализу характеристик использования и работы БПЛА, а также к анализу данных, полученных с БПЛА во время его полетов. В производстве БПЛА профилизация может включать в себя анализ производительности различных компонентов БПЛА, таких как корпус, двигатели, система управления, система сбора данных и др. Это может помочь определить узкие места в работе БПЛА и улучшить его производительность и надежность [3].

Предметом исследования в данной статье является применение аддитивных технологий в производстве беспилотных летательных аппаратов. В статье рассматривается, как профилизация производственного процесса БПЛА и применение аддитивных технологий могут быть применены для изготовления компонентов и деталей беспилотных систем [4], а также как профилизация может повысить их эффективность и безопасность. Также в статье рассматриваются преимущества использования аддитивных технологий и профилизации в авиационной индустрии, а также возможные направления развития в этой области [5].

**Актуальность работы** обусловлена быстро растущим развитием беспилотных технологий, которые находят все более широкое применение в различных сферах экономики. В частности, такие технологии, как аддитивные технологии и профилизация, могут оказать значительное влияние на развитие беспилотных систем в авиационной индустрии [6].

Применение аддитивных технологий позволяет более быстро и эффективно изготавливать детали и компоненты систем управления беспилотными летательными аппаратами. Они также позволяют производить более сложные детали, которые сложнее и дороже изготовить традиционными методами.

Профилизация, в свою очередь, позволяет определить оптимальную конфигурацию деталей и систем беспилотных систем, подходящих для различных задач и условий эксплуатации, что повышает их эффективность и надежность, а также улучшает меры безопасности.

Аддитивные технологии отражают концепцию бережливого производства. Концепция бережливого производства предусматривает минимизацию отходов, экономию ресурсов и устранение излишеств в процессе производства, а также сокращение времени и затрат на производство продукции. Аддитивные технологии, такие как 3D-печать, позволяют создавать изделия с минимальным количеством отходов, быстро и с меньшими затратами на производство. Они также позволяют создавать детали с высокой точностью и качеством, что уменьшает количество брака и необходимость повторных производственных циклов.

**Цель работы:** разработать методику профилизации беспилотных летательных аппаратов на основе аддитивных технологий.

**Постановка задачи:** оценить использование аддитивных технологий и профилизации в производстве беспилотных аппаратов и сделать вывод о рациональности использования этих технологий.

Для достижения заявленной цели в работе предусматривается **решение следующего комплекса задач:**

- проанализировать возможности аддитивных технологий в производстве компонентов и деталей для беспилотных аппаратов;
- оценить преимущества и недостатки аддитивных технологий в сравнении с традиционными способами производства для производства деталей для беспилотных летательных аппаратов;

– исследовать, как профилизация может использоваться для повышения эффективности производства и снижения затрат при производстве беспилотных летательных аппаратов.

**Методы**, используемые для решения поставленной задачи:

– анализ литературы и исследований по применению аддитивных технологий и профилизации в производстве беспилотных летательных аппаратов;

– анализ примеров успешного применения аддитивных технологий и профилизации в производстве беспилотных БПЛА, а также сбор и анализ данных о затратах и преимуществах внедрения этих методов;

– составление рекомендаций по применению аддитивных технологий и профилизации в производстве беспилотных машин на основе проведенных исследований и анализа данных.

**Источниками** для анализа являются:

– информация о применении аддитивных технологий для изготовления деталей беспилотных летательных аппаратов [4];

– методика профилизации в контексте беспилотных летательных аппаратов [5];

– рекомендации по синтезу компонентов систем беспилотных летательных аппаратов и возможности их изготовления с помощью аддитивных технологий [6].

В рамках данной работы предложена методика профилизации БПЛА на основе аддитивных технологий. Приведены этапы данной методики, начиная от анализа требований к БПЛА, заканчивая производством конструкции на 3D-принтере. Показаны преимущества данной методики, такие как экономическая эффективность, точность и быстрота производства.

Результаты исследований могут быть полезны как проектировщикам и инженерам, работающим в области разработки БПЛА, так и широкой аудитории, интересующейся современными технологиями производства и их применением в создании беспилотных летательных аппаратов.

### Обзор литературы

Аддитивные технологии – это технологии, при которых изделия создаются путем нанесения множества слоев материала на основе компьютерного преобразования топологии. Они развиваются очень быстро и находят все более широкое применение во многих отраслях, в том числе в производстве беспилотных летательных аппаратов. Аддитивные технологии получили широкое развитие начиная с середины 80-х гг. прошлого века. Обзор аддитивных технологий приведен в работе [6].

В 1980 г. Хидео Кодама (Муниципальный промышленный исследовательский институт Нагоя) подал заявку на регистрацию патента на устройство, которое с помощью УФ-засветки послойно формировало жесткий объект из фотополимерной смолы [6].

В 1983 г. трое французских инженеров: Ален ЛеМехо, Оливье де Витт и Жан-Клод Андрэ (Национальный центр научных исследований), предложили при создании «фрактальных объектов» применить лазер для превращения мономера в полимер [6].

В 1984 г. Ч. Халл (США) предложил использовать технологию «стереолитографии» (SLA, Stereolithography Apparatus) для печати пространственных моделей по данным цифровых моделей из фотополимеризуемых композитных материалов [7].

В 1985 г. Михайло Фейген предложил послойно формировать объемные модели из листового материала: пленок, полиэстера, композитов, пластика, бумаги и т.д., скрепляя между собой слои при помощи разогретого валика. Такая технология получила название «производство объектов ламинированием» (LOM, Laminated Object Manufacturing, создание многослойного объекта) [6].

В 1986 г. К. Декарт и Б. Биман (Техасский университет в Остине) получили патент на метод селективного лазерного спекания (SLS, Selective Lasersintering) [6].

В 1987 г. – израильской компанией Cubital была разработана Технология послойного уплотнения (SGC, solidgroundcuring) [6].

В 1988 г. Скотт Крамп предложил более простой и дешевый способ 3D-печати – FDM (Fused Deposition Modelling, метод послойного наплавления). FDM 3D-печать – это технологии послойного наплавления пластикой нити [8].

В 1993 г. Массачусетский технологический институт (MIT) патентует технологию трехмерной печати 3DP (Печать склеиваемым порошком, Three-Dimensionalprinting), подобную струйной технологии обычных 2D-принтеров [6].

В 1993 г. Michigan University, USA, разработан процесс направленного нанесения металла (DirectMetalDeposition – DMD) [6].

В 1994 г. в Liverpool University, UK, предложен метод объемной лазерной наплавки (3D Laser Cladding) и метод объемной лазерной генерации (3D Lasergenerating, Fraunhofer-Institute of Production Technology (IPT), Germany) [6].

В 1996 г. Sandia National Laboratories & Sandia University (USA) разработан процесс лазерного формования (Laser Engineered Net Shaping – LENS) [6].

В 1999 г. предложен метод объемной лазерной сварки (3D Laser Welding, Southern Methodist University, USA) [6].

В 2005 г. Эдриан Боуэр (Университет Бата, Великобритания) инициировал открытый проект RepRap (Replicating Rapid Prototyper) – самовоспроизводящийся механизм для быстрого изготовления прототипов [6].

2008 г. Objet Geometries Ltd разработала принтер Connex500, печатающий несколькими различными материалами сразу (3DP, печать склеиваемым порошком, Three-Demensional printing). Сейчас количество материалов перевалило за 100 [6].

Томас Боланд (Клемсонский университет) запатентовал использование струйной печати для 3D-печати живых клеток, что сделало возможным печать человеческих органов в будущем. 8 декабря 2010 г. медицинская компания Organovo, Inc., объявила о создании технологии, которая сможет создавать искусственные кровеносные сосуды на 3D-принтере [9].

Параллельно шли разработки и других технологий. Обобщенная классификация основных аддитивных технологий представлена на рис. 1 [10–13].

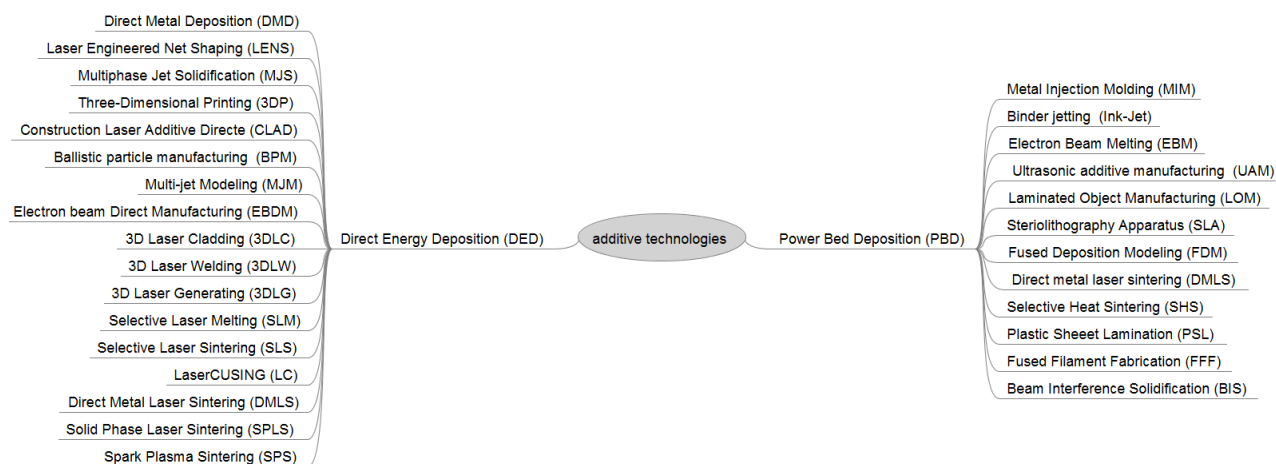


Рис. 1. Распространенные виды аддитивных технологий

Беспилотные летательные аппараты или дроны становятся все более распространенными во многих отраслях, таких как медицина, транспортировка товаров и разведка.

Современные беспилотники могут выполнять разнообразные задачи, такие как съемка видео из воздуха, охрана границ, проведение спасательных операций в специальных условиях, исследование труднодоступных мест и т.д. Они могут быть маленькими и легкими или крупными и грузоподъемными, чтобы транспортировать большие грузы на значительные расстояния.

Развитие беспилотных летательных аппаратов активно продвигается в разных странах мира (США, Китай, Израиль, Япония, Франция, Россия). Современные БПЛА сочетают в себе высокую маневренность, точность в работе систем наведения и стабилизации, а также автономность [14].

Существует несколько типов БПЛА – от самых маленьких мультикоптеров, которые могут легко размещаться на ладони, до массивных летательных аппаратов, способных транспортировать грузы весом до нескольких тонн.

Во многих классификациях по назначению БПЛА разделяют на военные и гражданские. Однако, видимо, более логичным является подразделение, в котором БПЛА подразделяются вначале по укрупненным сферам использования, а именно для научных целей и для прикладных целей; последние же подразделяются на БПЛА для военного и гражданского применения.

В научной сфере БПЛА используются для получения новых знаний, причем не имеет значения то, из какой области эти знания и где они потом будут применены. Это могут быть испытания новой техники (в том числе новых принципов полета) или наблюдения за природными явлениями [15].

Обзор вышеперечисленной литературы позволяет получить более глубокое понимание методики профилизации БПЛА на основе аддитивных технологий, а также определить новые направления и подходы в данной области.

Применение аддитивных технологий в производстве беспилотных летательных аппаратов имеет уже несколько успешных примеров:

– General Electric (<https://www.ge.com/>) – компания General Electric использует аддитивные технологии для создания компонентов для своих беспилотных летательных аппаратов, в том числе для создания турбинных лопастей и других деталей;

– беспилотный летательный аппарат Airbus Albatross One (<https://www.airbus.com/en/innovation/disruptive-concepts/biomimicry/albatrossone>): для производства компонентов аппарата была использована технология SLM (SelectiveLaserMelting), которая позволила создать компоненты с высокой прочностью и низким весом (рис. 2);

– беспилотный летательный аппарат DJI Agras MG-1 (<https://www.dji.com/ru/mg-1>): для производства корпуса аппарата была использована технология фюзели, которая позволила создать корпус с высокой жесткостью и низким весом (рис. 2);

– Aurora Flight Sciences (<https://www.aurora.aero/>): компания использовала технологии аддитивного производства для создания композитных крыльев беспилотного летательного аппарата XV-24A LightningStrike ([https://en.wikipedia.org/wiki/Aurora\\_XV-24\\_LightningStrike](https://en.wikipedia.org/wiki/Aurora_XV-24_LightningStrike)), который имеет вертикальный взлет и посадку, крылья для данного летательного аппарата были созданы с использованием специальной технологии профилизации, что позволило достичь максимальной эффективности полета (рис. 2);

– Lockheed Martin (<https://www.lockheedmartin.com/en-us/news/features/2023/ctrl-p-3d-printing-an-f-35-cockpit.html>): компания использует технологии аддитивного производства для создания деталей беспилотных летательных аппаратов, таких как крылья, обшивки и детали двигателей, компания использовала аддитивное производство для создания композитных крыльев беспилотного летательного аппарата RQ-170 Sentinel (рис. 2).

Классификация БПЛА по видам задач на рис. 2.

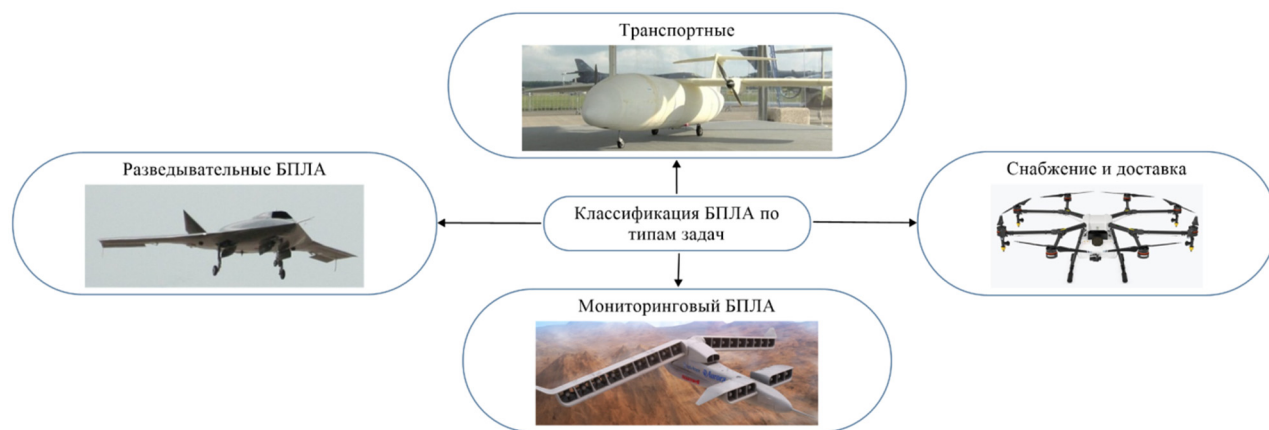


Рис. 2. Классификация БПЛА по типам задач

Проблемы, связанные с применением аддитивных технологий в производстве беспилотных летательных аппаратов, которые уже решены:

– разработка и улучшение программного обеспечения для проектирования и создания цифровых моделей беспилотных летательных аппаратов;

– создание высокопроизводительных принтеров с возможностью печатать крупные и сложные детали;

– создание новых материалов для 3D-печати, таких как углеродные композиты, которые обеспечивают легкость, прочность и надежность конструкции;

– методы контроля качества печати, такие как использование 3D-сканера и анализ качества поверхности.

Проблемы, которые следует решить:

– улучшение процесса обучения и обучения кадров и инженеров, чтобы они могли использовать новые технологии и программное обеспечение;

- развитие новых программных продуктов для симуляции и тестирования беспилотных летательных аппаратов перед полетом;
- надежность и безопасность беспилотных летательных аппаратов, включая разработку системы самодиагностики и автономного управления;
- разработка стандартов и регуляций для безопасного и эффективного использования беспилотных летательных аппаратов в различных отраслях, включая аэрокосмическую, гражданскую и промышленную;
- отсутствие методологии по применению аддитивных технологий и профилизации в производстве беспилотных летательных аппаратов.

Решению последней проблемы посвящена данная статья – разработке методики профилизации беспилотных летательных аппаратов на основе аддитивных технологий.

### **Методы и средства аддитивных технологий в производстве компонентов и деталей для беспилотных аппаратов**

#### *Классификация аддитивных технологий*

Аддитивное производство, или аддитивный технологический процесс – это процесс изготовления деталей, который основан на создании физического объекта по электронной модели путем добавления материала, как правило, слой за слоем, в отличие от вычитающего (субтрактивного) производства (механической обработки) и традиционного формообразующего производства (литья, штамповки)<sup>1</sup>.

Для производства компонентов и деталей для беспилотных аппаратов аддитивные технологии могут быть применены следующим образом:

- непосредственное изготовление деталей, которые будут использоваться в качестве шаблонов для конечного изделия;
- для изготовления пресс-форм с помощью аддитивных методов, потом их можно использовать для формовки и литья изделий.

Технологии 3D-печати позволяют создавать ранее недоступные сложные формы, например, соты структуры (рис. 3), криволинейные пространственные поверхности, внутренние каналы, имеющие изгибы и прочие поверхности, изготовление которых традиционными способами невозможно или весьма трудоемко (<https://3dtoday.ru/blogs/zhvltt/how-to-choose-filling-for-3d-printing>). Аддитивные технологии позволяют напечатать корпус, крыло и лопасть БПЛА (рис. 4) (<https://tsar3d.ru/tag/promyshlennoe-ispolzovanie/>).

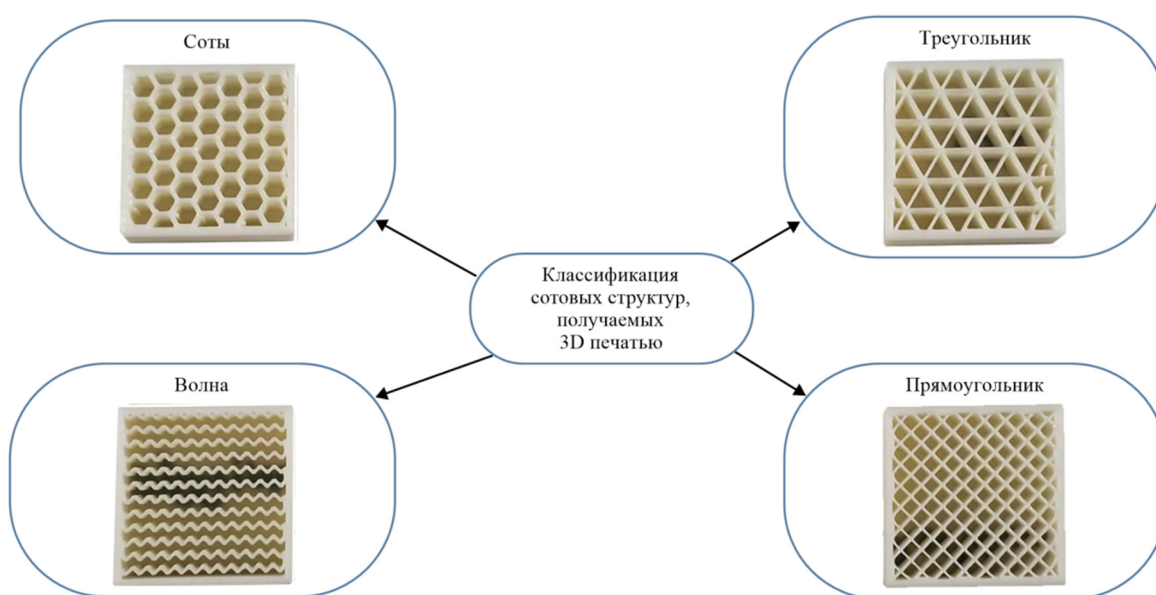


Рис. 3. Модели сотовых структур, напечатанных на 3D принтере

<sup>1</sup> ГОСТ Р 57558-2017/ISO/ASTM 52900:2015.



В настоящее время из всего многообразия видов 3D-печати распространены следующие технологии (рис. 5): SLM (Selectivelasermelting, 3D-печать металлом) [16], SLA (Stereolithography, 3D-печать моделей из жидкого полимера) [7], FDM (Fused Deposition Modeling, послойная 3D-печать нитью пластика) [9].

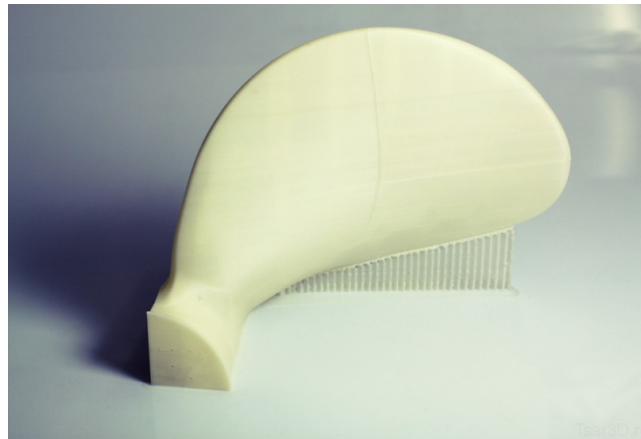


Рис. 4. Модель лопасти БПЛА, напечатанная на 3D-принтере



Рис. 5. Распространенные виды пластиков для печати

Данные технологии используются для изготовления изделий летательных аппаратов, работающих в условиях агрессивных сред под высокими динамическими нагрузками, может быть интересна технология SLM-печати, позволяющая получить наиболее точные и прочные изделия с плотной внутренней структурой. Для менее ответственных деталей могут быть использованы технологии FDM или SLA-печати, позволяющие изготовить легкую деталь сложной формы из широкого ряда пластиков и смол.

Технология FDM подразумевает создание трехмерных объектов за счет нанесения последовательных слоев материала, повторяющих контуры цифровой модели. Как правило, в качестве материалов для печати выступают термопластики, такие как: ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene [17], акрилонитрил бутадиен стирол), PETG (Polyethylene Terephthalate Glycol [18], полиэтилентерефталат гликоль), PLA (Polylactic Acid [18], полимолочная кислота), поставляемые в виде катушек нитей или прутков.

Стереолитография (SLA, Stereolithography) [7] – это процесс аддитивного производства, результат в котором достигается посредством полимеризации смолы. В SLA печати, объект создается путем селективного отверждения полимерной смолы, слой за слоем, с использованием ультрафиолетового (УФ) лазерного луча. Материалы, используемые в SLA печати, представляют собой светочувствительные термореактивные полимеры, которые выпускаются в жидкой форме.

3D-печать металлом (SLM, Selectivelasermelting) –технология производства сложных изделий посредством лазерного плавления металлического порошка по математическим CAD-моделям (3D-печать металлом) [16]. Несмотря на некоторые недостатки, данная технология предоставляет ряд несомненных преимуществ перед традиционными методами получения заготовок.

Теперь более подробно рассмотрим недостатки и преимущества данной технологии в производстве беспилотных аппаратов.

**Преимущества и недостатки аддитивных технологий**

Применение аддитивных технологий в производстве деталей беспилотных летательных аппаратов имеет ряд преимуществ, представленных на рис. 6.



Рис. 6. Преимущества применения аддитивных технологий в производстве БПЛА

Рассмотрим каждое из преимуществ более подробно:

- с помощью 3D-печати сложные детали можно изготовить за несколько часов, в то время как традиционные методы могут занять месяцы, и часто после печати дополнительная механическая обработка не требуется;
- применение аддитивных методов позволяет избежать отходов, поскольку если металлическая деталь не получилась, ее можно вновь превратить в порошок и использовать для повторной печати того же изделия, в то время как в традиционном производстве большой риск отправить неверно изготовленную деталь в отходы;
- применение аддитивных технологий позволяет изготавливать изделия с уникальными свойствами, без швов и стыков, что невозможно сделать с помощью традиционных методов производства, таких как сварка и штамповка;
- возможность печати из большого спектра порошковых металлов, таких как: нержавеющая сталь, инструментальная сталь, кобальт-хромовые сплавы, титан, алюминий, золото и др, пластиков и смол;
- разрешение печати от 20 до 100 микрон [16];
- гибкость производства: 3D-печать может производить детали с высокой степенью гибкости, что может позволить производить индивидуальные, на заказ, детали и беспилотные летательные аппараты;
- снижение стоимости: 3D-печать может существенно сократить затраты на производство деталей, особенно при производстве небольшой партии беспилотных летательных аппаратов;
- уменьшение веса: 3D-печать может производить детали с комплексной геометрией и соответствующими свойствами, что может уменьшить вес беспилотных летательных аппаратов и увеличить их эффективность.



Основные недостатки применения аддитивных технологий в производстве деталей БПЛА оформлены в виде ментальной карты и представлены на рис. 7.



Рис. 7. Недостатки применения аддитивных технологий в производстве БПЛА

Рассмотрим каждый из недостатков более подробно:

- сфероидизация некоторых цветных металлов;
- наличие внутренних напряжений;
- ограниченные материалы: не все материалы могут быть использованы в 3D-печати, что может ограничить выбор материалов для производства беспилотных летательных аппаратов;
- ограниченный размер: большинство 3D-принтеров имеют ограниченный размер печатной платформы, что может ограничить размер производимых деталей, а следовательно, и размеры беспилотных летательных аппаратов;
- низкая производительность при серийном производстве: 3D-печать может быть медленной и требовать значительных затрат времени на производство деталей, что может снизить производительность процесса производства и увеличить время на внедрение беспилотных летательных аппаратов на рынок;
- ограниченная точность: 3D-печать может иметь ограниченную точность, что может привести к необходимости дополнительной обработки деталей и повышению стоимости производства;
- ограниченная прочность: 3D-печать может иметь низкую прочность по сравнению с традиционными методами производства, что может быть проблемой для производства беспилотных летательных аппаратов, которые должны быть надежными и безопасными;
- высокая стоимость: 3D-печать может быть дорогой, особенно при использовании высококачественных материалов, что может привести к высокой стоимости производства беспилотных летательных аппаратов [16].

### **Результат применения методики профилизации как средства повышения эффективности производства компонентов БПЛА**

Профилизация в производстве – это процесс анализа и измерения производственных процессов с целью выявления проблемных мест, оптимизации процессов и повышения эффективности производства [3].

Профилизация позволяет получить детальную информацию о производственных процессах, выявлять проблемные места и определять, какие шаги необходимо предпринять для повышения производительности и качества продукции.

В процессе профилизации производства используются различные методы и инструменты, такие как сбор данных о времени выполнения каждого этапа производственного процесса, анализ данных, определение причин задержек и снижения производительности, а также разработка и реализация мероприятий по оптимизации производственных процессов.

Профилизация в производстве частей БПЛА может быть полезной технологией для повышения эффективности производства и снижения затрат на производство. Профилизация в производстве позволяет выявить проблемные места в процессе производства, определить причины задержек и снижения производительности, а также оптимизировать процессы производства.

Одним из основных преимуществ профилизации производства является возможность определения оптимальной скорости производства. Путем анализа процессов производства БПЛА можно выявить места, где процессы замедляются, и определить, какие шаги необходимо предпринять для ускорения производства.

Также профилизация производства позволяет выявить проблемы в процессе производства, которые могут привести к повышенным затратам на производство. Например, можно выявить, какие материалы или оборудование используются неэффективно, и определить, какие изменения необходимы для снижения затрат и повышения эффективности.

Следующим преимуществом профилизации производства является возможность улучшения качества продукции. Это достигается анализом процессов производства БПЛА, следствием которого является выявление мест, где возможны ошибки и дефекты, и определением шагов необходимых для предотвращения их появления.

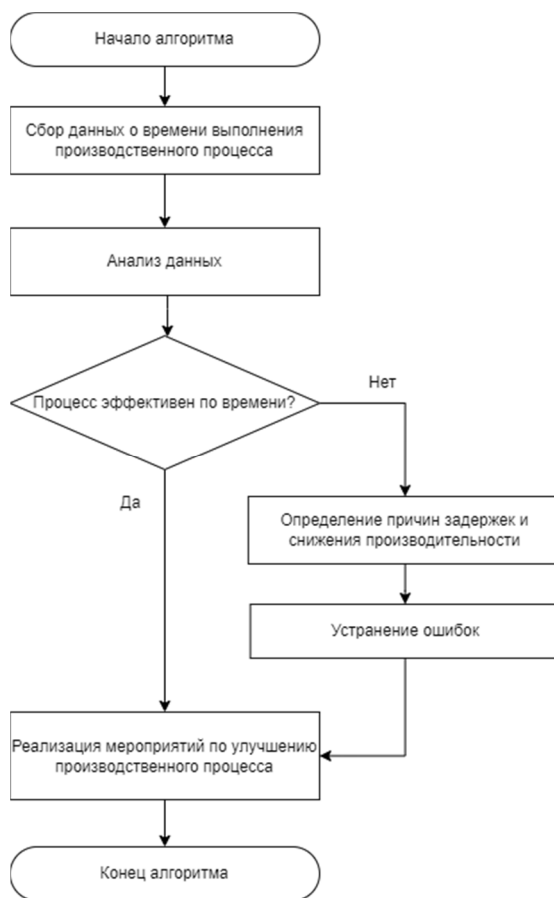


Рис. 8. Методика профилизации БПЛА на основе аддитивных технологий

Таким образом, профилизация производства БПЛА может быть очень полезным инструментом для повышения эффективности производства и снижения затрат на него, а также улучшения качества продукции и тем самым повышения конкурентоспособности на рынке БПЛА. Например, система управления полетом БПЛА состоит из различных компонентов, таких как контроллер полета, гироскопы, акселерометры, компасы и др. В процессе производства БПЛА может возникнуть необходимость оптимизации работы системы управления полетом, чтобы обеспечить более точное и надежное управление БПЛА во время полета. Для этого в производстве БПЛА может применяться профилизация. В ходе профилизации разработчики могут анализировать данные, полученные от системы управления полетом во время тестовых полетов, и определять, какие участки кода занимают больше всего времени выполнения, какие функции вызываются чаще всего, сколько времени занимает работа с памятью и другие характеристики работы системы управления полетом. На основе этих данных программисты могут улучшать код системы управления полетом, устранить проблемные места в работе системы и повысить ее производительность и надежность. Это может помочь обеспечить более точное управление БПЛА, улучшить его возможности и повысить безопасность полетов.

### Рекомендации по применению аддитивных технологий и профилизации в производстве беспилотных аппаратов

Подводя итог, можно сказать, что аддитивные технологии могут быть полезными инструментами в производстве беспилотных аппаратов. Они позволяют быстро и точно создавать прототипы, а также производить детали и компоненты с высокой точностью и сложной геометрией. Можно сформулировать следующие рекомендации по применению аддитивных технологий в производстве БПЛА:

- благодаря возможности быстрого создания физических моделей деталей и компонентов БПЛА 3D-печать может быть использована для создания прототипов и тестирования их на практике, что значительно сокращает время и затраты на разработку;

- применение 3D-печати в производстве может позволить изготавливать сложные детали и компоненты с высокой точностью и сложной геометрией, которые трудно или невозможно произвести с помощью традиционных методов производства, что может потребоваться для создания БПЛА;

- использование материалов высокой прочности: при производстве деталей и компонентов БПЛА с помощью 3D-печати следует использовать материалы высокой прочности, такие как углеродистые волокна или металлы, чтобы обеспечить необходимую прочность и долговечность.

Что же касается профилизации в производстве беспилотных аппаратов, то некоторые из рекомендаций могут быть следующими:

- сбор данных о производственных процессах: сбор данных о времени выполнения каждого этапа производственного процесса, о возможных проблемах и задержках может помочь выявить проблемные места в производственном процессе и определить, какие шаги необходимо предпринять для повышения эффективности производства;

- анализ данных, собранных в процесса производства, может помочь выявить причины задержек и снижения производительности и определить, какие меры необходимо предпринять для повышения эффективности производства;

- применение методов оптимизации: методы оптимизации, такие как SixSigma и Lean Manufacturing, могут быть использованы для оптимизации производственных процессов и повышения эффективности производства;

- разработка мероприятий по улучшению производства: на основе анализа данных и применения методов оптимизации можно разработать мероприятия по улучшению производства, которые позволят повысить эффективность производственных процессов и качество продукции.

### Обсуждение применения аддитивных технологий и профилизации в производстве беспилотных аппаратов

Применение аддитивных технологий в производстве БПЛА уже сейчас является широко распространенной практикой, и ожидается, что их использование будет продолжать расти в будущем. Наиболее авторитетным источником информации о состоянии и развитии аддитивных технологий, признанным мировым технологическим сообществом, является консалтинговая компания Wohlers Associates Inc. (WAI), издающая с 1996 г. ежегодные статистические отчеты. Согласно Wohlers Report-2023, мировой объем рынка продукции и услуг к 2023 г. достиг 18 млрд долл. (рис. 8) (<https://wohlersassociates.com/product/wr2023/>).

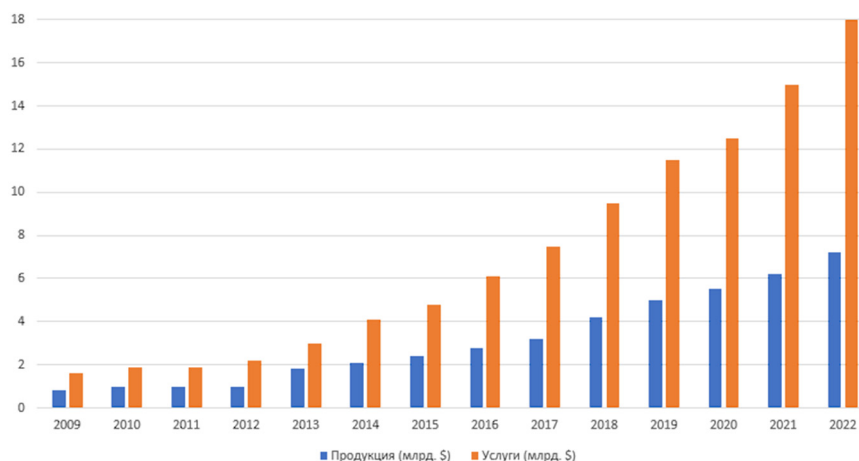


Рис. 8. Гистограмма объема рынка продукции и услуг за 2023 г.

Мировой рынок аддитивных технологий с 2014 по 2020 г. рос со среднегодовыми темпами в 19,3%, достигнув к 2020 г. объема почти в 12 млрд долл. Согласно отчету GlobalData, в настоящее время на долю рынка 3D-печати приходится менее 0,1% от общего мирового производственного рынка, который оценивается в 12,7 трлн долл. (рис. 9) (<https://delprof.ru/press-center/open-analytics/rynok-tekhnologiy-3d-pechati-v-rossii-i-mire-perspektivy-vnedreniya-additivnykh-tekhnologiy-v-proizv/>).

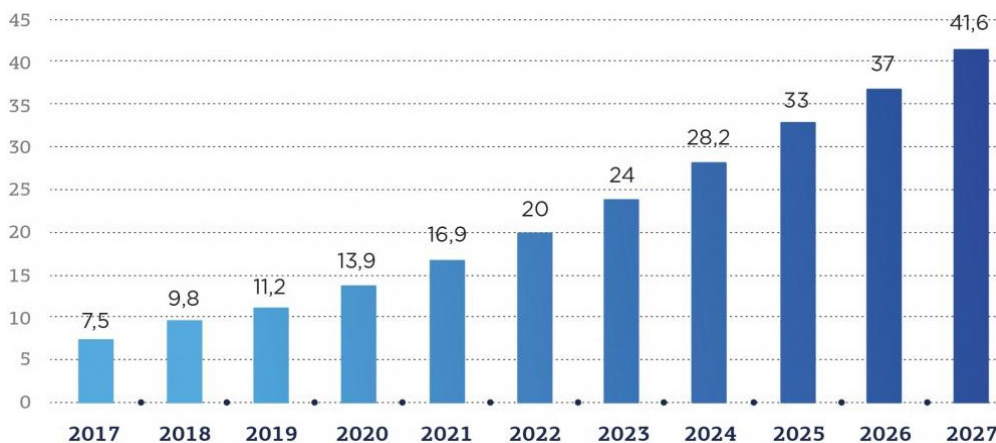


Рис. 9. Гистограмма состояния и прогноза объема мирового рынка аддитивных технологий, млрд долл.

Прогнозируется также, что самыми крупными областями применения аддитивного производства будут аэрокосмическая и оборонная промышленность. Следом активно будет развиваться аддитивное производство в сфере автомобильной промышленности, а также стоматологии и производстве медицинских имплантов. Вкупе все указанные отрасли будут занимать более 50 % рынка (рис. 10) (<https://delprof.ru/press-center/open-analytics/rynok-tekhnologiy-3d-pechati-v-rossii-i-mire-perspektivy-vnedreniya-additivnykh-tekhnologiy-v-proizv/>).

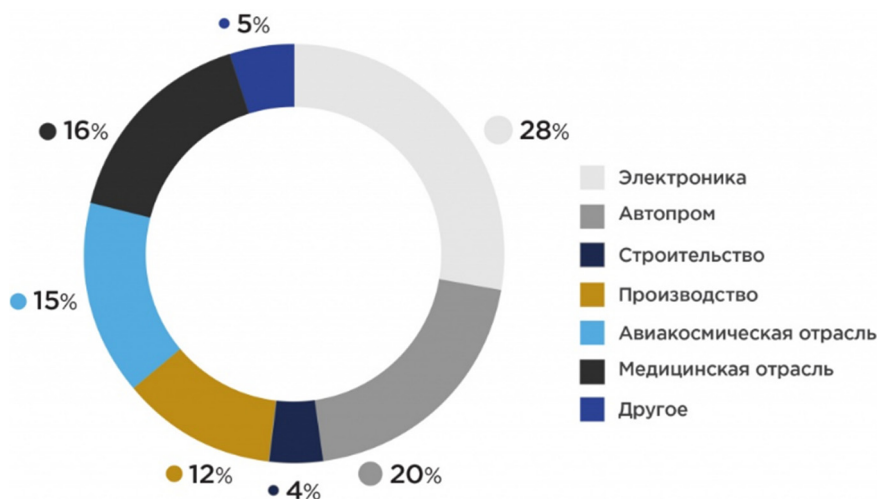


Рис. 10. Гистограмма сегментации рынка аддитивных технологий

Аддитивные технологии позволяют создавать сложные геометрические формы и компоненты, которые могут быть трудно или невозможно изготовить традиционными методами. Это позволяет улучшить производительность и качество БПЛА, а также снизить себестоимость производства, что также приводит к развитию их применения.

Профилизация в производстве БПЛА также имеет большой потенциал для улучшения производительности и эффективности. Профилизация позволяет создавать оптимальные профили крыльев и других компонентов БПЛА, что улучшает его аэродинамические свойства и позволяет снизить расход топлива, а также профилизация может улучшить управляемость и маневренность БПЛА.

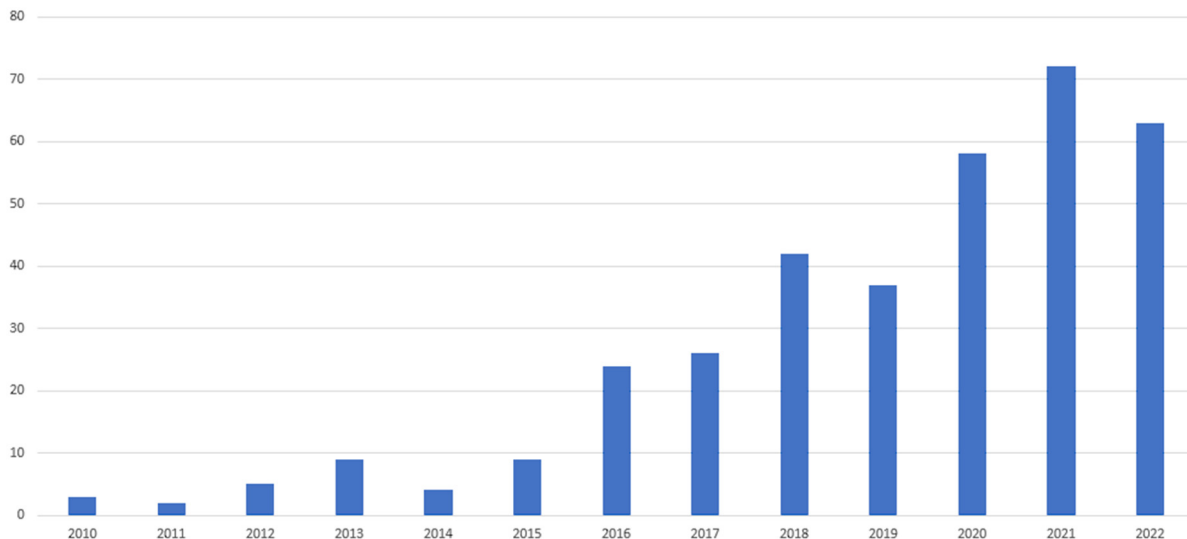


Рис. 11. Гистограмма частоты упоминания ключевых слов «Аддитивные технологии» и «БПЛА» в публикациях, индексируемых в системе РИНЦ

В целом применение аддитивных технологий и профилизация в производстве БПЛА имеют большой потенциал для улучшения производительности, качества и эффективности БПЛА. Однако, как и в любой новой технологии, есть и некоторые вызовы, такие как высокая стоимость и сложность процесса производства. Однако с развитием технологий и увеличением опыта в производстве, ожидается, что эти вызовы будут преодолены и аддитивные технологии и профилизация будут все более широко применяться в производстве БПЛА.

### Заключение

Применение аддитивных технологий для создания деталей и компонентов БПЛА общего назначения позволяет ускорить процесс разработки и снизить затраты на изготовление. Благодаря этому создание новых моделей может происходить быстрее и эффективнее, что позволяет улучшить качество и функциональность продуктов.

Профилизация беспилотников общего назначения – это технология, которая позволяет при помощи алгоритмов оптимизировать конструкцию беспилотника под конкретные условия эксплуатации. Это дает возможность создать максимально эффективное и оптимальное решения для каждой конкретной задачи.

Применение этих технологий уже активно осуществляется в авиационной индустрии. БПЛА, созданные с использованием аддитивных технологий и профилизации, могут легко адаптироваться к различным задачам, выполнять их точно и эффективно, ускоряя и автоматизируя процессы. Это дает возможность улучшить производительность, снизить затраты и повысить качество продукции, что является основой конкурентоспособности.

Таким образом, использование аддитивных технологий и профилизации в авиации имеет большой потенциал для создания эффективных и перспективных продуктов, а их применение уже сегодня позволяет значительно сократить затраты и повысить качество.

В работе подобраны аддитивные технологии, применяемые для производства беспилотных летательных аппаратов и даны рекомендации для инженеров-технологов, для оптимизации и внедрения новых технологий в технологические процессы. А также инженерам для более быстрого создания прототипов и использования аддитивных технологий для создания различных деталей беспилотных летательных аппаратов и разнообразных систем.

### Список литературы

1. Лавров А. В., Власов Д. С. Методы и средства мониторинга характеристик БПЛА в реальном времени // Технологии инженерных и информационных систем. 2019. № 4. С. 57–66.
2. Федосеева Н. А., Загвоздкин М. В. Перспективные области применения беспилотных летательных аппаратов // Научный журнал. 2017. № 9. С. 26–29.

3. Singh H. K., Singh A. K., Singh S. K. Profiling in Unmanned Aerial Vehicles: A Review // *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. 2018. Vol. 91, iss. 1. P. 1–14.
4. Goh G. D., Agarwala S., Liang G. G., Dikshit V. Additive Manufacturing: An Overview of Current Research for Unmanned Aerial Vehicles // *Ref. Libr.* 2018. Vol. 63. P. 140–151.
5. Birnbaum Z., Dolgikh A., Skormin V. [et al.]. International Conference on Unmanned Aircraft Systems // *Ref. Libr.* 2015. P. 1310–1319.
6. Vlasov A. I., Juravleva L. V., Ismagilov K. The Concept of Using Additive Technologies for Digital Prototyping of Assembly Devices // *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 2373. P. 072035.
7. US Patent 575330A. Hull Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography / Charles W. 1984.
8. Crump S. Apparatus and method for creating three dimensional objects, US Patent 5121329. 1989.
9. Murphy S., Atala A. 3D bioprinting of tissues and organs // *NatBiotechnol.* 2014. Vol. 32. P. 773–785.
10. Sokolov Yu. A., Pavlushin N. V., Kondrat'ev S. Yu. New additive technologies based on ion beams // *Russian Engineering Research*. 2016. Vol. 36. P. 1012–1016.
11. Sleptsov V. V., Savkin A. V., Trunova E. A. [et al.]. Electrosark dispersion in nanopowder production for additive technologies // *Russian Engineering Research*. 2019. Vol. 39. P. 133–136.
12. Rossi S., Puglisi A., Benaglia M. Additive manufacturing technologies: 3d printing in organic synthesis // *Chem-CatChem*. 2018. Vol. 10. P. 1512–1525.
13. Pandey R. Photopolymers in 3D printing applications. Arcada // *Degree Thesis Plastics Technology*. 2014. Vol. 51.
14. Власов А. И., Зонтьева Д. Е., Евдокимов В. С. [и др.]. Гибридная система управления малыми беспилотными летательными аппаратами // *Автоматизация. Современные технологии*. 2015. № 8. С. 15–24.
15. Лавров А. В., Курносенко А. Е., Андрусенко В. В., Солод А. Г. Использование динамических стендов при полунатурном моделировании систем беспилотных летательных аппаратов // *Технологии инженерных и информационных систем*. 2016. № 8-9 (206). С. 19–25.
16. Пиженков Е. Н., Подгорбунских В. М., Рошин В. А. Использование SLM технологий 3D печати в изготовлении деталей червячно-модульных фрез // *Современные условия взаимодействия науки и техники : сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф. (11 ноября 2018 г., г. Пермь) : в 3 ч. Уфа : ОМЕГА САЙНС*. 2018. Ч. 2. С. 91–96.
17. Yin Z. N., Wang T. J. Deformation response and constitutive modeling of PC, ABS and PC/ABS alloys under impact tensile loading // *Materials Science and Engineering*. 2010. Vol. 526. P. 1461–1468.
18. Уланов А. О., Иньшина Я. Г. PETG- и PLA-филаменты и испытания физико-механических характеристик изделий из них // *Молодой ученый*. 2020. № 52. С. 98–101.
19. Маркелов В. В., Власов А. И., Камышная Э. Н. Системный анализ процесса управления качеством изделий электронной техники // *Надежность и качество сложных систем*. 2014. № 1. С. 35–42.
20. Власов А. И., Григорьев П. В., Кривошеин А. И. Модель предиктивного обслуживания оборудования с применением беспроводных сенсорных сетей // *Надежность и качество сложных систем*. 2018. № 2. С. 26–35.

### References

1. Lavrov A.V., Vlasov D.S. Methods and means of monitoring UAV characteristics in real time. *Tekhnologii inzhenernykh i informatsionnykh system = Technologies of engineering and information systems*. 2019;(4):57–66. (In Russ.)
2. Fedoseeva N.A., Zagvozdkin M.V. Promising areas of application of unmanned aerial vehicles. *Nauchnyy zhurnal = Scientific Journal*. 2017;(9):26–29. (In Russ.)
3. Singh H.K., Singh A.K., Singh S.K. Profiling in Unmanned Aerial Vehicles: A Review. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. 2018;91(1):1–14.
4. Goh G.D., Agarwala S., Liang G.G., Dikshit V. Additive Manufacturing: An Overview of Current Research for Unmanned Aerial Vehicles. *Ref. Libr.* 2018;63:140–151.
5. Birnbaum Z., Dolgikh A., Skormin V. et al. International Conference on Unmanned Aircraft Systems. *Ref. Libr.* 2015:1310–1319.
6. Vlasov A.I., Juravleva L.V., Ismagilov K. The Concept of Using Additive Technologies for Digital Prototyping of Assembly Devices. *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 2373:072035.
7. US Patent 575330A. *Hull Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography*. Charles W. 1984.
8. US Patent 5121329. *Apparatus and method for creating three dimensional objects*. Crump S. 1989.
9. Murphy S., Atala A. 3D bioprinting of tissues and organs. *NatBiotechnol.* 2014;32:773–785.
10. Sokolov Yu.A., Pavlushin N.V., Kondrat'ev S.Yu. New additive technologies based on ion beams. *Russian Engineering Research*. 2016;36:1012–1016.
11. Sleptsov V.V., Savkin A.V., Trunova E.A. et al. Electrosark dispersion in nanopowder production for additive technologies. *Russian Engineering Research*. 2019;39:133–136.



12. Rossi S., Puglisi A., Benaglia M. Additive manufacturing technologies: 3d printing in organic synthesis. *Chem-CatChem*. 2018;10:1512–1525.
13. Pandey R. Photopolymers in 3D printing applications. Arcada. *Degree Thesis Plastics Technology*. 2014;51.
14. Vlasov A.I., Zont'eva D.E., Evdokimov V.S. et al. Hybrid control system for small unmanned aerial vehicles. *Avtomatizatsiya. Sovremennye tekhnologii = Automation. Modern technologies*. 2015;(8):15–24. (In Russ.)
15. Lavrov A.V., Kurnosenko A.E., Andrusenko V.V., Solod A.G. The use of dynamic stands in semi-natural modeling of unmanned aerial vehicle systems. *Tekhnologii inzhenernykh i informatsionnykh system = Technologies of engineering and information systems*. 2016;(8-9):19–25. (In Russ.)
16. Pizhenkov E.N., Podgorbunskikh V.M., Roshchin V.A. The use of SLM 3D printing technologies in the manufacture of worm-modular milling cutter parts. *Sovremennye usloviya vzaimodeystviya nauki i tekhniki: sb. st. Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. (11 noyabrya 2018 g., g. Perm'): v 3 ch. = Modern conditions of interaction between science and technology : collection of the International Scientific and Practical Conference (November 11, 2018, Perm) : in 3 parts*. Ufa: OMEGA SAYNS. 2018;(part 2):91–96. (In Russ.)
17. Yin Z.N., Wang T.J. Deformation response and constitutive modeling of PC, ABS and PC/ABS alloys under impact tensile loading. *Materials Science and Engineering*. 2010;526:1461–1468.
18. Ulanov A.O., In'shina Ya.G. PETG- and PLA-filaments and tests of physical and mechanical characteristics of products made from them. *Molodoy uchenyy = Young Scientist*. 2020;(52):98–101. (In Russ.)
19. Markelov V.V., Vlasov A.I., Kamyshnaya E.N. System analysis of the quality management process of electronic equipment products. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2014;(1):35–42. (In Russ.)
20. Vlasov A.I., Grigor'ev P.V., Krivoshein A.I. Model of predictive maintenance of equipment using wireless sensor networks. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2018;(2):26–35. (In Russ.)

#### Информация об авторах / Information about the authors

##### **Андрей Игоревич Власов**

кандидат технических наук,  
доцент кафедры проектирования  
и технологии производства ЭА,  
Московский государственный технический  
университет имени Н. Э. Баумана  
(Россия, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 4)  
E-mail: vlasovai@bmstu.ru

##### **Andrey I. Vlasov**

Candidate of technical sciences,  
associate professor of the sub-department  
of design and technology of EA production,  
Bauman Moscow State Technical University  
(build. 4, 5 2nd Baumanskaya street,  
Moscow, Russia)

##### **Алексей Владимирович Гараев**

студент,  
Московский государственный технический  
университет имени Н. Э. Баумана  
(Россия, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 4)  
E-mail: garaevalexei@yandex.ru

##### **Alexey V. Garaev**

Student,  
Bauman Moscow State Technical University  
(build. 4, 5 2nd Baumanskaya street,  
Moscow, Russia)

##### **Валерия Олеговна Захарова**

аспирант,  
Московский государственный технический  
университет имени Н. Э. Баумана  
(Россия, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 4)  
E-mail: valeriyashe@yandex.ru

##### **Valeria O. Zakharova**

Postgraduate student,  
Bauman Moscow State Technical University  
(build. 4, 5 2nd Baumanskaya street,  
Moscow, Russia)

##### **Кирилл Владимирович Селиванов**

кандидат технических наук,  
доцент кафедры проектирования  
и технологии производства ЭА,  
Московский государственный технический  
университет имени Н. Э. Баумана  
(Россия, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 4)  
E-mail: selivanov\_kv@mail.ru

##### **Kirill V. Selivanov**

Candidate of technical sciences,  
associate professor of the sub-department  
of design and technology of EA production,  
Bauman Moscow State Technical University  
(build. 4, 5 2nd Baumanskaya street,  
Moscow, Russia)

**Денис Дмитриевич Чернышов**

студент,

Московский государственный технический

университет имени Н. Э. Баумана

(Россия, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 4)

E-mail: saints@fan20012.ru

**Denis D. Chernyshov**

Student,

Bauman Moscow State Technical University

(build. 4, 5 2nd Baumanskaya street,

Moscow, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /**

**The authors declare no conflicts of interests.**

**Поступила в редакцию/Received 24.08.2023**

**Поступила после рецензирования/Revised 08.09.2023**

**Принята к публикации/Accepted 21.09.2023**