

Блинков О.Г.,
доктор технических и экономических наук, доцент
o.g.blinkov@urfu.ru¹

Мальцев Е.А.,
магистрант,
maltsev.2001@inbox.ru¹

Уральский федеральный университет имени
первого Президента России Б.Н. Ельцина,
620002 г. Екатеринбург, ул. Мира 19¹

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ. FDM- ПРИНТЕРЫ

Аннотация

В статье рассматриваются особенности автоматизации производственного процесса с применением FDM-технологии в аддитивном производстве. Показано, что эффективность FDM-печати во многом определяется не только характеристиками оборудования и материалов, но и уровнем цифровой организации производственного цикла. Особое внимание уделено программным средствам управления фермой 3D-принтеров, обеспечивающим распределение задач, мониторинг состояния оборудования и сокращение простоев. В качестве практического примера рассматривается разработанное приложение для управления фермой FDM-принтеров VatбиLab, включающее веб-интерфейс оператора, систему очередей, модуль телеметрии и аппаратную кнопку подтверждения очистки стола на базе ESP32.

Ключевые слова: аддитивное производство, FDM, 3D-печать, автоматизация, ферма 3D-принтеров, программное обеспечение, мониторинг, ESP32.

Введение

Автоматизация производственного процесса является одним из ключевых направлений повышения эффективности современной промышленности. Наиболее заметные изменения в последние годы происходят в области аддитивных технологий, где цифровая модель изделия напрямую преобразуется в физический объект послойным нанесением материала. Среди различных методов 3D-печати технология FDM (FusedDepositionModeling) занимает особое место благодаря относительной доступности оборудования, широкому выбору термопластичных материалов

и возможности применения в мелкосерийном и индивидуальном производстве.

Вместе с тем эксплуатация FDM-принтеров в производственной среде выявляет ряд организационных проблем. При увеличении количества устройств возрастает сложность распределения заданий, контроля статуса оборудования, наблюдения за завершением печати и своевременной подготовки рабочего стола к следующему циклу. При ручном управлении эти операции требуют значительных временных затрат и приводят к простоям оборудования. Поэтому важным направлением развития FDM-производства становится использование дополнительных цифровых технологий, прежде всего программных средств автоматизации.

Современные фермы 3D-печати рассматриваются уже не как набор отдельных устройств, а как единая производственная система, эффективность которой определяется качеством программного управления. Именно поэтому в статье рассматривается не только сама технология FDM, но и прикладной пример автоматизации фермы принтеров с помощью разработанного программного комплекса.

Обзор литературы

Вопросы автоматизации и повышения эффективности FDM-печати рассматриваются в ряде научных работ, посвященных как особенностям самой технологии, так и средствам контроля и управления процессом. В статье Е. В. Игониной и О. В. Дружининой «Особенности разработки и применения FDM-технологии при создании и прототипировании 3D-объектов»[1] выполнен сравнительный анализ аддитивных технологий, описаны основные параметры FDM-принтера и варианты его модификации, а также отмечены перспективы применения технологии в прототипировании и учебной практике.

Значимый вклад в развитие темы автоматизации сервисных функций внесли С.С. Шемелюнас, А. В. Дроботов и Д. В. Самойлов. В статье «Автоматизация сервисных функций в FDM 3D-принтере» [2] авторы рассматривают автоматическое снятие и извлечение напечатанных изделий, а также контроль подачи материала в процессе печати. Предложенные решения направлены на сокращение ручного вмешательства оператора и повышение непрерывности производственного процесса, что непосредственно связано с идеей создания более автономной системы управления FDM-оборудованием.

Вопросы дистанционного контроля процесса печати освещены в работе О. П. Лапко и И. Л. Ковалевой «Отслеживание процесса печати на строительном 3D-принтере» [3]. Авторы предлагают организовать отслеживание работы 3D-принтера в режиме реального времени с использованием камеры, источника бесперебойного питания и устройства дистанционного отключения питания. Несмотря на то, что исследование посвящено строительной 3D-печати, оно демонстрирует общий подход к удаленному мониторингу, который может быть использован и в системах управления фермой FDM-принтеров.

Вопросам повышения эффективности FDM-производства посвящена работа «Методики оптимизации аддитивной технологии формообразования на примере нагруженных изделий из пластмасс» [4]. В ней рассматриваются способы сокращения времени печати и экономии материала при изготовлении изделий, а также подчеркивается значение корректной подготовки модели и выбора технологических параметров.

Эти выводы подтверждают, что программные средства управления печатью должны не только запускать задания, но и поддерживать рациональную организацию производственного процесса.

Таким образом, можно заключить, что научная база работы сформирована на стыке нескольких направлений: исследования FDM-технологии, автоматизация сервисных функций, удаленный мониторинг, контроль качества и оптимизация аддитивного производства.

Именно эти работы послужили теоретической и методической основой для разработки системы управления фермой FDM-принтеров, ориентированной на повышение автономности, удобства эксплуатации и эффективности работы оборудования.

Методология

Особенности FDM как производственной технологии.

Технология FDM основана на послойном формировании изделия путем плавления термопластичной нити и ее последующей укладки по заданной траектории. Исходным материалом служит цифровая трехмерная модель, которая после подготовки в CAD-среде преобразуется в файл STL, а затем с помощью слайсинга — в управляющий код для принтера. Таким образом, FDM-производство изначально предполагает высокую степень цифровизации и тесную связь между конструкторской и производственной стадиями.

Основными преимуществами FDM являются:

- относительно низкая стоимость оборудования;
- широкий выбор материалов;
- возможность быстрого изготовления прототипов;
- удобство мелкосерийного производства;
- минимизация отходов по сравнению с традиционными методами обработки.

Однако технологический потенциал FDM реализуется в полной мере только при наличии эффективной системы управления. Даже при высоком уровне механической точности принтера производственный результат может снижаться из-за человеческого фактора: несвоевременного запуска заданий, ошибок при замене моделей, недостаточного контроля влажности и длительных простоев между печатями. В этой связи автоматизация становится не вспомогательным, а необходимым элементом производственного процесса.

Роль дополнительных технологий в автоматизации FDM-производства

Под дополнительными технологиями в контексте FDM-производства следует понимать программные и аппаратные средства, которые расширяют функциональность базового принтера и позволяют организовать работу не отдельного устройства, а целой производственной системы. К таким технологиям относятся:

- программные интерфейсы управления принтерами;
- системы мониторинга и телеметрии;
- серверы очередей и распределения задач;
- веб-интерфейсы оператора;
- микроконтроллеры для локального взаимодействия с оборудованием;
- механизмы уведомления и событийного управления.

Именно совокупность этих решений переводит FDM-печать из режима ручного обслуживания в режим управляемого цифрового процесса. Для фермы из нескольких принтеров особенно важна не просто возможность удаленного контроля, а наличие единой системы, способной автоматически назначать задания, отслеживать состояние каждого устройства и обеспечивать своевременную реакцию на завершение печати.

Практическая реализация системы управления фермой FDM-принтеров.

Было разработано приложение для управления фермой FDM-принтеров BambuLab. Система предназначена для локального использования и ориентирована на предприятия, где требуется управлять несколькими принтерами одновременно без постоянного обращения к каждому устройству отдельно.

Разработанное приложение включает несколько взаимосвязанных компонентов:

1. Веб-интерфейс оператора, в котором отображается состояние всех принтеров;
2. Серверную часть, обеспечивающую обработку запросов и распределение задач;
3. Базу данных, в которой хранятся сведения о принтерах, заданиях и истории печати;
4. Модуль телеметрии, передающий текущие параметры оборудования;
5. ESP32-контроллер, реализующий кнопку подтверждения очистки рабочего стола.

Основная идея системы заключается в том, что оператор работает не с каждым принтером отдельно, а с общей панелью управления. Это позволяет быстро видеть, какие устройства печатают, какие завершили работу, а какие требуют вмешательства. После завершения модели система переводит принтер в режим ожидания, а оператор после очистки стола нажимает

физическую кнопку. Это сокращает паузу между заданиями и делает производственный цикл более непрерывным.

Функциональные возможности приложения

Разработанное приложение решает несколько важных производственных задач:

Во-первых, оно обеспечивает централизованный контроль за всей фермой. Оператор видит все устройства в одном интерфейсе и может быстро оценить их состояние (Рисунок 1). Это особенно важно при наличии большого числа принтеров, когда ручная проверка каждого устройства становится неэффективной.

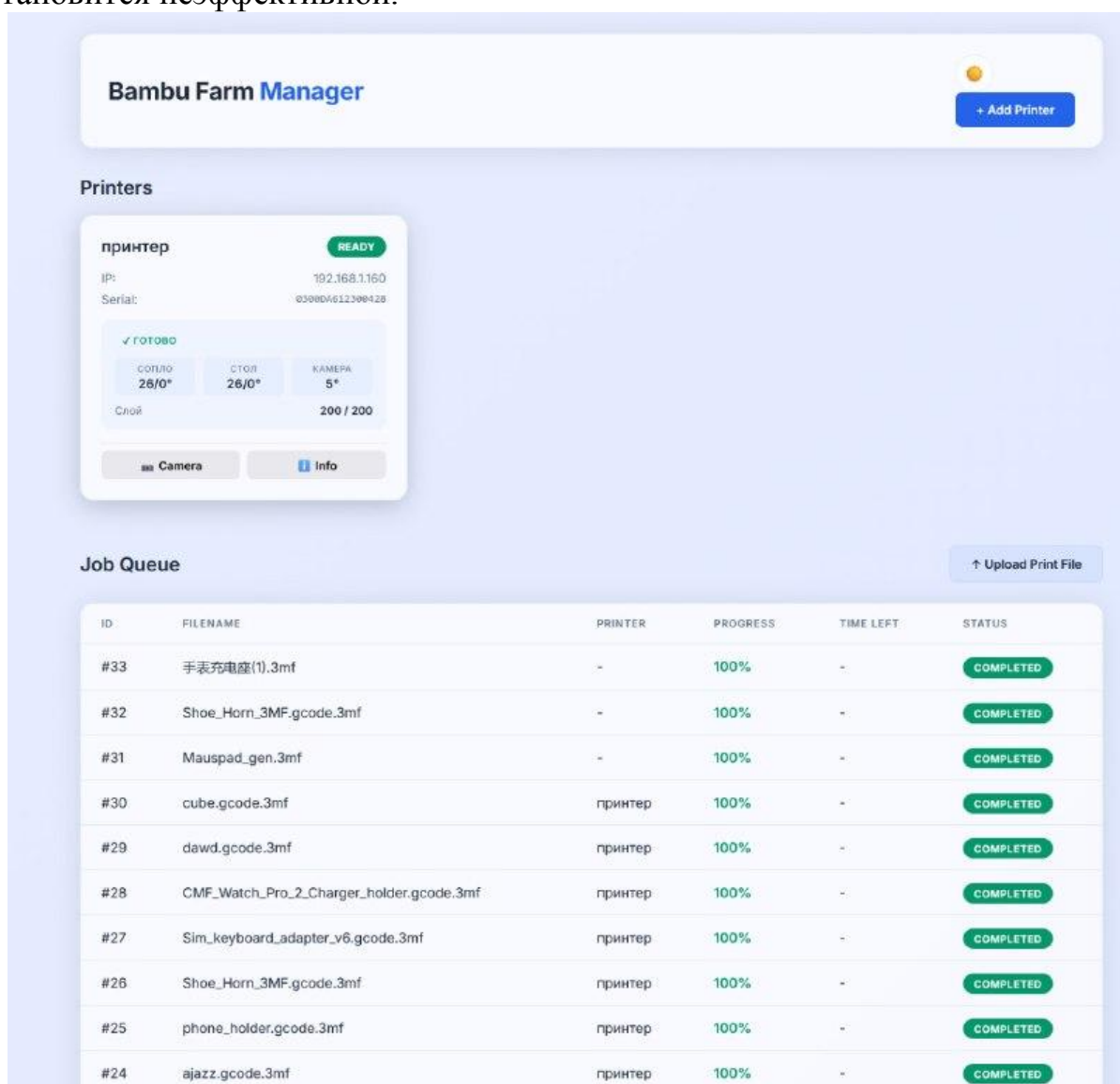


Рисунок 1 – Главное окно программы

Во-вторых, система реализует автоматическое распределение задач (Рисунок 2). После загрузки модели она направляется в очередь, а затем назначается на подходящий свободный принтер. Такой подход уменьшает простои и исключает ситуацию, когда оборудование не используется из-за отсутствия централизованного планирования.

Job Queue ↑ Upload Print File

ID	FILENAME	PRINTER	PROGRESS	TIME LEFT	STATUS
#37	hanger.gcode.3mf	-	-	-	QUEUED
#36	instax_mini_without.gcode.3mf	-	-	-	QUEUED
#35	M8_Mounting_hole.gcode.3mf	принтер	20%	1ч 14МИН ≈ 17:02	PRINTING
#34	M8_Mounting_hole.3mf	принтер	-	-	FAILED
#33	手表充电座(1).3mf	-	100%	-	COMPLETED
#32	Shoe_Horn_3MF.gcode.3mf	-	100%	-	COMPLETED
#31	Mauspad_gen.3mf	-	100%	-	COMPLETED

Рисунок 2 – Автоматическое распределение задач

В-третьих, система обеспечивает наблюдение за параметрами печати (Рисунок 3). В интерфейсе отображаются данные о температуре, статусе задания и степени готовности. Это позволяет оператору контролировать ход процесса без постоянного физического присутствия у каждого устройства. Программа так же позволяет корректировать параметры самого принтера при необходимости (Рисунок 4). Это особо удобно при наладке и отстройке устройства.

Printers

принтер

PRINTING

IP: 192.168.1.160
Serial: 0300DA612300428
Job: M8_Mounting_hole.gcode.3mf
Progress: 1%

▶ ПЕЧАТЬ

ⓘ Проверка осей

🕒 1ч 32мин

осталось

Завершение ≈ 17:04

СОПЛО
170/170°

СТОЛ
44/65°

КАМЕРА
5°

Слой 0 / 416

📷 Camera

ℹ Info

Рисунок 3 – Основные параметры подключенного принтера

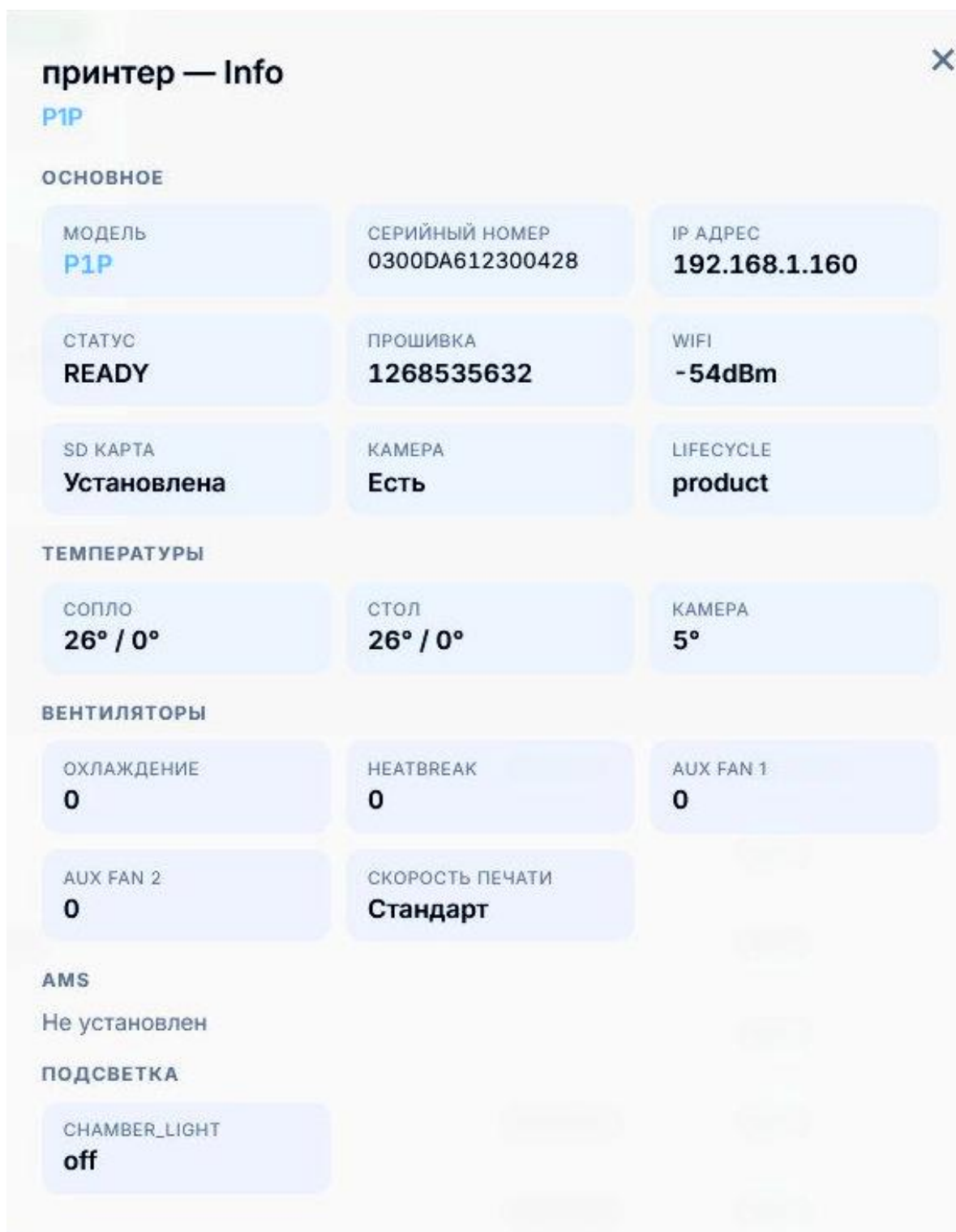


Рисунок 4 – Окно дополнительной информации о принтере и печати

В-четвертых, система включает аппаратный элемент взаимодействия — кнопку на базе ESP32. Она используется для подтверждения того, что стол очищен и принтер готов к следующему запуску. На практике это особенно удобно в условиях производства, где важна скорость реакции и где оператору проще нажать физическую кнопку, чем выполнять дополнительные действия в интерфейсе.

Место приложения в производственном процессе

Разработанное приложение выступает как связующее звено между цифровой моделью изделия и реальным производственным циклом. Оно позволяет не просто запускать печать, а организовывать повторяющийся и контролируемый процесс производства. В условиях фермы 3D-принтеров это имеет принципиальное значение, поскольку основная проблема заключается не в самой печати как таковой, а в управлении множеством параллельных процессов.

Программа может применяться в тех отраслях, где требуется регулярное изготовление небольших партий деталей, быстрый переход от цифровой модели к физическому изделию и высокая гибкость производственного процесса. В первую очередь это машиностроение, где FDM-печать используется для изготовления прототипов, технологической оснастки, кондукторов, шаблонов, корпусов и вспомогательных элементов. В таких условиях особенно важны оперативность запуска печати и возможность одновременно управлять несколькими принтерами, поскольку это позволяет быстро закрывать запросы конструкторских и производственных подразделений.

Широкое применение технология находит и в приборостроении, где необходимо создавать корпуса устройств, монтажные элементы, держатели, крепежные детали и нестандартные комплектующие. Для этой сферы характерны частые изменения конструкции и необходимость в индивидуализированных решениях, поэтому ферма 3D-принтеров становится удобным инструментом для ускоренного получения опытных образцов и мелкосерийных изделий. Приложение управления фермой здесь позволяет снизить нагрузку на персонал и обеспечить стабильную работу оборудования без постоянного ручного контроля.

Перспективным направлением является также медицинская и стоматологическая сфера. Хотя для некоторых задач здесь чаще применяются фотополимерные технологии, FDM-принтеры также используются для изготовления анатомических моделей, вспомогательных приспособлений, учебных макетов и элементов индивидуального оборудования.

Таким образом, разработанное приложение не ограничивается одной узкой производственной задачей, применяется в различных отраслях, где используются FDM-принтеры и где важны централизованное управление, контроль статусов и загрузка оборудования, минимизация времени простоя и влияния человеческого фактора.

Результаты

Практическая значимость разработанной системы заключается в том, что она демонстрирует переход от разрозненного управления отдельными принтерами к целостной модели автоматизированного производственного участка. Для FDM-технологии это особенно актуально, поскольку сама технология уже цифровая по своей природе, а значит, наибольший прирост

эффективности достигается не только за счет улучшения оборудования, но и за счет совершенствования программной среды управления.

Использование дополнительного программного обеспечения позволяет:

1. Уменьшить количество ручных операций;
2. Ускорить передачу задач между принтерами;
3. Повысить прозрачность производственного процесса;
4. Улучшить контроль состояния оборудования;
5. Повысить общую производительность фермы.

Таким образом, автоматизация FDM-производства должна рассматриваться как комплексная задача, включающая как аппаратные, так и программные решения. Предложенное приложение является примером того, как дополнительные технологии могут существенно расширить возможности стандартного 3D-оборудования и превратить его в эффективный производственный инструмент.

Выводы

FDM-печать является перспективной технологией современного производства, однако ее эффективность во многом зависит от уровня цифровой организации процесса. Использование дополнительных технологий автоматизации позволяет устранить основные ограничения ручного управления и создать устойчивую производственную систему.

Разработанное приложение для управления фермой 3D-принтеров подтверждает, что программная автоматизация, дополненная простыми аппаратными средствами, способна существенно повысить удобство эксплуатации, сократить время между операциями и обеспечить более высокий уровень контроля над производственным процессом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Игонина Е. В., Дружинина О. В. Особенности разработки и применения FDM-технологии при создании и прототипировании 3D-объектов [Электронный ресурс]. <http://sitito.cs.msu.ru/index.php/SITITO/article/view/224>.
2. Шемелюнас С. С., Дроботов А. В., Самойлов Д. В. Автоматизация сервисных функций в FDM 3D принтере [Электронный ресурс]. https://www.vstu.ru/nauka/izdaniya/doi/10.35211_1990-5297-2021-3-250-78-82.pdf.
3. Лапко О. П., Ковалева И. Л. Отслеживание процесса печати на строительном 3D-принтере [Электронный ресурс]. <https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/142253/89.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
4. Методики оптимизации аддитивной технологии формообразования на примере нагруженных изделий из пластмасс [Электронный ресурс]. <http://journal.vsuwt.ru/index.php/jwt/article/view/509>.
5. FastAPI Documentation [Электронный ресурс]. — URL: <https://fastapi.tiangolo.com/>.

6. EspresifSystems. ESP32 TechnicalReferenceManual [Электронныйресурс]. — URL: <https://www.espressif.com/en/support/technical-docs>.
7. Bambu Lab Documentation [Электронныйресурс]. — URL: <https://wiki.bambulab.com/>.
8. 3D Printer Farm and Fleet Software [Электронныйресурс]. — URL: <https://www.astroprint.com/3d-printer-farm-software>.
9. Выращиваем инновации: ферма 3D-печати как перспективная бизнес-модель [Электронный ресурс]. — URL: <https://blog.iqb.ru/3d-printing-farms-business-model/>.
10. Техническое обоснование актуальности проекта «Ферма по 3D-печати в России» [Электронный ресурс]. — URL: https://studia3d.com/files/3D-farm_in_Rus.pdf.

REFERENCES

1. Igonina E. V., Druzhinina O. V. Features of the development and application of FDM technology in the creation and prototyping of 3D objects [Electronic resource]. <http://sitito.cs.msu.ru/index.php/SITITO/article/view/224>.
2. Shemelyunas S. S., Drobotov A.V., Samoilov D. V. Automation of service functions in an FDM 3D printer [Electronic resource]. https://www.vstu.ru/nauka/izdaniya/doi/10.35211_1990-5297-2021-3-250-78-82.pdf.
3. Lapko O. P., Kovaleva I. L. Tracking the printing process on a construction 3D printer [Electronic resource]. <https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/142253/89.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
4. Methods of optimization of additive shaping technology on the example of loaded plastic products [Electronic resource]. <http://journal.vsuwt.ru/index.php/jwt/article/view/509>.
5. FastAPI Documentation [Electronic resource]. — URL: <https://fastapi.tiangolo.com/>.
6. Espr esif Systems. ESP32 Technical Reference Manual [Electronic resource]. — URL: <https://www.espressif.com/en/support/technical-docs>.
7. Bambu Lab Documentation [Electronic resource]. — URL: <https://wiki.bambulab.com/>.
8. 3D Printer Farm and Fleet Software [Electronic resource]. — URL: <https://www.astroprint.com/3d-printer-farm-software>.
9. We grow innovations: a 3D printing farm as a promising business model [Electronic resource]. — URL: <https://blog.iqb.ru/3d-printing-farms-business-model/>.
10. Technical justification of the relevance of the project "3D printing Farm in Russia" [Electronic resource]. — URL: https://studia3d.com/files/3D-farm_in_Rus.pd.

Блинков О.Г.,
Техника және экономика ғылымдарының докторы, доцент
o.g.blinkov@urfu.ru¹

Мальцев Е.А.,
магистрант,
maltsev.2001@inbox.ru¹

*Ресейдің тұңғыш президенті Б.Н. Ельцин
атындағы Орал федералдық университеті
620002, Екатеринбург қ., Мир көшесі, 19-үй¹*

ҚОСЫМША ТЕХНОЛОГИЯЛАРДЫ ПАЙДАЛАНУ АРҚЫЛЫ ӨНДІРІСТІК ҮДЕРІСТІ АВТОМАТТАНДЫРУ. FDM-ПРИНТЕРЛЕР

***Аңдатпа.** Мақалада аддитивті өндірісте FDM технологиясын қолдану арқылы өндірістік үдерісті автоматтандырудың ерекшеліктері қарастырылады. FDM басып шығарудың тиімділігі көбінесе жабдық пен материалдардың сипаттамаларымен ғана емес, сонымен қатар өндірістік циклді цифрлық ұйымдастыру деңгейімен де анықталатынын көрсетеді. 3D принтер фермаларын басқаруға арналған бағдарламалық құралдарға ерекше назар аударылады, олар тапсырмаларды таратуды, жабдық күйін бақылауды және бос уақытты қысқартуды жеңілдетеді. Практикалық мысал ретінде VatбиLab FDM-принтерлер фермасын басқаруға арналған әзірленген қосымша қарастырылады. Қосымша оператордың веб-интерфейсін, тапсырмалар кезегі жүйесін, телеметрия модулін және ESP32 платформасы негізінде жасалған басып шығару үстелін тазалауды растауға арналған аппараттық батырманы қамтиды.*

***Түйінді сөздер:** аддитивті өндіріс, FDM, 3D басып шығару, автоматтандыру, 3D принтер фермасы, бағдарламалық қамтамасыз ету, мониторинг, ESP32.*

Blinkov O.G.
Doctor of Technical and Economic Sciences, associate professor
o.g.blinkov@urfu.ru¹

Maltsev E.A.
graduate student
maltsev.2001@inbox.ru¹

Ural Federal University named

after the first President of Russia B.N. Yeltsin,
620002 Yekaterinburg, Mira St. 19¹

AUTOMATION OF THE PRODUCTION PROCESS USING ADDITIONAL TECHNOLOGIES. FDM-PRINTERS

***Abstract.** The article discusses the features of automation of the production process using FDM technology in additive manufacturing. It is shown that the efficiency of FDM printing is largely determined not only by the characteristics of the equipment and materials, but also by the level of digital organization of the production cycle. Special attention is paid to the software tools for managing a 3D printer farm, which provide task distribution, equipment status monitoring, and downtime reduction. As a practical example, the developed application for managing the Bambu Lab FDM printer farm is considered, which includes a web operator interface, a queue system, a telemetry module, and a hardware confirmation button for table cleaning based on ESP32.*

***Keywords:** additive manufacturing, FDM, 3D printing, automation, 3D printer farm, software, monitoring, ESP32.*