

## ПРОБЛЕМЫ И ОБЗОР АЛГОРИТМИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ В ТЕХНОЛОГИИ FFF 3D-ПЕЧАТИ

Э. А. Юнусов<sup>1,2,a</sup>, Д. В. Горбунов<sup>2,3,b</sup>

<sup>1</sup> ПАО «Сургутнефтегаз», ПУ СургутАСУнефть, Сургут, Российская Федерация

<sup>2</sup> Сургутский государственный университет, г. Сургут, Российская Федерация

<sup>3</sup> Сургутский филиал федерального государственного автономного учреждения «Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», г. Сургут, Российская Федерация

<sup>a</sup> ✉ yunusov\_ea@mail.ru, <sup>b</sup> Gorbunov\_dv@surgu.ru

*Аннотация:* в статье рассматриваются существующие алгоритмы подготовки модели к 3D-печати. Проведен обзор основных программ для подготовки 3D-моделей к печати, а также рассмотрена возможность печати экзотическими материалами, такими как шоколад. На примере одной из программ изучены и разделены на категории алгоритмы подготовки модели к печати. Также представлен обзор общепринятых практик и рассмотрены перспективные разработки и решения на различных стадиях. В статье предложены и описаны варианты тестирования напечатанных моделей для оценки работоспособности перспективных алгоритмов. Кроме того, была проведена оценка скорости разработки новых алгоритмов. Приведены факторы, которые существенно ограничивают развитие технологии 3D-печати, например, такие, как коммерциализация и закрытая разработка, при которой результаты исследований не выкладываются в публичное пространство. На основе проведенного обзора проблем и алгоритмов в аддитивных технологиях можно сказать, что развитие алгоритмов подготовки моделей к 3D-печати может существенно улучшить характеристики готовых изделий без существенного повышения затрат на печать.

*Ключевые слова:* 3D-печать, алгоритмы печати, алгоритм заполнения, слайсер.

*Для цитирования:* Юнусов Э. А., Горбунов Д. В. Проблемы и обзор алгоритмических решений в технологии FFF 3D-печати. *Успехи кибернетики*. 2025;6(2):67–74.

*Поступила в редакцию:* 29.05.2025.

*В окончательном варианте:* 14.06.2025.

## FFF 3D PRINTING TECHNOLOGY ALGORITHMS: PROBLEMS AND REVIEW

E. A. Yunusov<sup>1,2,a</sup>, D. V. Gorbunov<sup>2,3,b</sup>

<sup>1</sup> PJSC Surgutneftegaz, PM SurgutASUneft, Surgut, Russian Federation

<sup>2</sup> Surgut State University, Surgut, Russian Federation

<sup>3</sup> Surgut Branch of Scientific Research Institute for System Analysis of the National Research Centre “Kurchatov Institute”, Surgut, Russian Federation

<sup>a</sup> ✉ yunusov\_ea@mail.ru, <sup>b</sup> gorbunov\_dv@surgu.ru

*Abstract:* we examined existing algorithms for preparing models for 3D printing and provided an overview of the key software tools used in this process. We also explored the potential of printing with unconventional materials, such as chocolate. Using one of the programs as a case study, we analysed model preparation algorithms and categorised them based on their functions. In addition, we reviewed common industry practices and discussed promising developments and solutions at various stages of the workflow. We proposed and described methods for testing printed models to evaluate the performance of new algorithms. Furthermore, we assessed the pace of algorithm development and identified key barriers to progress in 3D printing, including commercial restrictions and the lack of publicly available research due to closed-source development. Based on our review, we conclude that improving algorithms for model preparation can enhance the quality of printed products without significantly increasing production costs.

*Keywords:* 3D printing, printing algorithms, filling algorithm, slicer.

*Cite this article:* Yunusov E. A., Gorbunov D. V. FFF 3D Printing Technology Algorithms: Problems and Review. *Russian Journal of Cybernetics*. 2025;6(2):67–74.

*Original article submitted:* 29.05.2025.

*Revision submitted:* 14.06.2025.

## Введение

Современная технология аддитивной 3D-печати активно развивается и применяется на практике за счет аддитивности (вместо обычного процесса убирания лишнего материала здесь происходит добавление материала) и высокой скорости разработки прототипов. Данная технология позволила множеству людей использовать огромное количество разнообразных моделей (в том числе доступных в сети Интернет для некоммерческого использования), но в подавляющем большинстве случаев 3D-печать остается на уровне хобби. Несмотря на это сейчас некоторые производители начали выкладывать модели деталей для своей продукции в открытом доступе (например, Philips для триммера предоставляют в открытом доступе модели насадок), что повышает ремонтпригодность и способствует привлечению новых клиентов.

В рамках статьи рассматриваются проблемы аддитивных технологий и возможные их решения, а также существующие алгоритмы подготовки модели к 3D-печати, возможные пути совершенствования или новые алгоритмы, которые могут улучшить данную технологию. Новые алгоритмы печати способны повысить прочность готовых изделий и при этом снизить время, требуемое для печати.

## Материалы и методы

В рамках статьи проведен обзор различного ПО (далее — слайсер) для подготовки 3D-модели в специальный код (G-Code) для 3D-принтера и представлены особенности слайсеров. Также рассмотрены существующие алгоритмы, встроенные в ПО. Как и большинство систем, слайсеры имеют и проблемы. Для решения этих проблем существует множество неоднозначных решений. Стоит отметить, что есть алгоритмы печати, которые еще не внедрены в слайсеры, но эти решения активно используются. Следует уделить внимание способам и алгоритмам тестирования готовых изделий, которые могут адекватно подтвердить корректность работы и зафиксировать улучшенные характеристики деталей, полученных на основе новых алгоритмов подготовки модели к 3D-печати.

На данный момент существует большое количество ПО, которое способно подготовить 3D-модели и преобразовать их в G-code для 3D-принтера [1]. В статье рассмотрены наиболее популярные слайсеры:

- Cura — открытый и свободный слайсер [2]. Создан компанией UltiMaker;
- PrusaSlicer — открытый, многофункциональный и часто обновляемый слайсер [3]. Был создан компанией Prusa Research;
- OrcaSlicer — открытый слайсер на базе Bambu Studio, созданный компанией SoftFever [4].

Все представленные слайсеры объединяет открытость исходного кода, популярность в сообществе 3D-печати и частичное использование одного и того же исходного кода (OrcaSlicer основан на Bambu Studio, который, в свою очередь, основан на исходном коде PrusaSlicer, который написан на базе исходного кода оригинального слайсера Slic3r). Каждый из этих слайсеров может быть использован для подготовки модели к любому принтеру (в том числе спроектированному самостоятельно) за счет возможности гибкой настройки конфигурации принтеров, даже для печати шоколадом [5], например, Cocola Press (рис. 1).

Каждый из слайсеров имеет свои уникальные алгоритмы. Следует отметить, что эти алгоритмы со временем могут быть внедрены и в другие слайсеры или же на их основе разрабатываются более совершенные алгоритмы подготовки 3D-моделей к печати.

Большинство алгоритмов будет рассмотрено на базе слайсера OrcaSlicer (большая часть из которых реализована в других). В данном слайсере модель разделяется на отдельные слои и обрабатывается шаг за шагом (рис. 2). Далее происходит обработка каждого слоя алгоритмами генерации периметров, заполнения, мостов, крышек, дна.

В первую очередь, следует рассмотреть алгоритмы генерации периметров модели. Данные алгоритмы формируют внешнюю оболочку модели и определяют внешний вид и прочностные характеристики готового изделия. На текущий момент в OrcaSlicer периметры генерируются только стандартным вариантом наложения слоев друг на друга (рис. 3, модель слева), что приводит к образованию больших промежутков между полосами материала. Пустоты в готовом изделии приводят к уменьшению адгезии слоев, что, в свою очередь, уменьшает прочностные характеристики модели.

Для того чтобы минимизировать пустоты в готовом изделии, а также для повышения адгезионных характеристик слоев при печати разработаны более совершенные алгоритмы подготовки модели к печати. Следует отметить, что эти алгоритмы пока не внедрены в слайсеры. Ниже представлены два

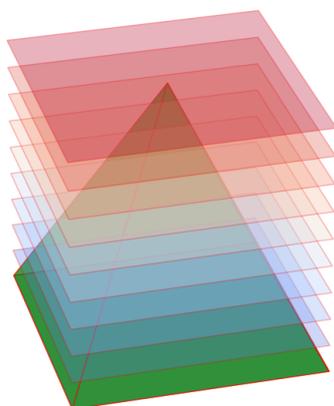


**Рис. 1.** Пример печати шоколадом

алгоритма:

- использование так называемой «кирпичной кладки» (рис. 3, модель справа) [6], что подразумевает сдвиг по высоте у соседних слоев периметров. Таким образом достигается минимизация пустот между слоями;
- другой вариант улучшения заполнения — создать пустоту между двумя периметрами и заполнить их сверху жидким пластиком, выполнив, по своей сути, операцию литья под давлением, только без самого давления [7].

Для тестирования готовых изделий, полученных на основе представленных алгоритмов, можно



**Рис. 2.** Пример нарезки пирамиды на слои шаг за шагом для последующей обработки

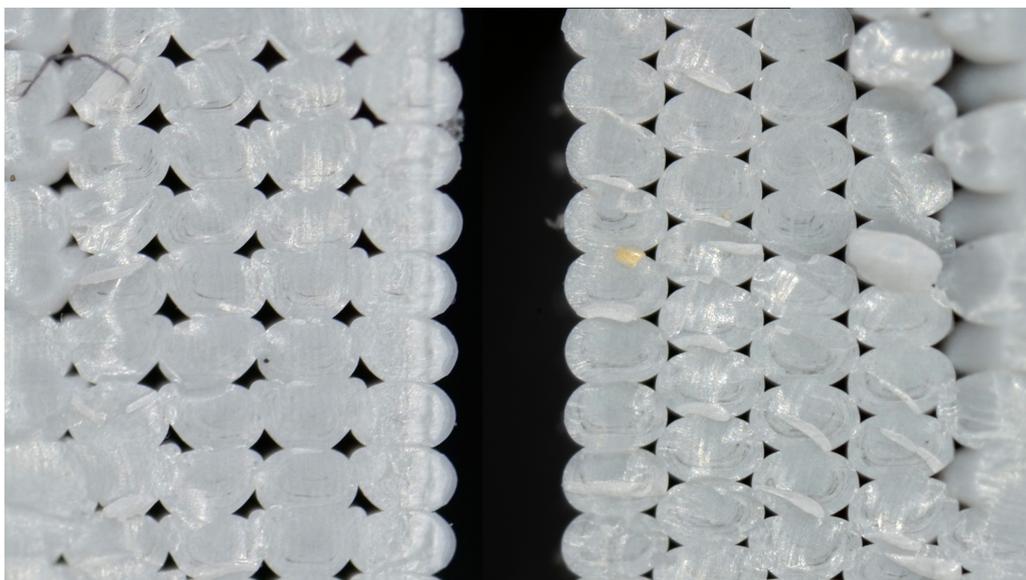


Рис. 3. Стандартные периметры и «кирпичные» периметры

применить классическую схему исследования с помощью метода трехточечного изгиба [8]. Пример работы машины представлен на рис. 4. При улучшении адгезии слоев и уменьшении пустот между слоями характеристики модели при изгибе должны увеличиться.

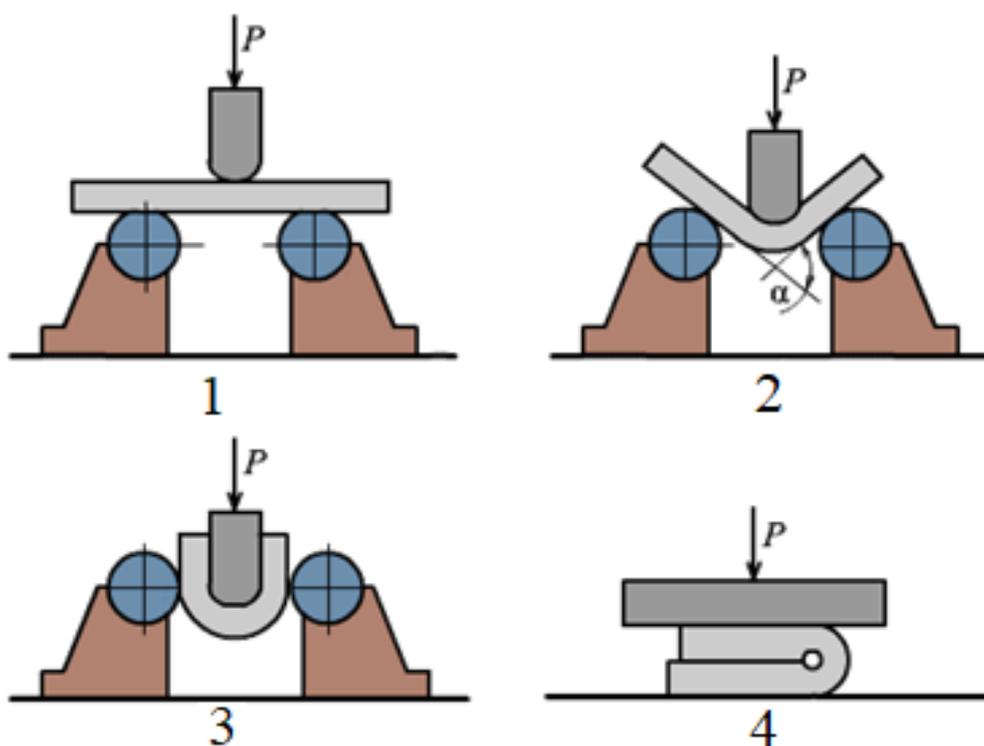
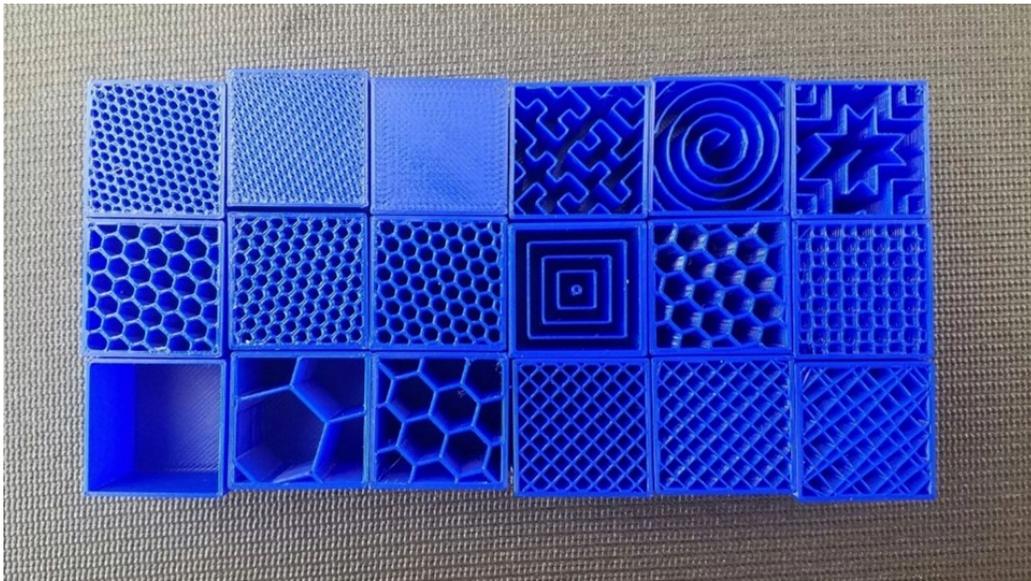


Рис. 4. Пример работы машины трехточечного изгиба

Следующий блок алгоритмов — генерация внутреннего заполнения. Эти алгоритмы необходимы для внутреннего заполнения модели (объем заполнения обычно указывается в %). Наиболее распространенные алгоритмы представлены на рис. 5.

Каждый из вариантов заполнения имеет свои достоинства и недостатки. В этой связи оператор 3D-принтера должен сам определить тип и плотность заполнения исходя из требований и предназначения детали. Следует отметить, что заполнение влияет на прочностные характеристики готового изделия, но эта зависимость между прочностью и заполнением нелинейная.



**Рис. 5.** Примеры различных вариантов заполнения

На данный момент существует несколько вариантов совершенствования алгоритмов заполнения, которые можно реализовать в слайсерах для повышения прочности готового изделия:

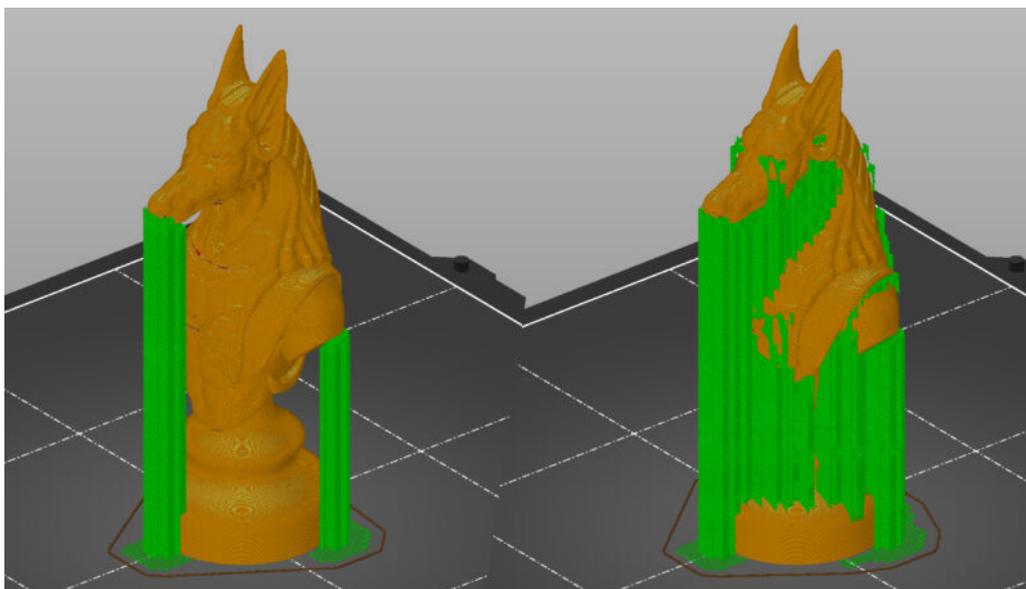
- применение нескольких вариантов заполнения для одной модели. В рамках исследования [9] были использованы сочетания паттернов с поворотом на 180 градусов, что привело к увеличению прочности при растяжении и сжатии;
- применение мультиматериальных заполнений и структур, которые сочетают различные характеристики. Примером такого сочетания является полиэтилентерефталатгликоль (PETG) и термопластичный полиуретан (TPU). В такой комбинации можно создать детали с достаточной прочностью и возможностью зафиксировать TPU, который слишком мягок для прочного крепления;
- создание нового алгоритма заполнения модели, который позволил бы заполнить печатную модель различными видами утяжелителей без необходимости на этапе моделирования создавать полости. При разработке такого алгоритма необходимо учесть, что заполнение утяжелителем (например, свинцовыми шариками) не должно приводить к появлению эффекта погремушки. На данный момент для того, чтобы увеличить массу готового изделия, часто используют остановку печати на указанном слое и загрузку утяжелителей, но этот вариант требует постоянного контроля печати, а также в большинстве случаев определенного размера утяжелителя для конкретной модели.

Для тестирования разных типов заполнения можно использовать трехточечный изгиб, а также специализированные виды тестов (по типу проверки работоспособности заполнения и утяжеления).

Далее необходимо рассмотреть алгоритмы, которые можно изменить, — блок алгоритмов генерации поддерживающего материала нависающих частей модели. Из-за специфики процесса 3D-печати сложные криволинейные формы не всегда возможно напечатать без дополнительных структур, в таком случае необходимо использовать дополнительный поддерживающий материал, поверх которого будет происходить печать основной фигуры (рис. 6).

На данный момент известны следующие пути, которые можно реализовать, чтобы повысить качество готового изделия:

- разработка новых алгоритмов генерации поддержек для специфичных задач. Таким примером может служить алгоритм генерации поддержек для различных плоских корпусов. Сейчас в большинстве случаев модели располагаются диагонально над столом печати. В таком случае достаточно небольшой опоры и нескольких единичных точек соприкосновения, чтобы модель могла быть отпечатана, при этом минимизируются дефекты на модели и сокращается расходуемый материал;
- применение нескольких алгоритмов генерации поддержек для одной модели, которые используются точно для разных моделей. Так как одни виды поддержек дают поверхность с меньшим количеством дефектов, а другие расходуют в целом гораздо меньше материала, можно использовать одновременно оба алгоритма на разных частях модели, чтобы получить более оптимальный расход



**Рис. 6.** Пример двух видов поддержек на одной и той же модели

материала и уменьшение дефектов внешней части модели, которая соприкасается с поддержкой.

Соответственно, тестирование обновленных алгоритмов поддержки будет представлять из себя печать одной и той же модели, только с различными вариациями поддержки, а оценка должна производиться по следующим параметрам:

- расход материала — чем меньше было израсходовано материала, тем лучше, но должно сохраняться такое же или меньшее количество дефектов на модели. Следует учесть, что печатать модель можно без поддержки, но результат такой печати будет в виде испорченного готового изделия;
- количество дефектов на модели: чем меньше поддержек соприкасается с моделью, тем меньше будет дефектов от поддержек на готовом изделии, что может существенно уменьшать расход на постобработку детали.

Следующий и последний блок алгоритмов — это блок дополнительных алгоритмов компенсации различных дефектов или особенностей 3D-печати. Таких алгоритмов достаточно много, так как есть большое количество типовых дефектов при 3D-печати, которые можно предусмотреть на этапе подготовки модели к печати. Примеры таких алгоритмов:

- алгоритм PA\LA — алгоритм компенсации подачи филамента [10]. Проблема возникает из-за особенностей филамента и несовершенства механики экструдера (механизма подачи филамента), например, резиноподобный TPU сильно растягивается и сжимается при печати, что приводит к резкому изменению ускорения при печати. Работа алгоритма PA\LA основана на изменении скорости подачи филамента соответственно необходимой экструзии (если ее нужно снизить, подача будет заранее уменьшена для того, чтобы избежать появления дефектов, и наоборот);

- алгоритмы специальной нарезки модели на слои, которые могут напечатать деталь единой нитью по спирали, что актуально для различных тонкостенных деталей и позволяет печатать более крепкую деталь относительно стандартных настроек;

- алгоритм компенсации эффекта «слоновьей ноги» — алгоритм позволяет исправить дефект, связанный с неправильной настройкой принтера. Проявление такого дефекта выражается в утолщении нижних слоев печатающейся детали. Такой дефект в подавляющем большинстве случаев появляется вследствие неправильной настройки принтера (например, неправильной калибровки осей). На практике часто проще решить такую проблему программным способом без изменения настроек принтера;

- алгоритмы сброса материала. В случае многоцветной печати на основе систем, которые подают филамент через один и тот же хотенд, этот алгоритм позволяет вместо расхода времени и материала на очистку старого филамента в специально выделенной зоне эту же очистку проводить в заполнении поддержек и/или заполнении основной модели, ускоряя процесс печати и при этом уменьшая расход материала;

- алгоритмы уменьшения лишних движений. Вследствие неоптимальной нарезки может быть

огромное количество лишних движений экструдера, что увеличивает количество времени на печать, а при неисправностях увеличивается и количество дефектов на модели. Данный алгоритм переопределяет все холостые передвижения так, чтобы добиться наименьшего количества времени, затрачиваемого на них.

Соответственно, для каждого алгоритма из вышеперечисленных необходимы свои варианты тестирования, так как все они уникальные и изменяют один из критериев печати. Комбинация из всех вышепредставленных способов и алгоритмов может существенно осложнить процесс подготовки модели, но это приведет к повышению качества печати и уменьшению времени печати и используемого материала.

### Результаты и их обсуждение

Подводя итог, можно сказать, что современные алгоритмы 3D-печати активно развиваются и изменяются, хотя темпы развития могли бы быть и быстрее. На данный момент очень активно развиваются следующие алгоритмы, которые впоследствии могут стать алгоритмами по умолчанию в программах-слайсерах:

- новые варианты алгоритмов генерации стенок, такие как кирпичные стенки и их модификации, позволяющие увеличивать прочность готовых изделий за счет повышения адгезии слоев;
- новые варианты и комбинирование существующих алгоритмов генерации заполнения моделей, которые также могут увеличить прочность только за счет использования комбинированных видов заполнения в одной модели;
- новые варианты и комбинирование алгоритмов генерации поддержек, уменьшающих расходы материалов и количество дефектов модели.

К сожалению, данная область 3D-печати (а именно новые алгоритмы) развивается не так быстро, как могла бы, из-за следующих факторов:

- проблемы с распространением нелегальных копий моделей [11]. В рамках исследования было отмечено, что на данный момент в сфере 3D-моделирования и печати наблюдается дефицит доступа к 3D-моделям. На существующем рынке создание моделей для последующей продажи является убыточным, так как любой покупатель получает для себя полную копию файлов для печати без каких-либо серьезных средств защиты, что способствует созданию целых сообществ людей, которые, единожды купив одну модель, выкладывают ее в свободный доступ, из-за чего официальную копию будут покупать реже. Для решения данных проблем возможно внедрение новых технологий на базе блокчейн, рассмотренных в статье [11].
- проблемы со свободным распространением алгоритмов. Множество технологий разрабатывается внутри коммерческих компаний, что замедляет развитие публичных технологий;
- проблема отсутствия единых стандартов тестов. Существует большое количество калибровочных моделей, которые на один и тот же параметр могут давать разные результаты, противоречащие друг другу.

### Заключение

Проведенное исследование показало, что разработка и использование новых алгоритмов позволят добиться лучших результатов в 3D-печати без существенного повышения затрат на печать моделей, а также без необходимости специального обучения, только за счет программных изменений, хотя это и требует достаточно большого труда проектировщиков и программистов. Однако даже это развитие является достаточно медленным, так как значительное количество технологий и алгоритмов разрабатывается закрытыми коммерческими компаниями. Развитие алгоритмов печати способно упростить сложность подготовки моделей, что приведет к более массовому распространению 3D-принтеров в быту, что, в свою очередь, приведет к увеличению скорости развития аддитивных технологий.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Лисяк В. В. Обзор слайсеров для 3D-печати. *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2022;3:60-74.
2. Смирнов М. А., Рыбкин Н. О., Ксенофонтова О. Л. FDM-технология: особенности применения, преимущества, недостатки. *Проблемы экономики, финансов и управления производством: сборник научных трудов вузов России*. 2021;48:115-122.

3. Kohout K. *PrusaSlicer 2.9.1: Smarter Sequential Printing and Stronger Multi-Material Interlocking*. Режим доступа: [https://blog.prusa3d.com/prusaslicer-2-9-1-smarter-sequential-printing-stronger-multi-material-interlocking\\_111458](https://blog.prusa3d.com/prusaslicer-2-9-1-smarter-sequential-printing-stronger-multi-material-interlocking_111458).
4. Benedict O'Neill. *Orca Slicer vs. Cura: A Technical and Practical Comparison*. Режим доступа: <https://www.wevolver.com/article/orca-slicer-vs-cura-a-technical-and-practical-comparison>.
5. Athira V. A., Udayarajan C. T., Goksen G., Brennan C. S., Nisha P. A Brief Review on 3D Printing of Chocolate. *International Journal of Food Science and Technology*. 2023;58(6):2811-2828. DOI: 10.1111/ijfs.16415.2023.
6. Suiker A. S. J. Mechanical Performance of Wall Structures in 3D Printing Processes: Theory, Design Tools and Experiments. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2018;137:145-170. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2018.01.010>.
7. David O. K. Austin Colon Injection Printing: Additive Molding Via Shell Material Extrusion and Filling. *Additive Manufacturing*. 2020;36:101469. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101469>.
8. Балашов А. В., Черданцев А. О., Новиковский Е. А., Ананьин С. В., Белоплотов С. В. Исследование прочности изделий, полученных методом 3D-печати. *Ползуновский вестник*. 2016;2:61-64.
9. Aboeella M. G., Ebeid S. J., Sayed M. M. Layer Combination of Similar Infill Patterns on the Tensile and Compression Behavior of 3D Printed PLA. *Scientific Reports*. 2025;15:11759. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-94446-8>.
10. Tronvoll S. A., Popp S., Elverum C. W., Welo T. Investigating Pressure Advance Algorithms for Filament-Based Melt Extrusion Additive Manufacturing: Theory, Practice and Simulations. *Rapid Prototyping Journal*. 2019;25(5):830-839. DOI: <https://doi.org/10.1108/RPJ-10-2018-0275>.
11. Гавриленко Т. В., Горбунов Д. В., Востров В. А. Состояние и основные проблемы развития аддитивных технологий. *Успехи кибернетики*. 2024;5(2):75-83. DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-2-08.