

doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-5-929-940

УДК 67.05

**Контроль динамики экструзии при трехмерной печати изделий****Ксения Владимировна Зименко<sup>1</sup>✉, Максим Яковлевич Афанасьев<sup>2</sup>,  
Михаил Владимирович Колесников<sup>3</sup>**<sup>1,2,3</sup> Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация<sup>1</sup> [zkсения@yahoo.com](mailto:zkсения@yahoo.com) ✉, <https://orcid.org/0000-0002-3792-136X><sup>2</sup> [amax@niuitmo.ru](mailto:amax@niuitmo.ru), <https://orcid.org/0000-0003-4061-1407><sup>3</sup> [kmv@itmo.ru](mailto:kmv@itmo.ru), <https://orcid.org/0000-0003-1559-1766>**Аннотация**

**Предмет исследования.** Рассмотрен один из эффектов, возникающих при печати по технологии экструзии материала или послойного наплавления, который называется нежелательной динамикой экструзии. Этот эффект проявляется при больших ускорениях печатающей головки и приводит к наплавлению в углах деталей и неровностям печатного слоя. Чтобы минимизировать этот эффект, в современных системах управления применяются алгоритмы контроля динамики Advance. Однако такие недостатки как инертность, необходимость экспериментального определения степени компенсации, а также неопределенность влияния материала, геометрии сопла и параметров процесса печати на работу алгоритма не позволяют использовать данную группу решений в промышленных масштабах. **Методы.** Представлено исследование влияния следующих характеристик печати: типов материала и экструдера; температуры материала; геометрии слоя и сопла на проявление динамики экструзии путем проведения серии экспериментов. Тесты выполнены на трехмерном принтере Creality Ender 3. Полученные экспериментальные данные позволяют расширить понимание влияния динамики экструзии при FDM-печати, а также найдут применение для модификации существующих алгоритмов управления динамикой. Представлена модификация алгоритма Advance на основе машинного обучения. Предложено внедрить алгоритм, содержащий две обученные модели нейронной сети. Одна модель предсказывает изменения направления движения печатающей головки для минимизации остаточных дефектов и повышения средней скорости печати. Вторая модель прогнозирует параметр компенсации для конкретных условий печати без необходимости ручной калибровки. **Основные результаты.** Предложена нейронная сеть, позволяющая определять параметр компенсации в зависимости от типа материала, толщины слоя, геометрии сопла и температуры печати. Обучение нейронной сети выполнено на основе экспериментальных данных. Разработанный алгоритм внедрен в алгоритм Linear Advance системы управления Marlin и протестирован на установке Creality Ender 3. Эксперименты показали, что разработанная модель способна успешно прогнозировать требуемую величину компенсации и может быть применена во время процесса печати. **Практическая значимость.** Предложенная модификация алгоритма Advance поможет облегчить и автоматизировать процесс компенсации динамики экструзии, что расширит возможности применения трехмерных принтеров в промышленных условиях. Полученный алгоритм может повысить точность и скорость печати, что впоследствии повысит экономическую независимость и конкурентоспособность малых проектных организаций и предприятий России, применяющих трехмерные принтеры. Полученные результаты работы расширят возможности быстрого прототипирования и обеспечат ускорение создания опытных партий.

**Ключевые слова**

динамика экструзии, трехмерная печать, аддитивное производство, advance, экструдер, Linear advance, Marlin, fused deposition modelling, fused filament fabrication

**Благодарности**

Работа выполнена в рамках НИР № 620164 «Методы искусственного интеллекта для киберфизических систем».

**Ссылка для цитирования:** Зименко К.В., Афанасьев М.Я., Колесников М.В. Контроль динамики экструзии при трехмерной печати изделий // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2022. Т. 22, № 5. С. 929–940. doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-5-929-940

## Pressure control in material extrusion additive manufacturing

Ksenia V. Zimenko<sup>1</sup>, Mikhail Ya. Afanasev<sup>2</sup>, Maxim V. Kolesnikov<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

<sup>1</sup> zksenia@yahoo.com, <https://orcid.org/0000-0002-3792-136X>

<sup>2</sup> amax@niuitmo.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4061-1407>

<sup>3</sup> kmv@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1559-1766>

### Abstract

This paper discusses the effect called undesirable extrusion dynamics that occur during material extrusion printing or fused deposition modeling. This effect is revealed during high acceleration and deceleration of printing head and results in over-extrusion on corners of parts and printed layer unevenness. To minimize this effect, modern control systems use Advance algorithms for dynamics control. However, such disadvantages as inertia, reduced printing speed, need for manual calibration, as well as uncertainty of the influence of material, nozzle geometry, and printing process parameters on the algorithm performance do not allow this group of solutions to be applied on an industrial scale. The paper presents a study of the influence of printing characteristics, such as material type, extruder type, printing temperature, layer and nozzle geometry, on extrusion dynamics through a series of experiments. The experiments were carried out on a Creality Ender 3 printer. The obtained experimental data will allow us to deepen the understanding of extrusion dynamics influence in FDM printing; they are also used in the present study to modify existing dynamics control algorithms. The paper proposes a modification of Advance algorithm based on machine learning. It is proposed to implement an algorithm containing two trained neural network models. One model predicts changes in printing head motion to minimize residual defects and increase average print speed. The second model predicts the compensation parameter for specific printing conditions without the need for manual calibration. A neural network model was trained to determine the compensation parameter depending on the type of material, layer thickness, nozzle geometry and printing temperature. The model was trained based on experimental data. The developed algorithm was introduced into Linear Advance algorithm of the Marlin firmware and tested on Creality Ender 3. The experiments showed that the developed model can successfully predict the required compensation and can be applied during the printing process. The proposed algorithm helps to facilitate and automate the process of extrusion dynamics compensation which will expand the possibilities of FDM printers' application in industrial conditions. The obtained algorithm can improve the accuracy and printing speed which will subsequently help to increase the economic independence and competitiveness of small design organizations and enterprises in Russia that use 3D printers. This research expands the possibilities of rapid prototyping and may help to ensure the rapid creation of pilot batches.

### Keywords

3D printing, additive manufacturing, advance, extrusion dynamics, pressure control, extruder, fused deposition modeling, fused deposition modelling, fused filament fabrication

### Acknowledgements

The work was carried out under the project no. 620164 "Artificial intelligence methods for cyber-physical systems" conducted at the Faculty of Control Systems and Robotics, ITMO University.

**For citation:** Zimenko K.V., Afanasev M.Ya., Kolesnikov M.V. Pressure control in material extrusion additive manufacturing. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2022, vol. 22, no. 5, pp. 929–940 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-5-929-940

### Введение

Одна из наиболее распространенных технологий аддитивного производства — трехмерная печать по методу экструзии материала или послойного наплавления (FDM, fused deposition modeling), также известная как изготовление способом наплавления нитей (FFF, fused filament fabrication). Первый термин был введен изобретателем технологии и соучредителем компании Stratasys Скоттом Крапом<sup>1</sup>. После истечения срока действия патента на технологию в 2009 году сторонние компании получили возможность разрабатывать принтеры на основе этого метода, а для обхода юридических ограничений применяется термин FFF.

Технология FDM предполагает формирование трехмерных объектов путем последовательного наплавления слоев материала по контурам заданной цифровой модели. В качестве печатного материала используются термoplastы в форме непрерывных нитей. Нить пода-

ется в экструдер, устройство с механическим приводом, которое направляет ее к нагревательному элементу. Он расплавляет материал, который затем выводится через сопло на подложку или предыдущие слои.

Один из эффектов, приводящих к дефектам печати, — нежелательная динамика экструзии, вызванная запаздыванием изменения давления материала в сопле по сравнению с изменением скорости печатающей головки экструдера [1]. Эффект проявляется при резком разгоне и торможении печатающей головки и продемонстрирован на рис. 1. При резком разгоне (участок 2) давление в сопле не успевает увеличиться так же быстро, как скорость перемещения рабочего органа, и на слое образуется утяжина, которая постепенно устраняется при новой устоявшейся скорости (участок 3). Аналогичным образом при торможении давление еще какое-то время остается высоким и образуется наплыв материала (участки 4–5). Чаще всего на печати данный эффект проявляется в виде наплывов в углах, где обычно требуется торможение, а также в виде недоэкструзии при переходе от печати внешних стенок к заполнению, где происходит стремительный разгон. Поскольку опи-

<sup>1</sup> [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.stratasys.com/en/about-us/history/> (дата обращения: 20.05.2022).

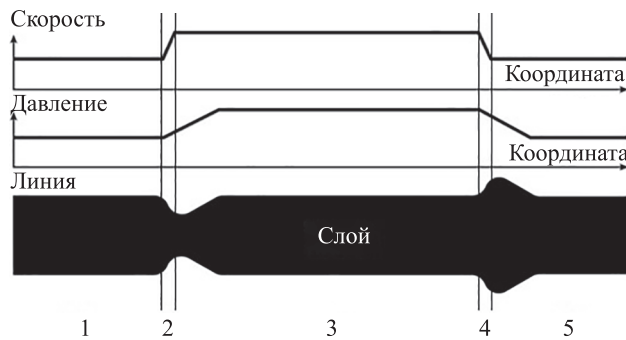


Рис. 1. Типичная картина дефектов слоя при ускорении/торможении

Fig. 1. Typical pattern of layer defects during acceleration/deceleration

санные дефекты существенно влияют на получаемые допуски и качество поверхности, полученные детали часто требуют постобработки для удаления лишнего материала. И если наплывы могут быть устранены дополнительной обработкой, то недоэкструзия относится к категории неисправимого брака.

Чтобы минимизировать данные дефекты, необходимы алгоритмы управления экструзией, способные регулировать темпы экструзии, в соответствии с изменяющейся скоростью печатающей головки, и этим поддерживать правильную геометрию слоя.

### Постановка задачи

В настоящее время существует группа алгоритмов (именуемых Advance), которые используются в системах числового программного управления (ЧПУ) для минимизации негативного влияния динамики экструзии. В алгоритмах Advance перед торможением производится дополнительный ретракт (втягивание материала обратно в сопло), а перед ускорением — дополнительный вывод материала, что стабилизирует давление в сопле при изменении скорости. Расчет дополнительных ретрактов и выводов материала выполнен с помощью коррекции переменной объемного расхода пластика, применяемой в системах управления печатью, специальным параметром компенсации  $K_A$ .

Данные алгоритмы имеют ряд серьезных недостатков, не позволяющих использовать их в промышленных масштабах. Во-первых, требуемое значение параметра компенсации можно найти только экспериментально, а поскольку параметр зависит от большого количества параметров печати, его необходимо находить вручную для каждого конкретного случая, что занимает много времени. В целом отсутствие исследований в этой области приводит к неопределенности того, как на динамику экструзии влияют различные характеристики процесса (высота слоя, материал, температура и геометрия сопла) [1]. Во-вторых, эффективность алгоритма существенно снижается из-за задержки, которая возникает между первым появлением дефекта и его компенсацией, приводящей к остаточным дефектам и, как следствие, к снижению средней скорости печати.

Настоящая работа направлена на исследование влияния характеристик печати, таких как тип материала, температура, параметры слоя и сопла, на динамику экструзии, а также на модификацию алгоритмов Advance, которая позволит устранить существующие недостатки и улучшить качество и скорость FDM-печати.

Предложена модификация алгоритма Linear advance, применяемого в системе с ЧПУ Marlin, на основе машинного обучения<sup>1</sup>. Внедрены две модели обученной нейронной сети. Первая модель предсказывает изменения направления движения печатающей головки, которые приводят к изменению скорости, для ускорения процесса компенсации. Это позволит уменьшить негативное влияние инерционности алгоритма и увеличить среднюю скорость печати. Вторая модель прогнозирует значение параметра компенсации при конкретных условиях печати, что позволяет избежать необходимости проведения экспериментов.

Результатом внедрения модели служит оптимизация алгоритмов, используемых в системах управления FDM-печатью.

Работа проведена в рамках научно-исследовательского проекта «Методы искусственного интеллекта для киберфизических систем». Трехмерный принтер является одним из ярких примеров киберфизической системы, включающей в себя интеллектуальные и физические составляющие.

Цель работы — внедрение интеллектуальной системы, направленной на улучшение физического процесса печати.

Выполнен анализ существующих исследований динамики экструзии, а также алгоритмов ее контроля. Описаны теоретические основы алгоритма и раскрыты его недостатки. Приведены результаты исследования влияния характеристик печати на динамику экструзии, а также обоснование выбора исследуемых параметров, плана экспериментов, применяемого оборудования и программного обеспечения. Приведено обоснование предложенной модификации алгоритма Linear advance, а также анализа полученного алгоритма на основе нейронной сети.

### Обзор предметной области

Область аддитивного производства и, в частности FDM-печати, в настоящее время динамично развивается. Сообщество энтузиастов активно внедряет новые методики, прежде чем они будут исследованы и напечатаны в научных работах.

Одна из таких новых, широко используемых, но еще не описанных, технологий — группа алгоритмов Advance для компенсации дефектов, вызванных нежелательной динамикой экструзии, возникающей при разгоне/торможении печатающей головки. В связи с тем, что работа над этими алгоритмами ведется в основном открытыми сообществами, большинство источников,

<sup>1</sup> [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://marlinfw.org/docs/features/lin\\_advance.html](http://marlinfw.org/docs/features/lin_advance.html) (дата обращения: 05.05.2022).

использованных в данном разделе, не относятся к научным работам.

Данный метод контроля получен относительно недавно. Первый алгоритм с открытым исходным кодом, примененный для минимизации описанных дефектов, разработан Мэттом Робертсом (Matt Roberts) в 2019 году и получил название Advance<sup>1</sup>. Позже он был реализован в системе управления Marlin. Алгоритм основан на утверждении, что главная причина неровностей слоя — сжатие нити внутри экструдера, а также падение давления в сопле из-за сил, вызванных ускорением материала. Однако позже Бернард Кубичек (Bernard Kubicek) указал, что на потерю давления в сопле в большей степени влияют силы трения, а не силы, вызванные ускорением. На основе последней идеи разработчики представили новую версию алгоритма JKN-advance для программного обеспечения Sailfish<sup>2</sup>. На базе тех же физических принципов Себастьян Попп (Sebastian Popp) разработал алгоритм для программного обеспечения Marlin. Он называется Linear advance и в настоящее время является наиболее часто используемой версией.

Раскрытие вопроса, связанного с динамикой экструзии в аддитивном производстве, в настоящее время сталкивается с нехваткой научных работ, связанных с FDM-печатью. В работе [2] применено оборудование Stratasys для разработки стратегии управления потоком материала. Отметим, что данная работа заключалась в разработке электронной схемы и основывалась на предположении, что теплопередача, а также характеристики, на которые влияют скорость и температура — основная причина динамики экструзии. Работа [1] содержит математические принципы алгоритма Advance и исследует зависимость между толщиной слоя и производительностью алгоритма.

В России также имеются работы, описывающие проблемы неравномерности экструзии, однако в них причиной эффекта рассматриваются колебания температуры. Например, в [3] приведена динамическая система контроля температуры экструдера, которая позволяет снизить колебания толщины слоя при печати. Однако эффекты недоэкструзии и переэкструзии с точки зрения изменения давления в сопле при изменении скорости печати не рассматриваются. Также имеются материалы от практиков-энтузиастов, которые распространяются через сообщества в социальных сетях и форумах<sup>3</sup>, но они сводятся к описанию эффекта и настройке алгоритма Advance<sup>4</sup>.

На сегодняшний день нет исследований или разработок в области управления динамикой экструзии, направленных на повышение эффективности алгорит-

мов Advance. Кроме того, неопределенность влияния на динамику различных параметров процесса печати приводит к невозможности разработки системы аналитического расчета степени требуемой компенсации. В работе [1] упоминается необходимость получения автоматизированного способа расчета параметра  $K_A$ , а также важность дальнейшего исследования влияния параметров процесса (материала, температуры, геометрии слоя и сопла) на проявление дефектов и влияния динамики экструзии на геометрию изделия.

### Алгоритм контроля динамики экструзии. Принцип работы и недостатки

Рассмотрим принцип работы метода контроля динамики экструзии на примере наиболее распространенного алгоритма Linear advance.

Данные деформации печатного слоя могут вызываться следующими явлениями: перепадом давления в расплавленном пластике внутри сопла, вызванный ускорением материала; отклонением положения колеса, направляющего материал, относительно сопла; деформацией нити между направляющими и соплом; отклонением трубки Боудена, направляющей нить; зависящей от нагрузки фазовой задержки в шаговом двигателе экструдера [2].

В работе [1] дано подробное описание математических основ алгоритма, для получения представления о принципах его работы дадим краткое описание его физического смысла и математическую формулировку.

Предположим, что система экструдер-нить-сопло квазистатическая, поэтому силы, возникающие между направляющей трубкой и нитью, равны силам, вызванным перепадом давления в сопле. Вклад силы трения, возникающей между направляющими и соплом, не учитывается, так как между нитью пластика и стенками направляющей трубки обычно имеется диаметральный зазор до 0,25 мм, при этом последняя, как правило, имеет покрытие с низким коэффициентом трения. В силы, возникающие в сопле, вносят вклад силы трения  $F_f$  и ускорение материала  $F_a$ .

Покажем, что силы, вызванные ускорением, являются преобладающими. Силу трения  $F_f$  получим, используя уравнение Хагена-Пуазейля, если принять течение материала в сопле ламинарным:

$$F_f = \Delta P_f A_{out} = \pi 8 \mu L v_{out}$$

где  $\Delta P_f$  — падение давления в сопле, вызванное силой трения;  $A_{out}$  — поперечное сечение сопла;  $\mu$  — вязкость материала;  $L$  — длина выходного отверстия сопла;  $v_{out}$  — выходная скорость экструзии.

Силы, вызванные ускорением материала  $F_a$ , найдем по закону Бернулли:

$$F_a = \Delta P_a A_{in} = \frac{\rho v_{out}^2 \left(1 - \frac{d_{out}^4}{d_{in}^4}\right)}{8},$$

где  $\Delta P_a$  — падение давления в сопле;  $A_{in}$  — поперечное сечение нити;  $\rho$  — плотность материала;  $d_{out}$  — диаметр отверстия сопла;  $d_{in}$  — диаметр нити пластика.

<sup>1</sup> [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://repar.org/wiki/Mattroberts'\\_Firmware](https://repar.org/wiki/Mattroberts'_Firmware) (дата обращения: 15.05.2022).

<sup>2</sup> [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://web.archive.org/web/20210120142459/http://makerbot.wikidot.com/jetty-firmware> (дата обращения: 28.04.2022).

<sup>3</sup> [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://3dtoday.ru/blogs/nayuch/get-rid-of-the-sag-on-the-corners-or-linear-advance> (дата обращения: 01.06.2022).

<sup>4</sup> [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://3dgram.ru/nastrojka-linear-advance/?utm\\_referrer=https%3A%2F%2Fwww.google.com%2F](https://3dgram.ru/nastrojka-linear-advance/?utm_referrer=https%3A%2F%2Fwww.google.com%2F) (дата обращения: 01.06.2022).

В ранней версии алгоритма предполагалось, что перепад давления по закону Бернулли является доминирующим. Однако было показано, что силы трения на четыре порядка выше, чем силы ускорения. Для иллюстрации данного утверждения рассчитаем значения сил ускорения и трения для двух пластиков, широко используемых в FDM-печати: полилактида (PLA), имеющего плотность  $1250 \text{ кг/м}^3$  и вязкость  $200\text{--}1000 \text{ Па}\cdot\text{с}$  при  $190\text{--}220 \text{ }^\circ\text{C}$ , и ABS-пластика с плотностью  $1080 \text{ кг/м}^3$  и вязкостью  $2000\text{--}4000 \text{ Па}\cdot\text{с}$  при  $220\text{--}240 \text{ }^\circ\text{C}$ . Для PLA вклад сил ускорения  $F_a = 1,50 \cdot 10^{-5} \text{ Н}$ , а вклад сил трения  $F_f = 0,3\text{--}1,5 \text{ Н}$ . Для ABS значения составляют  $1,29 \cdot 10^{-5} \text{ Н}$  и  $3\text{--}6 \text{ Н}$  соответственно.

В результате получим, что зависимость между скоростью и силами, действующими на сопло, считается линейной [1]. Зависимость между скоростью и сжатием нити связана с постоянной  $K$  или фактором запаздывания соотношением:

$$\Delta l = K \frac{Q_{out}}{A_{in}}, \quad (1)$$

где  $Q_{out}$  — выходной объемный расход материала;  $\Delta l$  — величина сжатия нити.

Соотношение между скоростью рабочего органа и экструзии определяется программой деления трехмерной модели на слои (слайсером) на основе геометрии нити, чье поперечное сечение предполагается прямоугольным с полукруглыми концами [4]. Уже имеются работы по микрогеометрии изделий, полученных FDM-печатью, где определяется связь параметров процесса и шероховатости поверхности, например модель эллиптических поперечных сечений [5], основанные на экспериментальных наблюдениях.

Для ускорения и торможения уравнение (1) может быть выражено как:

$$\frac{d}{dt} \Delta l = K \frac{d}{dt} \frac{Q_{out}}{A_{in}}, \quad \frac{Q_{in} - Q_{out}}{A_{in}} = K \frac{\dot{Q}_{out}}{A_{in}}, \quad (2)$$

$$v_{in} = K \frac{\dot{Q}_{out}}{A_{in}} + \frac{Q_{out}}{A_{in}},$$

где  $v_{in}$  — входная скорость экструзии;  $Q_{in}$  — входной объемный расход материала;  $\dot{Q}_{out}$  — производная по времени выходного объемного расхода материала;  $t$  — время;  $\Delta l$  — производная сжатия нити по времени.

С другой стороны, в алгоритме Advance входная скорость  $v_{in}$  корректируется как:

$$v_{in} = K_A \dot{v}_{in}^0 + v_{in}^0, \quad (3)$$

где  $v_{in}^0$  — требуемая скорость экструзии (задается в коде управляющей программы);  $K_A$  — параметр компенсации;  $\dot{v}_{in}^0$  — производная требуемой скорости экструзии по времени. Величина определяется экспериментально [1].

В результате из уравнений (2) и (3) получим:

$$\frac{Q_{out}}{A_{in}} = v_{in}^0 + K_A \frac{\dot{Q}_{out}}{A_{in}} - K \frac{\dot{Q}_{out}}{A_{in}}. \quad (4)$$

При условии  $K = K_A$  выражение (4) примет вид  $Q_{out}/A_{in} = v_{in}^0$ , что требуется для корректной толщины слоя. Так как на перепад давления влияет множество

факторов, FDM-принтер необходимо настраивать индивидуально для каждого типа машины, материала и параметров печати, чтобы алгоритм Advance работал корректно [1].

Несмотря на то, что данный алгоритм способен эффективно стабилизировать давление, он имеет серьезные недостатки, которые можно разделить на две группы.

Первая группа связана с управляющим параметром компенсации  $K_A$ . Поскольку его значение зависит от большого количества характеристик сопла, материала и слоя, и может быть найдено только эмпирически, то при любом изменении условий печати его необходимо определять заново, что требует больших затрат времени и материалов. Также из-за отсутствия исследований в этой области сохраняется неопределенность того, как влияют характеристики процесса, такие как высота слоя, материал и геометрия сопла на проявление динамики экструзии и на работу алгоритма [1].

Вторая группа относится к проблеме инерционности алгоритма. При калибровке скорости экструзии имеет место задержка между началом проявления дефекта и его компенсацией, что приводит к остаточной неравномерности полученного слоя. Чтобы получить слой без остаточных дефектов, компенсацию необходимо инициировать раньше, за несколько шагов до изменения скорости печатающей головки. Однако для этого потребуются изменения в алгоритме, которые бы позволили прогнозировать изменение давления в сопле во время печати. Эта проблема также отрицательно сказывается на производительности: чтобы уменьшить проявление инерционности, снижается средняя скорость печати, а значит, растет время печати. Еще одно следствие инерционности связано с режимами печати. В FDM-печати есть два режима — печать оболочки и заполнения, и алгоритмы Advance обычно применяются только к оболочке, чтобы свести к минимуму увеличение времени печати. Однако стабилизация давления при печати заполнения также важна для улучшения качества получаемых деталей.

Таким образом, у применяемых для стабилизации давления алгоритмов Advance имеется ряд недостатков, которые приводят к снижению скорости и качества печати. Настоящая работа направлена на их модификацию с целью исправления данных недостатков.

### Исследование влияния параметров печати на динамику экструзии

Проведем серию экспериментов, с целью исследования зависимости динамики экструзии от параметров материала и процесса печати. Опишем ход и результаты экспериментов.

**Методика проведения экспериментов.** Определим параметры печати, которые могут влиять на динамику экструзии. Рассмотрим: вид материала; температуру печати,  $T$ ; температуру стола,  $T_s$ ; диаметр сопла (физический),  $D_{ph}$ ; диаметр сопла (параметры),  $D_s$ ; толщину слоя,  $h$ .

Выберем три наиболее широко применяемые в FDM-печати материала: ABS (акрилонитрилбутадиенстирол),

PLA (полилактид) и PETG (полиэтилентерефталат-гликоль). ABS-пластик не подвержен быстрому разложению, как это происходит с PLA, выдерживает большие ударные нагрузки и обладает большей термостойкостью [6]. С другой стороны, в отличие от PLA он требует нагрева подложки, а также с трудом подвергается механической обработке [7]. PETG сочетает в себе прочность и долговечность ABS и нетоксичность PLA, однако имеет низкую термостойкость и затрудненность постобработки, что не позволяет выделить его как однозначно оптимальный материал [8]. Так как FDM-печать в работе рассмотрена как способ изготовления прототипов и готовых изделий, а также для получения большего количества данных, выполним эксперименты для всех трех видов пластика. Выбраны материалы со стандартным составом. Состав ABS-пластика — акрилонитрил (25 %), бутадиен (25 %) и стирол (50 %). PLA-пластик основан на синтезе растительного сырья с применением крахмала. PETG-пластик — продукт поликонденсации этиленгликоля с терефталевой кислотой. Единственным примесным элементом является краситель.

Для каждого из материалов выделим следующие диапазоны температур печати  $T$ :  $T_{ABS} = 230\text{--}260$  °C;  $T_{PLA} = 200\text{--}230$  °C;  $T_{PETG} = 220\text{--}260$  °C. Изменение температуры печати происходит с шагом  $\Delta T = 2,5$  °C. Так как температура подложки  $T_t$  основное влияние оказывает только на адгезию первого слоя к ее поверхности, поэтому  $T_t$  постоянна: 110 °C для ABS, 60 °C для PLA, 85 °C для PETG. Выбран стандартный физический диаметр сопла  $D_{ph} = 0,4$  мм (сопло E3D) как наиболее широко применяемый. Параметр диаметра сопла, определяемый в настройках прошивки, — от 0,4 до 0,6 мм. Толщина слоя расположена в пределах от 0,1 до 0,4 мм.

Для каждого из материалов проведена серия экспериментов по выявлению влияния значений параметров (табл. 1), на динамику экструзии.

Для оценки степени проявления динамики экструзии в экспериментах применим алгоритм Linear advance, который определяет оптимальное значение параметра компенсации  $K_A$  для конкретных условий печати. Чем больше его значение, тем большая компенсация требуется для сохранения равномерности слоя, а значит, тем большая динамика экструзии наблюдается. В экспериментах применен настольный трехмерный принтер Creality Ender3 с экструдером Bowden и платой управления SKR E3 mini V2.0.

Для каждого сочетания выбранных параметров проведем экспериментальную печать тестовой траектории,

сгенерированной на основе стандартного шаблона из документации Marlin (рис. 2, а): разгон с низкой скорости до высокой и обратно при различных значениях  $K_A$ . Схема содержит отдельные отрезки, где каждая линия состоит из участка с низкой скоростью  $V_l = 20$  мм/с, ускорением  $A = 1000$  мм/с<sup>2</sup> до скорости  $V_h = 80$  мм/с и торможением  $D = -1000$  мм/с<sup>2</sup> до  $V_l$ . Низкоскоростные участки имеют длину 30 мм, а ускорение/торможение вместе с высокоскоростным участком — 40 мм. С каждой строкой значение  $K_A$  увеличивается. Испытания проведены нанесением материала на подложку. По результатам каждого теста определено оптимальное значение  $K_A$  на основе визуальной оценки полученных линий.

**Результаты экспериментов.** На рис. 2, б показан пример печати тестовой траектории для материала PLA при температуре 215 °C и толщине слоя 0,4 мм. Среди напечатанных отрезков выбрана наиболее ровная на основе визуальной оценки, в данном случае  $K_A = 0,55$ .

На рис. 3 представлен график зависимости параметра  $K_A$  от используемого материала для различных толщин слоя при диаметре сопла 0,4 мм и температуре 230 °C. Значения для разных материалов существенно отличаются, что связано с различием их физических свойств. Пластик PETG потребовал наибольшей компенсации. Это может быть вызвано его высокой гибкостью и низким показателем трения, что затрудняет ретракт и оперативное изменение скорости вывода материала из сопла.

Выполним анализ влияния типа экструдера на динамику экструзии. При сравнении результатов экспериментов в работе [1] видно, что при печати с экструдером Боудена динамика проявляется больше. В табл. 2 приведены значения параметра для экструдера Боудена (значения получены в настоящей работе) и экструдера прямого типа (из [1]) для PLA пластика при температуре  $T = 215$  °C. Диаметр сопла в обоих случаях равен 0,4 мм. Параметры скорости и ускорения также одинаковы. Полученные значения параметра  $K_A$  отличаются на порядок. Этот факт можно объяснить большей длиной пути нити пластика от направляющего колеса к нагревательному элементу при печати с экструдером Боудена, что влечет за собой большее проявление динамики экструзии.

На рис. 4 представлены графики, демонстрирующие влияние температуры печати  $T$  на динамику экструзии для трех рассматриваемых материалов. Видно, что уве-

Таблица 1. Характеристики печати, выбранные для экспериментов

Table 1. Print parameters selected for experiments

Название параметра	Значения параметров		
	ABS	PLA	PETG
Температура печати $T$ (при $\Delta T = 2,5$ ), °C	230–260	200–230	220–260
Температура подложки $T_t$ , °C	110	60	85
Диаметр сопла (физический) $D_{ph}$ , мм	0,4		
Диаметр сопла (настроечный) $D_s$ , мм	0,4; 0,5; 0,6		
Толщина слоя $h$ , мм	0,1; 0,2; 0,25; 0,3; 0,4		

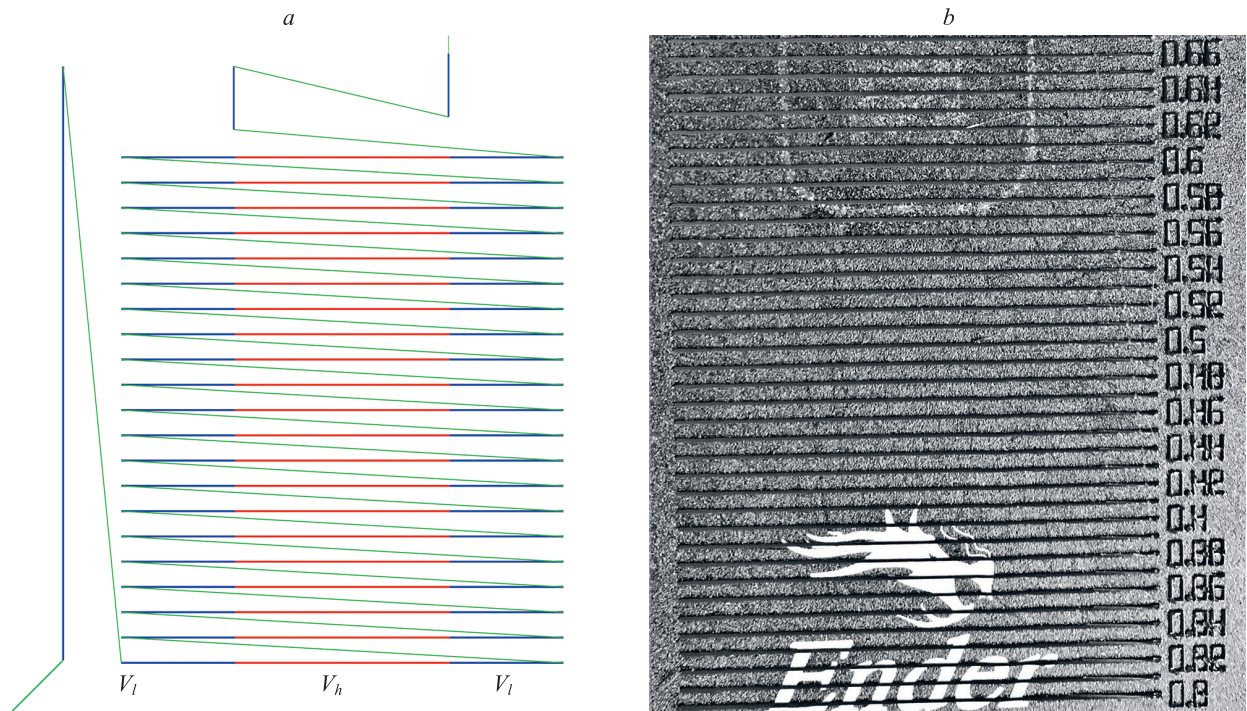


Рис. 2. Схема эксперимента (a) и пример напечатанной траектории (b). Размер участка тестовой траектории 120 × 220 мм; цифры на изображении соответствуют значениям параметра  $K_A$

Fig. 2. Experimental pattern (a) and example of a printed trajectory (b). The size of the test trajectory area is 120 × 220 mm; the numbers in the image correspond to the values of the  $K_A$  parameter

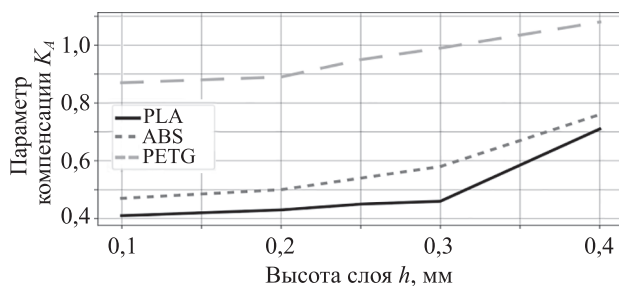


Рис. 3. График зависимости степени проявления динамики экструзии от высоты слоя  $h$

Fig. 3. Dependence of extrusion dynamics vs. the layer height  $h$

личение температуры приводит к снижению значения  $K_A$ . Тенденция сохраняется для всех высот слоя и видов материала. Это может быть вызвано тем, что материал становится менее вязким при повышении температуры, что уменьшает перепад давления из-за его более высокой текучести. В то же время улучшенная текучесть

Таблица 2. Сравнение значений  $K_A$  для разных типов экструдеров

Table 2. Comparison of  $K_A$  values for different extruder types

Толщина слоя $h$ , мм	Параметр компенсации $K_A$	
	Экструдер Бюдена	Экструдер прямого типа
0,3	0,59	0,045
0,2	0,63	0,060
0,1	0,90	0,090

материала снижает сопротивление экструзии при транспортировке расплавленной нити через канал сопла, что, в свою очередь, облегчает процесс ретракта и корректировки скорости подачи. Также из графиков рис. 4 видна зависимость параметра  $K_A$  от толщины слоя  $h$ . Наблюдается тенденция к росту  $K_A$  при уменьшении  $h$  для всех материалов. Особенно заметное проявление динамики наблюдается у минимальной толщины слоя 0,1 мм, которое можно объяснить тем, что при выкладке слоя на подложке существует контакт между соплом и расплавом как внутри, так и снаружи. Это приводит к разнице в перепаде давления по высоте слоя. Точно разницу определить затруднительно из-за сложной картины потока с комбинированными открытыми, подвижными и стационарными границами. Предположим, что чем меньше высота слоя, тем больше перепад давления и тем большая компенсация требуется, что согласуется с данными в [1].

Проведем аналогичные эксперименты для разных значений настроечного диаметра сопла  $D_s$ . Данная характеристика изменяет ширину слоя. Тесты выполнены для высоты слоя 0,4 мм и всего рассматриваемого диапазона температур для каждого из трех материалов. Пример полученного графика для ABS-пластика представлен на рис. 5. Наблюдается снижение степени проявления динамики экструзии при увеличении диаметра сопла, что может быть вызвано меньшим перепадом давления по ширине слоя.

Результаты исследования влияния параметров печати на динамику экструзии показали, что каждая рассмотренная характеристика оказывает существенное влияние на динамику печати.

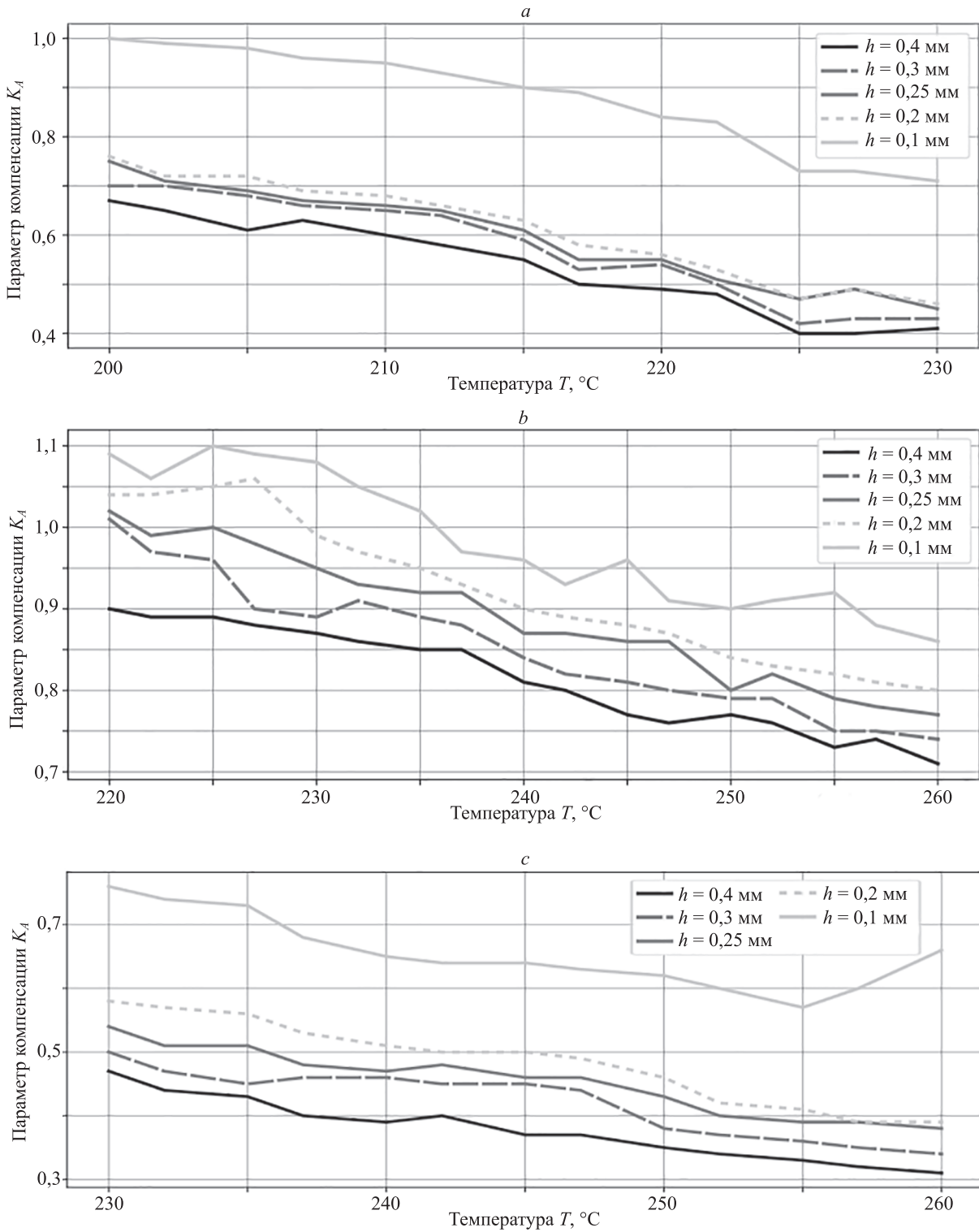


Рис. 4. Зависимости параметра  $K_A$  от температуры  $T$  для пластиков: PLA (a), PETG (b), ABS (c) для различных толщин слоя,  $h$   
 Fig. 4. Dependence of parameter  $K_A$  vs. temperature  $T$  for PLA (a), PETG (b), ABS (c) and different layer heights  $h$

**Предлагаемая оптимизация алгоритма**

Приведем обоснование предлагаемой модификации алгоритма контроля экструзии.

Для повышения эффективности алгоритмов Advance необходимо: определить зависимости параметра компенсации от характеристик печати; разработать алго-

ритм расчета оптимального параметра компенсации; минимизировать запаздывание компенсации во избежание появления остаточных дефектов слоя, а также для увеличения средней скорости печати.

Первая задача решена путем проведения экспериментов. А в качестве решения второй и третьей проблем предложена оптимизация алгоритма Advance на



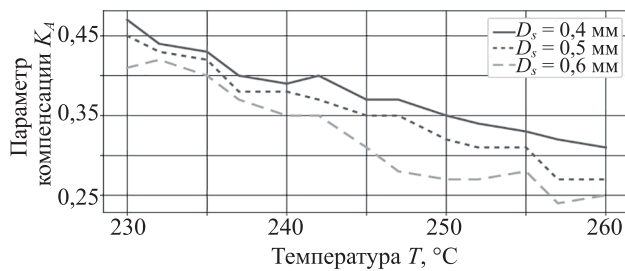


Рис. 5. Зависимость параметра компенсации  $K_A$  от настроечного диаметра сопла  $D_s$

Fig. 5. Dependence of parameter  $K_A$  vs. nozzle diameter  $D_s$

основе обученных нейронных сетей. Машинное обучение в настоящее время применяется в аддитивном производстве от оптимизации дизайна установки до контроля качества продукции [9] и оптимизации процесса печати [10]. Поскольку области его применения определяются разнообразием и объемом данных, высокая размерность данных аддитивного производства делает их подходящими для таких алгоритмов, как методы обучения с учителем, например, нейронные сети [11].

Инерционность компенсации давления предложено снизить с помощью алгоритма прогнозирования изменения направления движения экструдера. В системе с ЧПУ знание о последующих перемещениях рабочего органа ограничено конечным размером кадрового буфера. Часто по ходу анализа траектории возникает ситуация, когда буфер наполняется короткими кадрами, не дающими полной информации о дальнейшем движении. Потому напрямую информацию о последующем повороте получить нельзя. Необходимо обучить модель, которая будет предсказывать изменения направления движения вне зависимости от заполненности кадрового буфера. За несколько шагов до поворота или криволинейного участка будет передаваться сигнал к модулю управления экструзией, инициирующий корректировку скорости подачи материала несколько раньше, выравнивая слой. Таким образом, можно минимизировать инерцию алгоритма и повысить скорость печати.

Выполним аналитический расчет параметра  $K_A$ , для этого используем алгоритм на основе нейронной сети, предсказывающей искомое значение. Так можно избежать необходимости экспериментального определения параметра, что сэкономит время и ресурсы. Кроме того, вместо использования аппроксимации, полученной на основе экспериментов, параметр может быть найден с большей точностью.

Схема предлагаемого алгоритма вместе с этапами анализа траектории в ЧПУ представлена на рис. 6. Модель ЧПУ основана на системе Smoothware<sup>1</sup>. После интерпретатора команды G-кода преобразуются в отрезки траектории и передаются в блоки «Анализ движения» и «Контроль скорости» [12]. В блоке «Анализ движения» к данным применяется разрабо-

танный алгоритм, содержащий модель прогноза изменения направления движения (модель 1). В случае, если кадровый буфер оказывается заполнен короткими участками, не предоставляющими полную картину о последующем перемещении рабочего органа, модель будет анализировать вероятность поворота, который повлечет за собой изменение скорости.

Затем данные передаются в модуль «Интерполяция» и «Управление экструдером», где рассчитывается скорость экструзии [13]. Если было спрогнозировано изменение направления движения рабочего органа, то применяется модель прогнозирования параметра  $K_A$  (модель 2). Наконец, инициируется алгоритм Advance, который на основе полученного параметра начнет процесс стабилизации давления раньше, и снижение скорости печати не потребуется.

Проблемой разработки является отсутствие доступных наборов данных для обучения моделей. Для обеих моделей обучающие данные необходимо получать вручную.

Задача получения данных для прогноза движения может быть решена относительно просто. Так как экструдер совершает большое количество движений при печати, то даже печати небольшого количества деталей будет достаточно для получения достаточного количества данных при различных видах движения (повороты, линейное и криволинейное движение). Так как в системе ЧПУ траектория проходит несколько этапов анализа, где данные логически группируются, ее удобно использовать для обучения модели.

Поскольку задача состоит в прогнозировании динамических параметров движения, в дополнение к статическим данным, полученным из системы ЧПУ, решено также учитывать показания от внешнего датчика (акселерометра).

В случае прогнозирования параметра компенсации проблема отсутствия доступных наборов данных сочетается с зависимостью этого параметра от большого количества характеристик процесса. Для обучения данной модели были применены результаты экспериментов, описанных в разделе «Исследование влияния параметров печати на динамику экструзии».

**Инструменты разработки.** Разработка алгоритма осуществлена на языке программирования Python 3.5. Для работы с нейронными сетями выбрана библиотека машинного обучения Tensorflow 2.6.0 в силу богатой функциональности. Данные для обучения нейронной сети получены и размечены вручную по результатам проведенных экспериментов. Данные для обучения и тестирования сформированы и опубликованы на портале Kaggle<sup>2</sup>. Выбрана нейросетевая регрессия, так как она позволяет получить действительное число.

**Текущие результаты.** На данном этапе работы получена модель нейронной сети расчета параметра компенсации на основе данных, полученных из экспериментов.

<sup>1</sup> [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://smoothware.org/> (дата обращения: 05.05.2022).

<sup>2</sup> [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.kaggle.com/kseniiazimenko/fdm-linearadvance> (дата обращения: 14.05.2022).

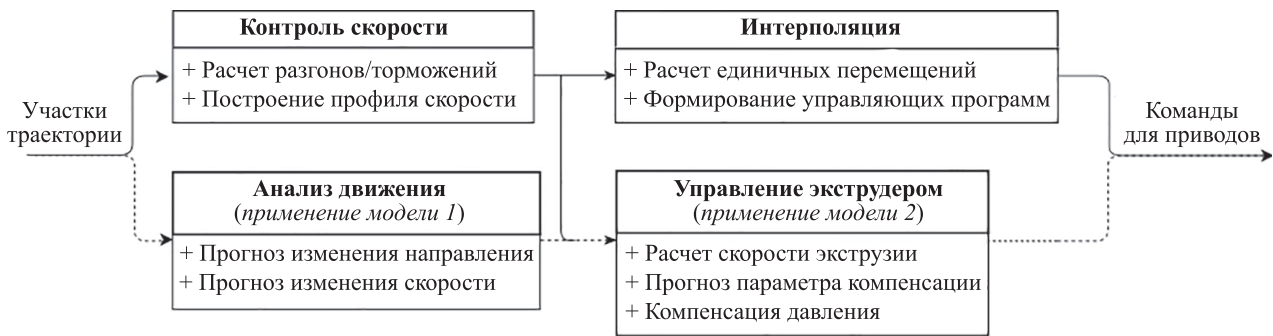


Рис. 6. Этапы формирования траектории в системе с числовым программным обеспечением с предложенным алгоритмом

Fig. 6. Stages of trajectory generation in a numerical control system with the proposed algorithm

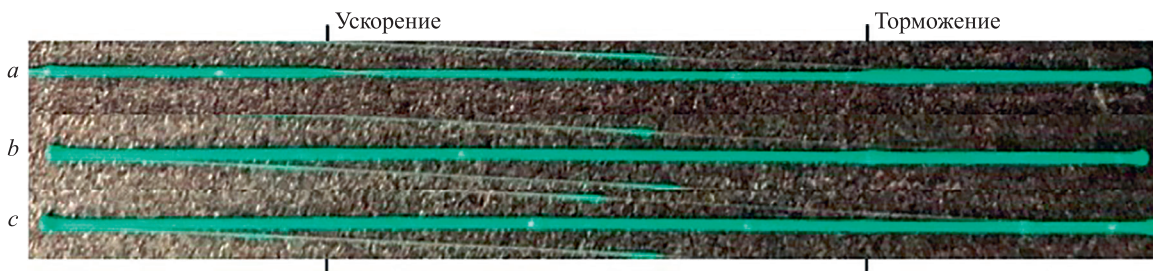


Рис. 7. Пример печати: без компенсации динамики экструзии (a); с компенсацией на основе ручной калибровки (b) и при калибровке нейронной сетью (c). Размер участка тестовой траектории  $100 \times 30$  мм

Fig. 7. Printing example: without compensation of extrusion dynamics (a); with compensation based on manual calibration (b); and with neural network calibration (c). The size of the test trajectory section is  $100 \times 30$  mm

Сеть состоит из трех слоев. К слоям 1 и 2 применена функция активации *relu*, к слою 3 – сигмоида с одним линейным нейроном для получения действительного числа. Данные приведены к диапазону от 0 до 1. Для выходного значения использована обратная процедура. И обучающая, и проверочная выборки нормированы статистикой на основе обучающей выборки, что позволило выявить ошибки тестовой выборки<sup>1</sup>.

Результаты обучения показали отклонения в пределах 0,015 в тестовой выборке. Полученная сеть внедрена в алгоритм *Linear Advance* и протестирована. Напечатаны отрезки материала с и без применения обученной модели, состоящие из разгона до высокой скорости и торможения до низкой скорости. В эксперименте использован ABS-пластик с параметрами печати  $h = 0,35$  мм,  $T = 212$  °С,  $D_s = 0,4$  мм. В результате стабилизация формы слоя по спрогнозированному значению параметра  $K_A$ , показанная на рис. 7, c, не уступает стабилизации на основе параметра, определенно экспериментально (рис. 7, b). Более того, на этапе торможения спрогнозированное значение параметра позволило точнее выровнять слой и минимизировать остаточные дефекты.

Полученная модель нейронной сети может быть применена с алгоритмом *Advance* для стабилизации давления в сопле как перед началом печати с записью результата в управляющую программу, так и в режиме реального времени.

В дальнейшем планируется обучить модель для работы с другими физическими диаметрами сопла. Также необходимо собрать наборы данных и обучить модель для прогнозирования изменения направления движения печатной головки.

### Заключение

Рассмотрена проблема нежелательной динамики экструзии при FDM-печати. Проанализированы алгоритмы, которые применяются для решения этой проблемы, выделены их недостатки. Основные проблемы алгоритмов — инерционность и необходимость снижения скорости печати, а также ручная калибровка.

Проведено исследование влияния типа материала и экструдера, толщины слоя и температуры печати на проявление нежелательной динамики. Полученные экспериментальные результаты углубляют понимание влияния динамики экструзии при FDM-печати и открывают возможности для оптимизации существующих алгоритмов ее управления. Планируется в дальнейшем исследовать влияние величины потока, других физических диаметров и длин выходного отверстия сопла на динамику экструзии.

Предложена модификация алгоритма *Advance* на основе машинного обучения. Рассмотренное решение позволяет повысить качество получаемого слоя и скорость печати, а также избежать необходимости ручной калибровки. Выполнено обучение модели нейронной сети, определяющей величину компенсации в зависимости от параметров печати, которую раньше можно было определить только вручную. Эксперименты по-

<sup>1</sup> [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.tensorflow.org/tutorials/keras/regression> (дата обращения: 08.05.2022).

казали, что разработанная модель способна успешно прогнозировать требуемую величину компенсации и может быть применена во время процесса печати.

В дальнейшем планируется обучить нейросеть для работы с другими типами материалов (в том числе с гибкими и керамическими) и параметрами печати, а также получить модель для прогнозирования изменения направления движения экструдера.

Предложенная модификация алгоритма Advance способствует автоматизации процесса компенсации

динамики и расширяет возможности применения FDM-принтеров в промышленных условиях. Полученный алгоритм может повысить точность и скорость печати, что впоследствии увеличит конкурентоспособность малых проектных предприятий России, использующих трехмерные принтеры. Работа расширила возможности быстрого прототипирования и создания опытных партий.

## Литература

1. Tronvoll S., Popp S., Elverum C., Welo T. Investigating pressure advance algorithms for filament-based melt extrusion additive manufacturing: theory, practice and simulations // *Rapid Prototyping Journal*. 2019. V. 25. N 5. P. 830–839. <https://doi.org/10.1108/RPJ-10-2018-0275>
2. Bellini A., Güçeri S., Bertoldi M. Liquefier dynamics in fused deposition // *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2004. V. 126. N 2. P. 237–246. <https://doi.org/10.1115/1.1688377>
3. Осколков А.А., Матвеев Е.В., Безукладников И.И., Трушников Д.Н., Кротова Е.Л. Передовые технологии аддитивного производства металлических изделий // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. 2018. Т. 20. № 3. С. 90–104. <https://doi.org/10.15593/2224-9877/2018.3.11>
4. Ahn D., Kweon J.-H., Kwon S., Song J., Lee S. Representation of surface roughness in fused deposition modeling // *Journal of Materials Processing Technology*. 2009. V. 209. N 15-16. P. 5593–5600. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2009.05.016>
5. Pandey P.M., Reddy V.N., Dhande S.G. Improvement of surface finish by staircase machining in fused deposition modeling // *Journal of Materials Processing Technology*. 2003. V. 132. N 1-3. P. 323–331. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00953-6](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00953-6)
6. Aourik O., Othmani M., Saadouki B., Abouzaid Kh., Chouaf A. Fracture toughness of ABS additively manufactured by FDM process // *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. 2021. V. 109. N 2. P. 49–58. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0015.6258>
7. Beniak J., Šooš L., Križan P., Matúš M., Ruprich V. Resistance and strength of conductive PLA processed by FDM additive manufacturing // *Polymers*. 2022. V. 14. N 4. P. 678. <https://doi.org/10.3390/polym14040678>
8. Srinivasan R., Prathap P., Raj A., Kannan A.S., Deepak V. Influence of fused deposition modeling process parameters on the mechanical properties of PETG parts // *Materials Today: Proceedings*. 2020. V. 27. N 2. P. 1877–1883. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.809>
9. Meng L., McWilliams B., Jarosinski W., Park H.-Y., Jung Y.-G., Lee J., Zhang J. Machine learning in additive manufacturing: A review // *JOM: The journal of the Minerals, Metals & Materials Society*. 2019. V. 72. N 6. P. 2363–2377. <https://doi.org/10.1007/s11837-020-04155-y>
10. Pérez M., Carou D., Rubio E.M., Teti R. Current advances in additive manufacturing // *Procedia CIRP*. 2020. V. 88. P. 439–444. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.05.076>
11. Razvi S.S., Feng S., Narayanan A., Lee Y.-T., Witherell P. A review of machine learning applications in additive manufacturing // *Proc. of the ASME International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, (IDETC-CIE)*. 2019. P. 1–10. <https://doi.org/10.1115/DETC2019-98415>
12. Suh S.-H., Kang S.-K., Chung D.-H., Stroud I. *Theory and Design of CNC Systems*. Springer London, 2008. 455 p. (Springer Series in Advanced Manufacturing). <https://doi.org/10.1007/978-1-84800-336-1>
13. Smid P. *CNC Programming Handbook: A Comprehensive Guide to Practical CNC Programming*. NY: Industrial Press Inc., 2003. 508 p.

## References

1. Tronvoll S., Popp S., Elverum C., Welo T. Investigating pressure advance algorithms for filament-based melt extrusion additive manufacturing: theory, practice and simulations. *Rapid Prototyping Journal*, 2019, vol. 25, no. 5, pp. 830–839. <https://doi.org/10.1108/RPJ-10-2018-0275>
2. Bellini A., Güçeri S., Bertoldi M. Liquefier dynamics in fused deposition. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2004, vol. 126, no. 2, pp. 237–246. <https://doi.org/10.1115/1.1688377>
3. Oskolkov A.A., Matveev E.V., Bezukladnikov I.I., Trushnikov D.N., Krotova E.L. Advanced technologies for additive manufacturing of metal product. *Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*, 2018, vol. 20, no. 3, pp. 90–105. (in Russian). <https://doi.org/10.15593/2224-9877/2018.3.11>
4. Ahn D., Kweon J.-H., Kwon S., Song J., Lee S. Representation of surface roughness in fused deposition modeling. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, vol. 209, no. 15-16, pp. 5593–5600. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2009.05.016>
5. Pandey P.M., Reddy V.N., Dhande S.G. Improvement of surface finish by staircase machining in fused deposition modeling. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, vol. 132, no. 1-3, pp. 323–331. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00953-6](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00953-6)
6. Aourik O., Othmani M., Saadouki B., Abouzaid Kh., Chouaf A. Fracture toughness of ABS additively manufactured by FDM process. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 2021, vol. 109, no. 2, pp. 49–58. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0015.6258>
7. Beniak J., Šooš L., Križan P., Matúš M., Ruprich V. Resistance and strength of conductive PLA processed by FDM additive manufacturing. *Polymers*, 2022, vol. 14, no. 4, pp. 678. <https://doi.org/10.3390/polym14040678>
8. Srinivasan R., Prathap P., Raj A., Kannan A.S., Deepak V. Influence of fused deposition modeling process parameters on the mechanical properties of PETG parts. *Materials Today: Proceedings*, 2020, vol. 27, no. 2, pp. 1877–1883. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.809>
9. Meng L., McWilliams B., Jarosinski W., Park H.-Y., Jung Y.-G., Lee J., Zhang J. Machine learning in additive manufacturing: A review. *JOM: The journal of the Minerals, Metals & Materials Society*, 2019, vol. 72, no. 6, pp. 2363–2377. <https://doi.org/10.1007/s11837-020-04155-y>
10. Pérez M., Carou D., Rubio E.M., Teti R. Current advances in additive manufacturing. *Procedia CIRP*, 2020, vol. 88, pp. 439–444. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.05.076>
11. Razvi S.S., Feng S., Narayanan A., Lee Y.-T., Witherell P. A review of machine learning applications in additive manufacturing. *Proc. of the ASME International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, (IDETC-CIE)*, 2019, pp. 1–10. <https://doi.org/10.1115/DETC2019-98415>
12. Suh S.-H., Kang S.-K., Chung D.-H., Stroud I. *Theory and Design of CNC Systems*. Springer London, 2008, 508 p. Springer Series in Advanced Manufacturing. <https://doi.org/10.1007/978-1-84800-336-1>
13. Smid P. *CNC Programming Handbook: A Comprehensive Guide to Practical CNC Programming*. NY, Industrial Press Inc., 2003, 508 p.

**Авторы**

**Зименко Ксения Владимировна** — инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-3792-136X>, [zksenia@yahoo.com](mailto:zksenia@yahoo.com)

**Афанасьев Максим Яковлевич** — кандидат технических наук, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 57194081345, https://orcid.org/0000-0003-4061-1407](https://orcid.org/0000-0003-4061-1407), [amax@niuitmo.ru](mailto:amax@niuitmo.ru)

**Колесников Михаил Владимирович** — инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 57214971026, https://orcid.org/0000-0003-1559-1766](https://orcid.org/0000-0003-1559-1766), [kmv@itmo.ru](mailto:kmv@itmo.ru)

**Authors**

**Ksenia V. Zimenko** — Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-3792-136X>, [zksenia@yahoo.com](mailto:zksenia@yahoo.com)

**Maxim Ya. Afanasev** — PhD, Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 57194081345, https://orcid.org/0000-0003-4061-1407](https://orcid.org/0000-0003-4061-1407), [amax@niuitmo.ru](mailto:amax@niuitmo.ru)

**Mikhail V. Kolesnikov** — Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 57214971026, https://orcid.org/0000-0003-1559-1766](https://orcid.org/0000-0003-1559-1766), [kmv@itmo.ru](mailto:kmv@itmo.ru)

*Статья поступила в редакцию 09.06.2022*  
*Одобрена после рецензирования 19.08.2022*  
*Принята к печати 23.09.2022*

*Received 09.06.2022*  
*Approved after reviewing 19.08.2022*  
*Accepted 23.09.2022*



Работа доступна по лицензии  
Creative Commons  
«Attribution-NonCommercial»