

**МЕТОД КАЛИБРОВКИ ЭКСТРУДЕРА ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ПРОЦЕССА 3D-ПЕЧАТИ
ВЯЗКИМИ «ЧЕРНИЛАМИ» НА ОСНОВЕ БИОПОЛИМЕРОВ**

Сулханов Я.Д., Абрамов А.А., Меньшутина Н.В.

Сулханов Ян Дмитриевич, Абрамов Андрей Александрович, Меньшутина Наталья Васильевна
Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева,
г. Москва, Россия. 123580, Московская область, г. Москва, ул. Героев Панфиловцев, 20.
E-mail: chemcom@muctr.ru.

Аддитивные технологии являются одним из перспективных подходов к формированию изделий со сложной геометрией и заданными функциональными свойствами. Среди широкого разнообразия технологий аддитивного производства процессы на основе экструзии вязких «чернил» привлекают все большее внимание исследователей. В данной работе рассматриваются процессы экструзии вязких «чернил» на основе биополимеров для реализации 3D-печати. Продемонстрирована необходимость калибровки экструдера под конкретный вид используемых «чернил» с целью обеспечения точности дозирования материалов при реализации 3D-печати. Проведены экспериментальные исследования процессов экструзии материалов с различными реологическими свойствами. Показаны возможности предложенного метода калибровки для повышения качества процесса печати на примере вязких «чернил» на основе частичного сшитого альгината натрия с вязкостью 1053 Па·с.

Ключевые слова: аддитивные технологии, 3D-печать, прямая гелевая печать, экструзия биополимеров, поршневая подача материала, калибровка оборудования

**A METHOD FOR CALIBRATION OF AN EXTRUDER FOR 3D PRINTING WITH VISCOUS "INK"
BASED ON BIOPOLYMERS**

Sulkhanov Ya.D., Abramov A.A., Menshutina N.V.

Sulkhanov Yan Dmitrievich, Abramov Andrey Aleksandrovich, Menshutina Natalia Vasilievna
Russian University of Chemical Technology DI. Mendeleev,
Moscow, Russia. 123580, Moscow region, Moscow, st. Geroev Panfilovtsev, 20.
E-mail: chemcom@muctr.ru.

Additive manufacturing is regarded as a promising approach for producing components with complex geometries and tailored functional properties. Among the wide range of additive manufacturing technologies, extrusion-based processes employing viscous inks are attracting increasing attention from researchers. This study examines the extrusion behavior of viscous biopolymer-based inks used for implementing 3D printing. The necessity of calibrating the extruder for a specific type of ink to ensure accurate material dosing during printing is demonstrated. Experimental investigations were carried out using materials with differing rheological properties. The results highlight the capability of the proposed calibration method to enhance printing quality, as illustrated by the case of a partially crosslinked sodium alginate ink with a viscosity of 1053 Pa·s.

Keywords: additive manufacturing, 3D printing, direct ink writing, biopolymer extrusion, piston-driven material feeding, equipment calibration

Для цитирования:

Сулханов Я.Д., Абрамов А.А., Меньшутина Н.В. Метод калибровки экструдера для проведения процесса 3D-печати вязкими «чернилами» на основе биополимеров. *Современные наукоёмкие технологии. Региональное приложение*. 2026. № 1. С.165-173 DOI: 10.6060/snt.20268501.00020

For citation:

Sulkhanov Ya.D., Abramov A.A., Menshutina N.V. Method of extruder calibration for 3D printing with viscous "ink" based on biopolymers. *Modern high technology. Regional application*. 2026. N 1. P. 165-173 DOI: 10.6060/snt.20268501.00020

ВВЕДЕНИЕ

На данный момент существует потребность в совершенствовании и внедрении новых технологий получения изделий с целью повышения их эксплуатационных характеристик и адаптации к специфичным требованиям. Для достижения этого все большее внимание уделяется процессам аддитивного производства или 3D-печати. Среди широкого разнообразия технологий аддитивного производства, большое внимание привлекает процесс прямой гелевой печати, при котором происходит экструзия вязкого материала на рабочую платформу. Формирование устойчивой геометрии изделия происходит за счёт наличия у материала особых реологических свойств, которые обеспечивают стабильность структуры [1]. Материалы для прямой гелевой печати, или "чернила", должны обладать достаточной вязкостью для сохранения заданной формы после нанесения, а также снижать вязкость при воздействии напряжения [2, 3]. В настоящий момент, применение технологии прямой гелевой печати рассматривается как один из подходов к получению изделий на основе металлов, керамики и стекла, биологических структур и различных полимеров [4–7].

Обеспечение точного дозирования вязких "чернил" является одним из ключевых факторов, определяющих качество получаемых изделий и воспроизводимость процесса прямой гелевой 3D-печати. Однако, экструзия вязких "чернил" через сопло малого диаметра сопряжена с технологическими трудностями, вызванными инерционностью механизма подачи и вязкоупругим поведением

«чернил» [8, 9]. Рассматриваемые явления и процессы могут приводить к недостаточной экструзии материала при формировании геометрии изделия: утончению нанесенных линий, их разрывам, а также самопроизвольное вытекание материала после окончания экструзии.

С целью повышения качества изделий используются различные методы по подбору параметров процесса на основе машинного обучения [10], математического моделирования [11, 12] и создания дополнительных управляющих контуров [13]. Отдельное внимание заслуживают методы калибровки, основанные на последовательном изменении управляющих параметров системы.

Их применение позволяет отказаться от проведения сложных аналитических исследований, поскольку требуемый режим работы оборудования подбирается экспериментально, на основе сопоставления фактической и заданной значений дозируемой массы, что значительно упрощает настройку процесса.

В рамках работы были проведены экспериментальные исследования процесса экструзии вязких «чернил» на основе альгината натрия с добавлением хлорида кальция, проведена калибровка экструдера собственной конструкции для проведения процесса 3D-печати и реализован процесс 3D-печати с использованием полученных параметров.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объекта исследования в работе рассмотрен экструдер собственной конструкции (рис. 1).

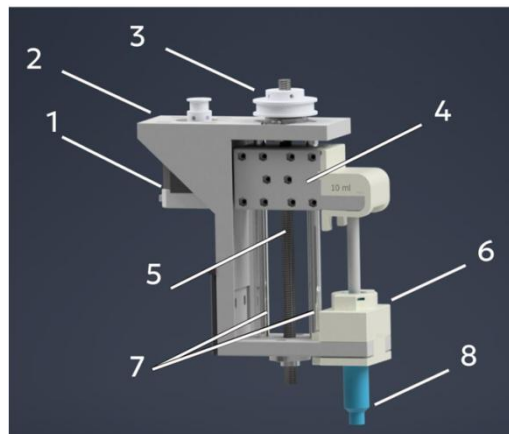


Рис. 1. Конструкция экструдера для 3D-печати вязкими «чернилами»: 1 – шаговый двигатель; 2 – корпус; 3 – ременный редуктор; 4 – поршень; 5 – резьбовой вал; 6 – линейные направляющие; 7 – держатель для емкости; 8 – емкость с «чернилами»

Fig. 1. Extruder design for 3D printing with viscous "ink": 1 - stepper motor; 2 - housing; 3 - belt drive; 4 - piston; 5 - threaded shaft; 6 - linear guides; 7 - container holder; 8 - "ink" container

Принцип работы устройства основан на преобразовании вращательного движения шагового двигателя (1) через ременной редуктор (3) с передаточным отношением 1:3 в поступательное движение поршня (4).

Линейное перемещение элемента происходит за счет использования винтовой передачи. Вращение резьбового вала (5) приводит поршень в движение вдоль линейных направляющих (7), обеспечивая экструзию "чернил" из шприца диаметром 14.7 мм (8), закреплённого в держателе (6) на корпусе (2).

Получение изделий с использованием 3D-печати представляет собой последовательное нанесение линий «чернил», из которых формируются слои, а совокупность слоев образует трёхмерную геометрию. Управление процессом трехмерной печати осуществляется посредством команд G-кода, которые определяют работу исполняющих механизмов 3D-принтера. Весь процесс получения изделия разбивается на последовательно исполняемые команды, которые определяют траекторию движения экструдера, его скорость, количество подаваемого материала и другие параметры процесса (рис. 2).

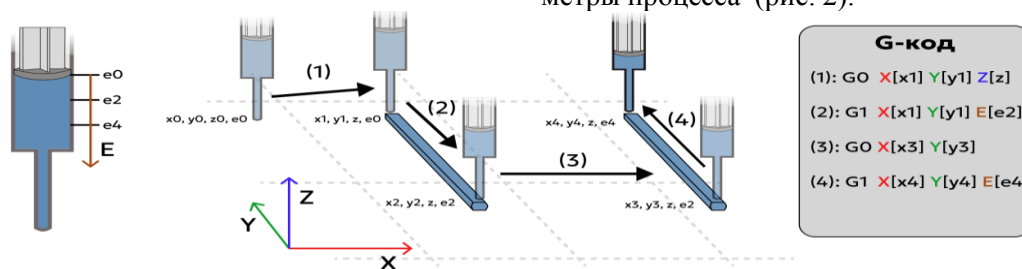


Рис. 2. Принцип управления аддитивным оборудованием с использованием команд G-кода
Fig. 2. The principle of controlling additive equipment using G-code commands

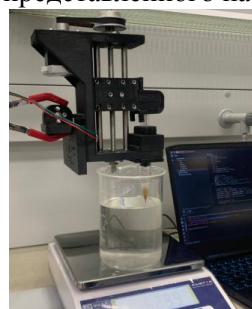
Основными командами, используемыми в процессе прямой гелевой печати, являются команды G0 и G1. Команда G0 отвечает за перемещение экструдера без подачи материала (холостой ход). Команда G1 задаёт движение с экструзией, при котором одновременно осуществляется перемещение по заданным координатам и экструзия «чернил». Параметры X, Y и Z задают координаты положения экструдера в пространстве, а параметр E определяет смещение поршня экструдера.

Таким образом, процесс 3D-печати может быть отнесен к периодическим технологическим процессам и представлен, как последовательность чередующихся циклов нанесения линий и холостого хода без экструзии.

Поэтому для проведения экспериментальных исследований процесса экструзии может быть рассмотрена ступенчатая подача материала, при которой экструзия материала происходит периодически. Такой метод приближен к реальным условиям печати: каждая ступень соответствует нанесению отдельной линии материала и позволяет количественно оценить, как изменяется масса выводимого материала при повторяющихся включениях и выключениях подачи. Оценка точности дозирования проводится путем сравнения фактической массы нанесенного материала с заданным значением. Определение зависимостей массы от времени проводилось с помощью оборудования, представленного на рис. 3.



(а)



(б)

Рис. 3. Экспериментальная установка для проведения исследований процесса экструзии:

(а) – схематическое отображение; (б) – внешний вид установки

Fig. 3. Experimental setup for studying the extrusion process:

(а) – schematic representation; (б) – external appearance of the setup

Экструдер с установленным шприцом закреплялся над аналитическими весами Ohaus PR 200 (Ohaus., Нью-Джерси, США). На весы устанавливался стакан с водой, в который частично погружалось сопло экструдера для снижения сил поверхностного натяжения «чернил» при дозировании. Поскольку в предложенном варианте исполнения установки экструдер зафиксирован набор управляющих команд не включает перемещения по осям XYZ, а холостой ход представлен в виде пауз между циклами экструзии.

Управление движением поршня проводилось с использованием персонального компьютера путем передачи команд на плату экструдера. На персональный компьютер также записывались

значения массы с весов каждые 0.2 мс. Калибровка проводилась за счет подбора параметра смещения поршня во время преэкструзии и ретракта, выражаемое как расстояние, пройденное поршнем в мм. Преэкструзия – это предварительное продавливание материала, требуемое для снижения вязкости «чернил» перед началом процесса печати. Ретракт представляет собой обратное перемещение поршня с целью уменьшения давления в экструдере и предотвращения вытекания материала после окончания процесса. С целью определения значения величины смещения в работе предложена схема процесса калибровки экструдера для вязких «чернил» (рис. 4).



Рис. 4. Метод калибровки экструдера для вязких «чернил»
Fig. 4. Extruder calibration method for viscous "ink"

где Δm – заданное значение массы наносимого материала, г; Q – расход, мл/с; ρ – плотность используемых «чернил», г/мл; ε – точность, г; E – значение смещения поршня во время преэкструзии и ретракта, мм; $M_{th}(t)$ – теоретическая зависимость массы дозируемых «чернил» от времени; $M_{exp}(t, E)$ – экспериментальная зависимость массы дозируемых «чернил» от времени.

На первом этапе задаются входные параметры: заданное значение массы дозируемого материала, расход, плотность, требуемая точность и шаг изменения. В соответствии с данной схемой проводится калибровка экструдера за счёт последовательного изменения управляющего воздействия – расстояния, пройденного поршнем экструдера – с дальнейшим сравнением полученной фактической массы дозируемого материала M_{exp} с заданным значением M_{th} . После завершения процесса экструзии рассчитывается расхождение мас-

сы между заданным и экспериментальным значениями, после чего их разность сравнивается с точностью ε .

Если требуемая точность не была достигнута, к параметру E добавляется выбранный шаг приращения ΔE , и происходит корректировка набора управляющих команд G-кода (рис. 5). Полученный код используется для повторных экспериментальных исследований. После завершения процесса калибровки полученное значение смещения E используется для реализации 3D-печати вязкими «чернилами».

Калибровка установки проводилась для экструзии фиксированной массы 0.03 г. Для экспериментальных исследований использовалось коническое сопло Luer Lock TT (Guangzhou Tongyuan Plastic Products Co., Ltd., Гуанчжоу, Китай) с внутренним диаметром 0.41 мм при расходе 0.07 мл/с во время цикла экструзии.

```
G1 E0.01769; экструзия 0.03 г. материала
G4 S5; пауза 5 секунд

G1 E0.03537
G4 S5

G1 E0.07075
G4 S5
```

а)

```
G1 E0.020; преэктрузия
G1 E0.038; экструзия 0.03 г. материала
G1 E0.018; ретракт
G4 S5; пауза 5 секунд

G1 E0.038
G1 E0.056
G1 E0.036
G4 S5
```

б)

Рис. 5. Набор управляющих команд G-кода для проведения экспериментальных исследований процесса экструзии:

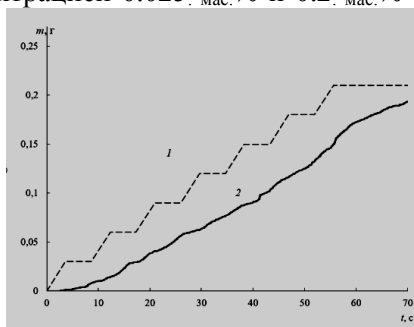
а) – изначальный код; б) – код с преэктрузией и ретрактом

Fig. 5. A set of G-code control commands for conducting experimental studies of the extrusion process:

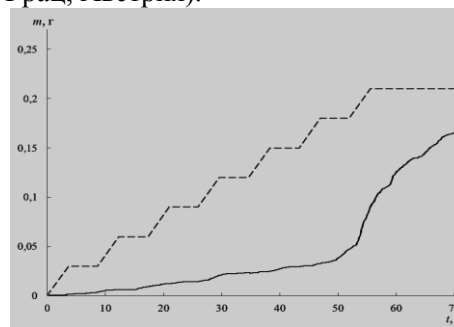
а) - original code; б) - code with pre-extrusion and retraction

В качестве "чернил" для 3D-печати использовался водный раствор частично сшитого альгината натрия с содержанием биополимера 2 мас. %, зарекомендовавший себя как подходящий материал для прямой гелевой печати [14]. Для приготовления вязких "чернил" использовался порошок альгината натрия (ООО "РусХим", Москва, Россия), который диспергировали в водном растворе CaCl_2 (ООО "РусХим", Москва, Россия) концентрацией 0.025 мас. % и 0.2 мас. % с использо-

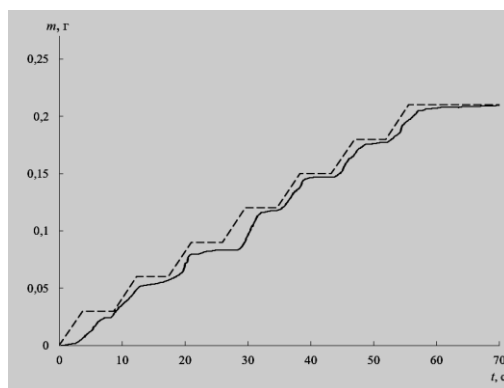
ванием ротор-статорного гомогенизатора со скоростью вращения 10000 об/мин в течение 5 минут. Полученный материал помещали в шприцы Luer Lock 10 мл (SFM, Берлин, Германия) и подвергали центрифугированию при 2500 об/мин в течение 3 минут для удаления включений воздуха из структуры геля. Оценка реологических характеристик приготовленных «чернил» проводилась с использованием реометра SmartPave 102 (Anton Paar, Грац, Австрия).



а)



б)



в)

Рис. 6. Расхождение между теоретической (1) и экспериментальной (2) кривыми экструзии, при расходе 0.4 мл/с и диаметре сопла 0.41 мм:

а) – альгинат натрия 2 мас. %, CaCl_2 0.025 мас. %, б) – альгинат натрия 2 мас. %, CaCl_2 0.2 мас. %;

в) – контрольный образец чистой воды

Fig. 6. The discrepancy between the theoretical (1) and experimental (2) extrusion curves, at a flow rate of 0.4 ml/s and a nozzle diameter of 0.41 mm:

а) – sodium alginate 2 wt. %, CaCl_2 0.025 wt. %, б) – sodium alginate 2 wt. %, CaCl_2 0.2 wt. %; в) – control sample of pure water

Наибольшее отклонение от теоретической кривой наблюдается у материала с добавлением 0.2 мас.% хлорида кальция (рис. 6а). Форма полученных кривых и степень их отклонения от теоре-

тической зависимости отражают различия в реологических свойствах «чернил», определяющих поведение материала при экструзии (рис. 7).

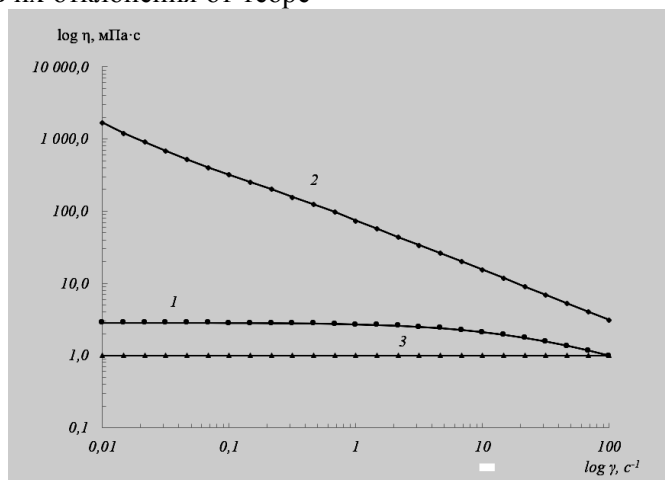


Рис. 7. Кривые течения: 1 – альгинат натрия 2 мас.%, CaCl₂ 0.025 мас.%, 2 – альгинат натрия 0.2 мас.%, CaCl₂ 0.2 мас.%, 3 – контрольный образец чистой воды

Fig. 7. Flow curves: 1 – sodium alginate 2 wt.%, CaCl₂ 0.025 wt.%, 2 – sodium alginate 0.2 wt.%, CaCl₂ 0.2 wt.%, 3 – control sample of pure water

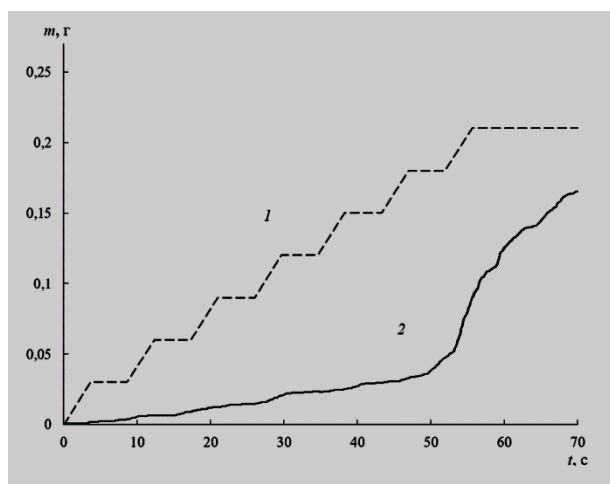
РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

С использованием представленной экспериментальной установки были проведены исследования ступенчатой экструзии вязких «чернил» на основе 2 мас.% альгината натрия с добавлением CaCl₂ и контрольного образца чистой воды. Эксперимент включает 7 циклов подачи материала с паузой между экструзией 5 секунд, что позволяет оценить накопление расхождения по массе при использовании различных «чернил» для 3D-печати (рис. 6). Повышение концентрации хлорида кальция значительно повышает вязкость раствора за счет образования устойчивой гелевой структуры полимера. Помимо этого, изменяется тип течения «чернил» и наблюдается повышение степени псевдопластичности, что отражается в наклоне кривых течения.

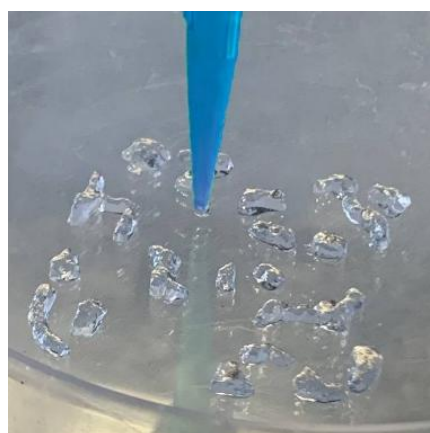
Однако, установление прямой количественной зависимости между реологическими параметрами материала и величиной отклонения при экструзии представляет собой сложную аналитическую задачу из-за множества одновременно протекающих процессов во время экструзии – локальными потерями давления в системе, снижение вязкости «чернил» с их последующей релаксацией, инерцией механизма подачи.

Данный факт подтверждает необходимость использования эмпирических методов исследования и калибровки.

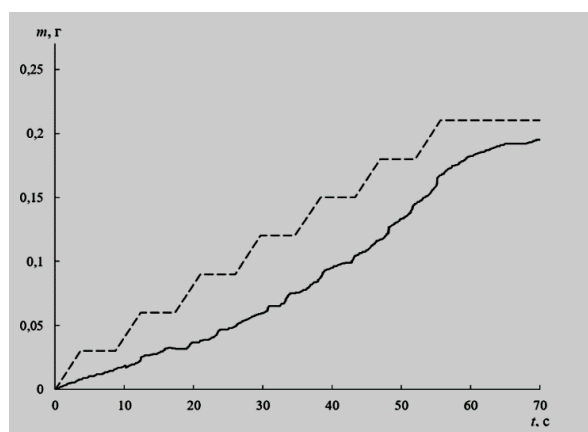
На основании предварительных исследований калибровка оборудования проводилась для «чернил», которые характеризуются наибольшей степенью псевдопластичности, а именно – 2 мас.% альгината натрия и 0.2 мас.% CaCl₂. Определение расстояния дополнительного смещения E проводилась с шагом ΔE 0.001 мм, требуемой точностью ϵ 0.01 на каждом цикле экструзии. Для выбранного состава были построены экспериментальные кривые изменения массы нанесенного материала во времени. Помимо этого, для оценки применимости предложенного подхода был проведен процесс прямой гелевой печати сетчатой структуры размером 10x10x0.5 мм с расстоянием между линиями 1,2 мм при различных значениях смещения E (рис. 8). По мере прохождения калибровки экспериментальные значения приближаются к заданным уставкам по массе, и заданная точность была достигнута при значении смещения равном 0.115 мм. При этом расхождение по массе, вычисленное, как среднее значение по всем циклам экструзии, составило 0.006 г. Полученные изделия, в свою очередь, демонстрируют, что преэкструзия и ретракт оказывают существенное влияние на процесс формирования изделия и позволяют повысить качество 3D-печати. При значении $E = 0$ (рис. 8г) наблюдается практически полное отсутствие непрерывной экструзии и на рабочую платформу наносились лишь отдельные участки материала, не образующие целостную сетчатую форму.



а)



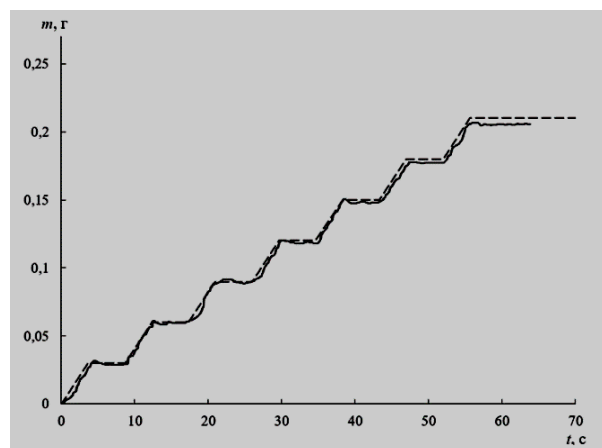
г)



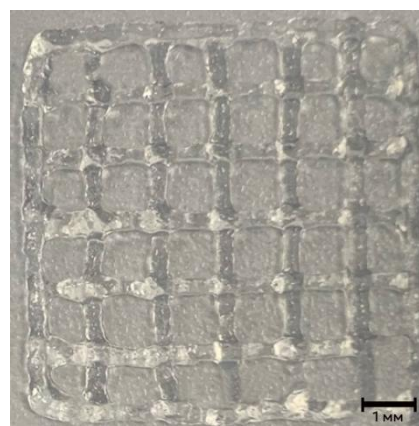
б)



д)



в)



е)

Рис. 8. Влияние параметра смещения E , мм на процесс экструзии вязких «чернил»: (1) – теоретическое значение массы, (2) – экспериментальные значения массы и результаты проведения процесса 3D-печати при: а, г) – $E=0$; б, д) – $E=0.051$; в, е) – $E=0.115$;

Fig. 8. The influence of the displacement parameter E , mm, on the extrusion process of viscous "ink":

(1) – theoretical value of mass, (2) – experimental values of mass and the results of the 3D printing process at: а, г) – $E=0$; б, д) – $E=0.051$; в, е) – $E=0.115$;

При увеличении смещения до $E = 0.051$ мм (рис. 8д) процесс экструзии стабилизировался, однако в полученной структуре присутствуют разрывы между линиями, что указывает на недостаточный объём наносимых «чернил».

При значении $E = 0.115$ мм (рис. 8е) формирование сетчатой структуры происходит равномерно, с чётко выраженными линиями одной толщины и достаточной подачей материала на протяжении всего процесса. Полученные результаты указывают, что предложенный метод калибровки позволяет значительно повысить качество получаемых изделий и стабилизировать процесс экструзии во время 3D-печати.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в работе продемонстрировано, что во время экструзии «чернил» на основе биополимеров, обладающих псевдопластичным типом течения происходит значительное расхождение экспериментальной и заданной массы нанесенного материала. Данный факт влечет за собой

значительное искажение структуры конечных изделий и снижение качества процесса 3D-печати. Расхождение между кривыми массы от времени зависит от реологических свойств «чернил»: вязкости и степени псевдопластичности.

Введение дополнительного смещения поршня в начале и завершении экструзии позволяет компенсировать данные эффекты и повысить качество получаемых изделия во время прямой гелевой печати. Из чего следует, что данный подход может быть использован для калибровки 3D-принтеров и разработки технологических режимов печати вязкими «чернилами».

Благодарность: Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 23-13-00368.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

The authors declare the absence a conflict of interest warranting disclosure in this article.

ЛИТЕРАТУРА

1. Truby R.L., Lewis J.A. Printing soft matter in three dimensions. *Nature*. 2016. V. 540. P. 371-378. DOI: 10.1038/nature21003.
2. Wei P., Cipriani C., Hsieh C.M., Kamani K., Rogers S. Pentzer E. Go with the flow: Rheological requirements for direct ink write printability. *Journal of Applied Physics*. 2023. V. 134, № 10. DOI: 10.1016/j.addma.2023.103745.
3. Chung J.H.Y., Naficy S., Yue Z., Kapsa R., Quigley A., Moulton S.E., Wallace G.G. Bio-ink properties and printability for extrusion printing living cells. *Biomaterials Science. Royal Society of Chemistry*. 2013. V. 1, № 7. P. 763–773. DOI: 10.1039/C3BM00012E.
4. Mazeeva A. Masaylo D., Konov G. Popovich A. Multi-Metal Additive Manufacturing by Extrusion-Based 3D Printing for Structural Applications: A Review. *Metals MDPI*. 2024. V. 14, №11. P.1296. DOI:10.3390/met14111296.
5. Hirsch M., Lucherini L., Zhao R., Saracho A.C. 3D printing of living structural biocomposites. *Materials Today*. 2023. V. 62. P. 21–32. DOI: 10.1016/j.mattod.2023.02.001.
6. Hu X., Karnetzke J., Fassbender M., Drücker S., Bettermann S., Schroeter B., Pauer W., Moritz H.-U., Fiedler B., Luinstra G., Smirnova I. Smart reactors – Combining stimuli-responsive hydrogels and 3D printing. *Chemical Engineering Journal*. 2020. V. 387. P. 123413. DOI: 10.1016/j.cej.2019.123413.
7. Generalova A.N., Demina P.A. Akasov R.A., Khaydukov E.V. Photopolymerization in 3D printing of tissue-engineered constructs for regenerative medicine. *Russ. Chem. Rev.* 2023. V. 92, № 2. P.108320. DOI: 10.57634/RCR5068.
8. Ozbolat I.T., Hospodiuk M. Current advances and future perspectives in extrusion-based bioprinting. *Biomaterials*. 2016. № 76. P. 321–343. DOI: 10.1016/j.biomaterials.2015.10.076.
9. Estelle K.T., Gozen B.A. Complex ink flow mechanisms in micro-direct-ink-writing and their implications on flow rate control. *Additive Manufacturing*. 2022. №. 59. P. 103183. DOI: 10.1016/j.addma.2022.103183.

REFERENCES

1. Truby R.L., Lewis J.A. Printing soft matter in three dimensions. *Nature*. 2016. V. 540. P. 371-378. DOI: 10.1038/nature21003.
2. Wei P., Cipriani C., Hsieh C.M., Kamani K., Rogers S. Pentzer E. Go with the flow: Rheological requirements for direct ink write printability. *Journal of Applied Physics*. 2023. V. 134, N 10. DOI: 10.1016/j.addma.2023.103745.
3. Chung J.H.Y., Naficy S., Yue Z., Kapsa R., Quigley A., Moulton S.E., Wallace G.G. Bio-ink properties and printability for extrusion printing living cells. *Biomaterials Science. Royal Society of Chemistry*. 2013. V. 1, N 7. P. 763–773. DOI: 10.1039/C3BM00012E.
4. Mazeeva A. Masaylo D., Konov G. Popovich A. Multi-Metal Additive Manufacturing by Extrusion-Based 3D Printing for Structural Applications: A Review. *Metals MDPI*. 2024. V. 14, N11. P.1296. DOI:10.3390/met14111296.
5. Hirsch M., Lucherini L., Zhao R., Saracho A.C. 3D printing of living structural biocomposites. *Materials Today*. 2023. V. 62. P. 21–32. DOI: 10.1016/j.mattod.2023.02.001.
6. Hu X., Karnetzke J., Fassbender M., Drücker S., Bettermann S., Schroeter B., Pauer W., Moritz H.-U., Fiedler B., Luinstra G., Smirnova I. Smart reactors – Combining stimuli-responsive hydrogels and 3D printing. *Chemical Engineering Journal*. 2020. V. 387. P. 123413. DOI: 10.1016/j.cej.2019.123413.
7. Generalova A.N., Demina P.A. Akasov R.A., Khaydukov E.V. Photopolymerization in 3D printing of tissue-engineered constructs for regenerative medicine. *Russ. Chem. Rev.* 2023. V. 92, N 2. P.108320. DOI: 10.57634/RCR5068.
8. Ozbolat I.T., Hospodiuk M. Current advances and future perspectives in extrusion-based bioprinting. *Biomaterials*. 2016. N 76. P. 321–343. DOI: 10.1016/j.biomaterials.2015.10.076.
9. Estelle K.T., Gozen B.A. Complex ink flow mechanisms in micro-direct-ink-writing and their implications on flow rate control. *Additive Manufacturing*. 2022. N 59. P. 103183. DOI: 10.1016/j.addma.2022.103183.

10. **Perera Y.S., Li J., Abeykoon C.** Machine learning enhanced grey box soft sensor for melt viscosity prediction in polymer extrusion processes. *Scientific Reports*. 2025. №109. P.104836. DOI: 10.1038/s41598-025-85619-6.
11. **Lorenz J. Hildner M. van den Bogert W., Zhu B., Yee S., Fazeli N., Shih A.J.** Modeling of the high-viscosity fluid transient flow for material deposition in direct ink writing. *Additive Manufacturing*. 2025. №109. P. 104836. DOI: 10.1016/j.addma.2025.104836.
12. **Yongqiang T., Hassan A., Siadat A., Yang G.** Analytical modeling of deposited filaments for high viscosity material-based piston-driven direct ink writing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022. №123. P 3387-3398. DOI: 10.1007/s00170-022-10511-w.
13. **Estelle K.T., Gozen B.A.** Complex ink flow mechanisms in micro-direct-ink-writing and their implications on flow rate control. *Additive Manufacturing*. 2022. V. 59. P. 103183. DOI: 10.1016/j.addma.2022.103183.
14. **Абрамов А.А., Цыганков П.Ю., Окишева М.К., Меньшутина Н.В.** Разработка «чернил» для реализации экструзионных методов 3D-печати вязкими материалами. *Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. Об-ва)*. 2023. Т. LXVII, № 2. С. 74-82. DOI: 10.6060/rcj.2023672.9.
10. **Perera Y.S., Li J., Abeykoon C.** Machine learning enhanced grey box soft sensor for melt viscosity prediction in polymer extrusion processes. *Scientific Reports*. 2025. N109. P.104836. DOI: 10.1038/s41598-025-85619-6.
11. **Lorenz J. Hildner M. van den Bogert W., Zhu B., Yee S., Fazeli N., Shih A.J.** Modeling of the high-viscosity fluid transient flow for material deposition in direct ink writing. *Additive Manufacturing*. 2025. N109. P. 104836. DOI: 10.1016/j.addma.2025.104836.
12. **Yongqiang T., Hassan A., Siadat A., Yang G.** Analytical modeling of deposited filaments for high viscosity material-based piston-driven direct ink writing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022. N123. P 3387-3398. DOI: 10.1007/s00170-022-10511-w.
13. **Estelle K.T., Gozen B.A.** Complex ink flow mechanisms in micro-direct-ink-writing and their implications on flow rate control. *Additive Manufacturing*. 2022. Vol. 59. P. 103183. DOI: 10.1016/j.addma.2022.103183.
14. **Abramov A.A., Okisheva M.K., Tsygankov P.Y., Menshutina N.V.** Development of “Ink” for extrusion methods of 3D printing with viscous materials. *Ros. Khim. Zh.* 2023. V. 67. N 2. P. 74-82. DOI: 10.6060/Rcj.2022672.9.

Поступила в редакцию(Received) 14.12.2025
Принята к опубликованию (Accepted) 10.02.2026