

Алгоритм автоматизированного контроля и управления процессом 3D-печати шоколадной массой

Э. Д. Шибанов^{1✉}, С. А. Рылов^{1,2}, И. Г. Благовещенский¹

¹ Российский биотехнологический университет, Москва, Россия

² МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия

✉ ShibanovED@mgupp.ru

Аннотация. Цель данной статьи заключается в разработке алгоритма автоматизированного контроля технологического процесса 3D-печати шоколадной массой. Для этого был проведен анализ существующего алгоритма пищевой 3D-печати шоколадом и шоколадной глазурью, а также рассмотрены причины возникновения дефектов. Предложен алгоритм автоматизированной системы контроля и управления, применимый к данному виду 3D-печати. В качестве главного датчика выступает система технического зрения, основная задача которой заключается в распознавании и оценке состояния верхнего слоя печати. По результатам оценки состояния шоколада происходит управление скоростью нанесения материала следующего слоя. Внедрение предложенного алгоритма контроля позволит оптимизировать процесс печати шоколадом и глазурью, сэкономить время оператора, минимизировать количество брака и достичь оптимальной скорости получения трехмерного изделия. Результаты работы будут использованы в процессе реализации системы автоматизированного контроля технологического процесса пищевой 3D-печати шоколадом с использованием технического зрения.

Ключевые слова: 3D-печать, шоколад, аддитивные технологии, техническое зрение, пищевая промышленность, автоматизированный контроль

Для цитирования: Шибанов Э. Д., Рылов С. А., Благовещенский И. Г. Алгоритм автоматизированного контроля и управления процессом 3D-печати шоколадной массой // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2023. Т. 16, № 8. С. 57–63. doi: 10.32603/2071-8985-2023-16-8-57-63.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Original article

Algorithm for Automated Control of the Process of 3D Printing with Chocolate Mass

E. D. Shibarov^{1✉}, S. A. Rylov^{1,2}, I. G. Blagoveshchensky¹

¹ Biotech University, Moscow, Russia

² MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia

✉ ShibarovED@mgupp.ru

Abstract. We set out to develop an algorithm for automated control of the technological process of 3D printing with chocolate mass. To that end, an analysis of the existing algorithm for 3D printing of food products with chocolate mass and chocolate icing was carried out. The causes of defects were also considered. An algorithm for an automated control and adjustment system applicable to this type of 3D printing is proposed. The main sensor is a vision system, whose main task consists in recognizing and evaluating the state of the top printing layer. On the basis of this information, the speed of applying the material of the next layer is adjusted. The implementation of the proposed control algorithm can optimize the process of printing with chocolate and icing mass, save the operator's time, reduce the amount of defective products, and achieve the optimal speed for obtaining a three-dimensional product. The results of the work will be used in the process of implementing an automated control system for the process of 3D food printing with chocolate using technical vision.

Keywords: 3D printing, chocolate, additive technologies, technical vision, food industry, automated control

For citation: Shibano E. D., Rylov S. A., Blagoveshchensky I. G. Algorithm for Automated Control of the Process of 3D Printing with Chocolate Mass // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2023. Vol. 16, no. 8. P. 57–63. doi: 10.32603/2071-8985-2023-16-8-57-63.

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Введение. Пищевая 3D-печать шоколадом способна удивить клиента и может активно применяться в кафе, кондитерских и частных пекарнях для привлечения внимания и интереса посетителей [1]–[3]. Для широкого применения данной технологии необходимо обеспечить должное качество получаемых изделий и доступность технологии для обычного, неквалифицированного пользователя.

На качество 3D-печати шоколадом влияет множество факторов – температура окружающей среды, вид и производитель сырья, температура печатающего сопла, скорость печати, высота слоя, наличие внешнего охлаждения и др. [4]. Зачастую при неправильно подобранных параметрах изделие получается деформированным и не соответствует своей цифровой модели, что сильно ухудшает визуальное восприятие (внешний вид) и ценность напечатанного продукта. Такая модель чаще всего отбраковывается, и приходится запускать повторную печать, но уже с измененными параметрами, чтобы добиться приемлемого результата. На сегодняшний день все эти параметры контролируются и подбираются оператором вручную, и это трудоемкий и длительный процесс настройки печати [5]. Применение систем автоматизированного контроля качества и управления процессом позволит значительно сэкономить ресурсы.

В области машиностроения для контроля качества 3D-печати были предложены несколько различных систем, осуществляющих неразрушающий контроль деталей во время их построения [6]–[8]. Такие комплексы основаны на использовании систем технического зрения, которые помогают обнаружить наличие и расположение дефектов. Для пищевой области техническое зрение используется в основном в промышленных масштабах, при контроле продукции в потоке на конвейерных линиях.

Основная цель данного исследования заключается в разработке алгоритма автоматизированного контроля и управления применимого к технологическому процессу пищевой 3D-печати шоколадом и шоколадной глазурью для достижения оптимального результата печати.

В первую очередь, был рассмотрен существующий алгоритм пищевой 3D-печати шоколадом и шоколадной глазурью. В результате анализа предметной области выделены ключевые факторы, оказывающие наибольшее влияние на конечный результат печати при правильно подобранном сырье. К ним относятся скорость печати и температура верхнего слоя. Затем была предложена схема печати с использованием системы технического зрения и разработан алгоритм автоматизированного контроля, предполагающий достижение оптимальных результатов печати.

Общий алгоритм 3D-печати. Общий алгоритм аддитивного производства одинаков для большинства используемых материалов и технологий печати. После включения питания устройство инициализируется, обычно в течение нескольких секунд, и ожидает необходимого задания. В качестве управляющей программы используется G-Code, который заранее подготавливается в программе-слайсере и может храниться на внешнем носителе или отправляться на принтер построчно с ПК. После выбора нужного G-Code происходит запуск печати. Сперва принтер находит свои «домашние» положения по всем осям (за исключением оси экструдера) и включает нагреватели до достижения начальной температуры, указанной в G-Code. Потом начинается послойный процесс печати (рис. 1), когда принтер построчно считывает и выполняет команды из файла. Так происходит до завершения построения всей фигуры [9]. В конце печати принтер отключает нагревательные элементы, возвращается в исходную позицию по осям X , Y и отключает напряжение на двигателях. После этого он снова готов к печати.

Стоит отметить, что при таком алгоритме работы наличие брака можно обнаружить только при помощи стороннего наблюдателя или оператора 3D-принтера. Если печать проводится с SD-карты, то внести изменения в существующий G-Code, не прервав печать, практически невозможно. Если же 3D-принтер оснащен контроллером с дисплеем и пультом управления или управляется с ПК, то возможно ручное изменение некоторых

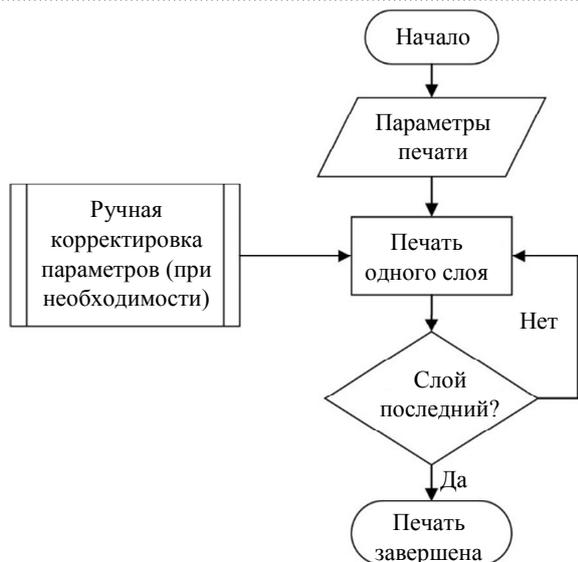


Рис. 1. Алгоритм стандартного процесса печати
 Fig. 1. Algorithm of the standard printing process

настроек печати – скорости движения осей, температуры нагревателей и скорости вентиляторов охлаждения (например, в программах управления принтером Repetier-Host, Pronterface, OctoPrint и др.). В большинстве случаев, когда дефекты незначительны, можно допечатать модель, изменив некоторые параметры печати прямо во время работы. Однако для этого требуется постоянное присутствие оператора, контролирующего процесс печати.

Анализ факторов, влияющих на конечный результат 3D-печати шоколадом. По принципу

работы оборудования процесс 3D-печати шоколадом очень похож на процесс печати пластиком. Основные их различия заключаются в предварительной подготовке сырья, в конструкции подающего узла и в режимах работы оборудования. На рис. 2 представлены основные этапы, оказывающие влияние на конечный результат печати, которые удалось выявить опытным путем, а также в результате проводимых экспериментов [5].

На первом, подготовительном этапе сырье необходимо поместить в отдельную емкость, нагреть и довести до однородного состояния перемешиванием. Затем шоколадную массу нужно загрузить в предварительно разогретый экструдер. Если речь идет о настоящем шоколаде, то его необходимо еще и темперировать [10] или же добавить модификаторы и только потом загружать в экструдер. Ключевые факторы, которые могут повлиять на конечный результат печати в процессе подготовки сырья, – это масса, температура нагрева, качество перемешивания, проведение темперирования или модифицирования. Качество проведения этих операций зависит только от человека и используемого материала и повлиять на них в процессе печати практически невозможно.

На втором этапе происходит подготовка 3D-модели к печати. Оператор выбирает желаемый трехмерный объект и задает базовые настройки процесса (высота слоя, ширина экструзии, заполнение,

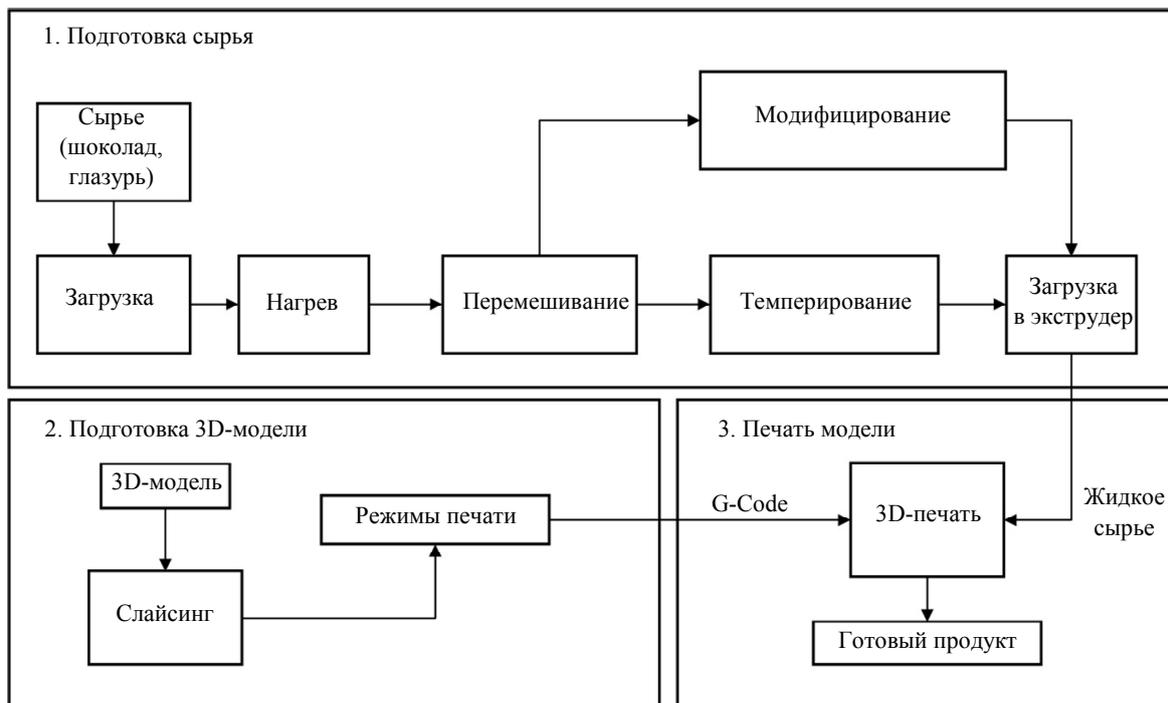


Рис. 2. Функционально-структурная схема процесса пищевой 3D-печати шоколадом
 Fig. 2. Functional block diagram of the 3D food printing process with chocolate

количество слоев и т. д.) в специальной программеслайсере. Также во время «слайсинга» настраиваются режимы печати для используемого материала (температуры экструдера и колбы, температура и скорость внешнего охладителя, скорость печати и т. д.). После того как G-Code готов, его отправляют на принтер в качестве задания.

На третьем этапе происходит построчное выполнение G-Code и построение трехмерной фигуры в автоматическом режиме. Качество получаемой модели зависит от двух предыдущих подготовительных операций и от условий окружающей среды (температура в помещении, расположение принтера и т. д.). Если режимы печати и используемое сырье подобраны правильно, то печать будет успешной. Как было отмечено ранее, если печать производится при помощи ПК или контроллера с пультом управления, то у оператора будет возможность повлиять на температуру экструдера и колбы, температуру и скорость охладителя, а также на скорость печати. Технически автоматизированный контроль можно осуществлять именно во время печати (этап 3).

Один из факторов, оказывающий ключевое влияние на скорость 3D-печати шоколадом, – это охлаждение нанесенного материала. При недостаточной скорости застывания материала скорость печати приходится ограничивать вручную, так как уложенный слой шоколада еще не успевает застыть, когда на него уже наносится новый.

Под весом вновь нанесенного слоя предыдущий теряет свою форму. Модель получается «растекшейся», не соответствует заданной форме и чаще всего не подлежит исправлению на более позднем этапе.

Контроль брака. Для экономии времени оператора целесообразно использовать автоматизированный алгоритм контроля качества модели. На основании файла G-Code можно воссоздать 3D-модель целевого объекта, который печатается в данный момент. Благодаря нескольким камерам система сможет фиксировать текущий результат печати, воссоздавать 3D-модель и проводить сравнительный анализ объема фигур. В случае глобальных отклонений по геометрии (свыше 3–5 %, точное значение подбирается экспериментально) печать считается неуспешной и прерывается автоматически. Так оператору не потребуется тратить свое время на визуальный контроль, а также машинное время принтера и сырье на создание бракованной продукции. К тому же, человек не всегда способен вовремя заметить появление и дальнейшее развитие дефекта при печати.

Оценка состояния слоя для оптимизации скорости печати. Для того чтобы оптимизировать процесс и увеличить общую скорость печати, предлагается оценивать состояние последнего слоя шоколада в режиме реального времени и влиять на скоростные параметры печати в зависимости от текущей ситуации. В нашем преды-

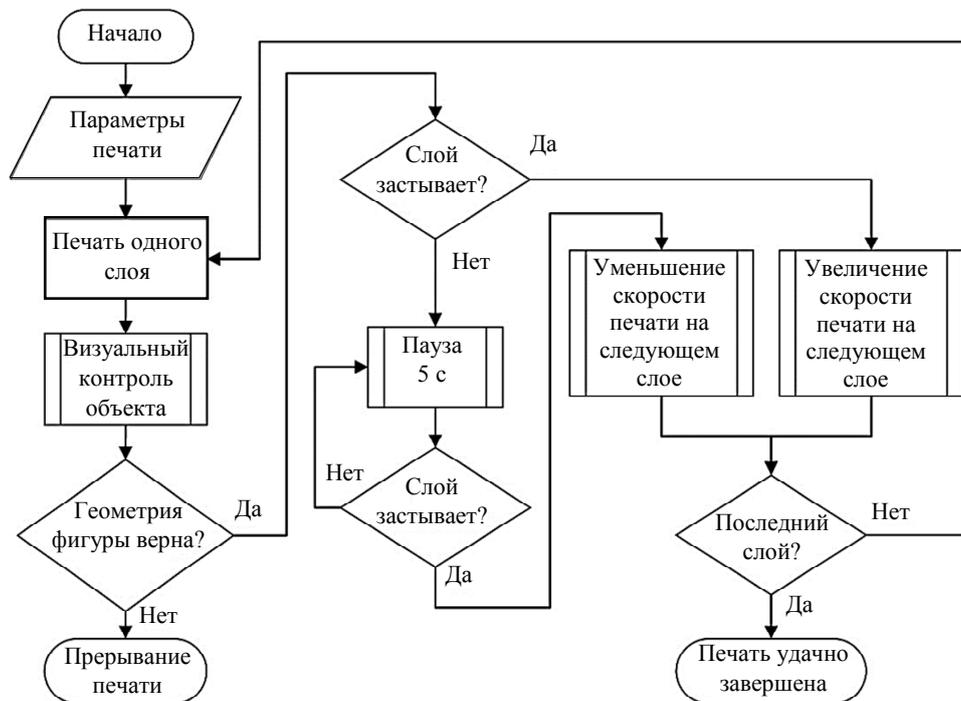


Рис. 3. Алгоритм автоматизированной системы контроля и управления
Fig. 3. Algorithm of the automated monitoring and control system

дущем исследовании был проведен эксперимент, показывающий, что в момент отверждения шоколада происходит резкое изменение его цветности по всем каналам в цветовом RGB-пространстве. При помощи веб-камеры можно зафиксировать это изменение и распознать момент начала кристаллизации. Эта информация позволит системе принимать решение о дальнейшем изменении скорости или температуры. Ограничивать скорость там, где это действительно необходимо, чтобы уберечь геометрию модели от деформации, и увеличивать скорость, если шоколад успевает застывать быстрее, чем наносится слой. Таким образом можно достичь оптимальных результатов печати по времени и качеству, минуя кропотливый подбор параметров, в том числе и для новых материалов печати.

Алгоритм автоматизированной системы контроля. Итоговый алгоритм работы системы контроля и управления представлен на рис. 3. Так как процесс печати шоколадом довольно медленный, для экономии вычислительных ресурсов было решено проводить визуальный контроль только после печати каждого слоя. Сперва проводится оценка общей геометрии изделия на соответствие ее цифровой модели. При обнаружении брака система оповещает оператора о проблеме и печать завершается, если установлено соответствующее разрешение.

Если внешняя геометрия напечатанной фигуры совпадает с трехмерной моделью, тогда следующим шагом происходит выделение изображения верхнего слоя печати для оценки цветности шоколада. В результате оценки подсчитывается среднее цветовое значение пикселей. Далее система принимает решение выдержать паузу (если шоколад еще не застыл) или перейти к печати

следующего слоя (если среднее цветовое значение соответствует застывшему сырью).

Если средний показатель цветности напечатанного слоя соответствует застывшему шоколаду, то происходит увеличение скорости печати следующего слоя (предварительно на 5 %, более точные значения будут получены в результате экспериментов).

Если к моменту завершения печати слоя среднее цветовое значение слоя соответствует жидкому шоколаду, тогда происходит ожидание, и скорость печати на следующем слое будет уменьшена. Таким образом в зависимости от состояния шоколада (на которое влияет условия окружающей среды, рабочая температура, марка материала и площадь слоя) будет подбираться оптимальная скорость нанесения материала.

Выводы. Применение систем технического зрения в области пищевой 3D-печати может найти широкое применение как для контроля качества печатаемого блюда так и для адаптивного управления процессом пищевой 3D-печати.

В данной статье представлены алгоритмы, позволяющие оценивать состояние шоколадной массы и на этом основании регулировать скорость нанесения материала, тем самым добиваясь оптимального соотношения скорость–качество. Стоит заметить, что данный способ контроля можно применить для печати другими ингредиентами, например фаршем или тестом. Проведение визуальной оценки наносимого слоя при помощи систем технического зрения открывает возможности для автоматизированного контроля степени готовности блюда – уровня прожарки или степени запекания. Результаты данных исследований представлены как один из этапов разработки системы автоматизированного контроля за процессом пищевой 3D-печати шоколадом с использованием технического зрения.

Список литературы

1. Extrusion-based 3D food printing – Materials and machines / C. Tan, W. Y. Toh, G. Wong, L. Li // Intern. J. of Bioprinting. 2018. Vol. 4 (2). P. 1–13. doi: 10.18063/IJB.v4i2.143.
2. Toward the design of functional foods and biobased products by 3D printing: A review / S. Portanguen, P. Tournayre, J. Sicard, T. Astruc, P. S. Mirade // Trends in Food Science & Technology. 2018. Vol. 86 (5). P. 188–198. doi: 10.1016/j.tifs.2019.02.023.
3. Lanaro M., Desselle M. R., Woodruff M. A. 3D printing chocolate // Fundamentals of 3D Food Printing and Applications. New York: Academic Press, United

- Kingdom, 2019. P. 151–173. doi: 10.1016/b978-0-12-814564-7.00006-7.
4. Ferreira I. A., Alves J. L. Low-cost 3D food printing // Ciencia e Tecnologia dos Materiais, 2017. Vol. 29 (1). P. 265–269. doi: 10.1016/j.ctmat.2016.04.007.
5. Благовещенский И. Г., Шибанов Э. Д., Загородников К. А. Оптимизация 3D-печати на примере использования шоколадной глазури // Пищевая промышленность, 2020. № 12. С. 70–73. doi: 10.24411/0235-2486-2020-10147.
6. Delli U., Chang S. Automated process monitoring in 3d printing using supervised machine learning // Pro-

cedia Manufacturing, 2018. Vol. 26. P. 865–870. doi: 10.1016/j.promfg.2018.07.111.

7. Jin Z., Zhang Z., Gu G. X. Autonomous in-situ correction of fused deposition modeling printers using computer vision and deep learning // Manufacturing Lett. 2019. Vol. 22. P. 11–15. doi: 10.1016/j.mfglet.2019.09.005.

8. Computer vision for real-time extrusion quality monitoring and control in robotic construction / A. Kazemian, X. Yuan, O. Davtalab, B. Khoshnevis // Au-

tomation in Construction, 2019. Vol. 101. P. 92–98. doi: 10.1016/j.autcon.2019.01.022.

9. 3D printing complex chocolate objects: Platform design, optimization and evaluation // M. Lanaro, D. P. Forrestal, S. Scheurer, D. J. Slinger, S. Liao, S. K. Powell, M. A. Woodruff J. of Food Engin., 2017. Vol. 215. P. 13–22. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2017.06.029.

10. Beckett S. The science of chocolate. 2nd ed. Royal Society of Chemistry, 2015.

Информация об авторах

Шибанов Эдуард Дмитриевич – аспирант Российского биотехнологического университета, Волоколамское шоссе, д. 11, Москва, 125080, Россия.

E-mail: ShibanovED@mgupp.ru

<https://orcid.org/0000-0002-4428-993X>

Рылов Сергей Андреевич – канд. техн. наук, ст. преподаватель кафедры «Автоматизированные системы управления биотехнологическими процессами» Российского Биотехнологического университета, доцент кафедры промышленной информатики Российского Технологического университета – МИРЭА.

E-mail: sergriager@mail.ru

Благовещенский Иван Германович – д-р техн. наук, профессор Российского биотехнологического университета, Волоколамское шоссе, д. 11, Москва, 125080, Россия.

E-mail: igblagov@mgupp.ru

<https://orcid.org/0000-0002-7862-680X>

References

1. Extrusion-based 3D food printing – Materials and machines / C. Tan, W. Y. Toh, G. Wong, L. Li // Intern. J. of Bioprinting. 2018. Vol. 4 (2). P. 1–13. doi: 10.18063/IJB.v4i2.143.

2. Toward the design of functional foods and biobased products by 3D printing: A review / S. Portanguen, P. Tournayre, J. Sicard, T. Astruc, P. S. Mirade // Trends in Food Science & Technology. 2018. Vol. 86 (5). P. 188–198. doi: 10.1016/j.tifs.2019.02.023.

3. Lanaro M., Desselle M. R., Woodruff M. A. 3D printing chocolate // Fundamentals of 3D Food Printing and Applications. New York: Academic Press, United Kingdom, 2019. P. 151–173. doi: 10.1016/b978-0-12-814564-7.00006-7.

4. Ferreira I. A., Alves J. L. Low-cost 3D food printing // Ciencia e Tecnologia dos Materiais, 2017. Vol. 29 (1). P. 265–269. doi: 10.1016/j.ctmat.2016.04.007.

5. Blagoveshenskij I. G., Shibanov Je. D., Zagorodnikov K. A. Optimizacija 3D pechati na primere ispol'zovanija shokoladnoj glazuri // Pishhevaja promyshlennost', 2020. № 12. S. 70–73. doi: 10.24411/0235-2486-2020-10147. (In Russ.).

6. Delli U., Chang S. Automated Process Monitoring in 3D Printing Using Supervised Machine Learning // Procedia Manufacturing, 2018. Vol. 26. P. 865–870. doi: 10.1016/j.promfg.2018.07.111.

7. Jin Z., Zhang Z., Gu G. X. Autonomous in-situ correction of fused deposition modeling printers using computer vision and deep learning // Manufacturing Letters. 2019. Vol. 22. P. 11–15. doi:10.1016/j.mfglet.2019.09.005.

8. Computer vision for real-time extrusion quality monitoring and control in robotic construction / A. Kazemian, X. Yuan, O. Davtalab, B. Khoshnevis // Automation in Construction, 2019. Vol. 101. P. 92–98. doi: 10.1016/j.autcon.2019.01.022.

9. 3D printing complex chocolate objects: Platform design, optimization and evaluation // M. Lanaro, D. P. Forrestal, S. Scheurer, D. J. Slinger, S. Liao, S. K. Powell, M. A. Woodruff J. of Food Engin., 2017. Vol. 215. P. 13–22. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2017.06.029.

10. Beckett S. The Science of Chocolate. 2nd ed. Royal Society of Chemistry, 2015.

Information about the authors

Eduard D. Shibanov – postgraduate student of Russian Biotechnological University, Volokolamskoe sh., 11, Moscow, 125080, Russia.

E-mail: ShibanovED@mgupp.ru

<https://orcid.org/0000-0002-4428-993X>

Sergey A. Rylov – Cand. Sci. (Eng.), Senior Lecturer of the Department of Automated Control Systems of Biotechnological Processes of the Russian Biotechnological University, Associate Professor of the Department of Industrial Informatics of the Russian Technological University – MIREA.
E-mail: serglager@mail.ru

Ivan G. Blagoveshchensky – Dr Sci. (Eng.), Professor of the Russian Biotechnological University, Volokolamskoe sh., 11, Moscow, 125080, Russia.
E-mail: igblagov@mgupp.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7862-680X>

Статья поступила в редакцию 23.05.2023; принята к публикации после рецензирования 29.06.2023; опубликована онлайн 19.10.2023.

Submitted 23.05.2023; accepted 29.06.2023; published online 19.10.2023.
