

## СУРРОГАТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ 3D-ПЕЧАТИ С ЗАДАННОЙ ТОЧНОСТЬЮ

А.М. Свинаярева

svinarevaam@student.bmstu.ru

SPIN-код: 8015-1156

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

---

### Аннотация

*Исследованы главные особенности трехмерного моделирования для дальнейшей 3D-печати пластиком, показаны возможные проблемы аддитивных технологий, а также их решения. Приведено описание возможных методов повышения качества печатаемой детали и увеличения точности печати на 3D-принтере. Рассмотрены программы для подготовки и оптимизации трехмерной модели перед печатью на 3D-принтере. Дано представление о понятии суррогатного моделирования и изучена возможность использования суррогатного моделирования для увеличения точности трехмерной печати и описана стратегия создания такой модели. Получена суррогатная модель, которую можно вводить в программу «нарезки» слоев для дальнейшей печати с большей точностью печати.*

### Ключевые слова

*аддитивные технологии, STL-файл, 3D-печать, 3D-моделирование, точность печати, суррогатное моделирование, прототипирование, SolidWorks, система автоматизированного проектирования, оптимизация*

Поступила в редакцию 02.07.2020

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020

---

**Введение.** В настоящее время огромную популярность получила технология аддитивной печати. Эта технология используется почти во всех сферах деятельности человечества, например, в строительстве, медицине, легкой промышленности, архитектуре и дизайне, ювелирном деле и т. п. [1, 2]. 3D-принтеры просты в использовании, не требуют особых навыков работы с ними, относительно дешевы, для печати на них используется недорогой материал (ABS, PLA-пластик и др.). 3D-печать довольно скоростная, а линейные размеры деталей ограничены только областью печати. Аддитивные технологии производства позволяют изготавливать любое изделие послойно на основе компьютерной трехмерной модели. Процесс создания объекта идет постепенно, деталь как бы «выращивается». При традиционном производстве от заготовки отсекают все лишнее либо деформируют ее. В случае с аддитивными технологиями новое изделие получается с нуля. В зависимости от технологии объект может строиться снизу вверх или наоборот, от этого зависят различные свойства объекта [3].

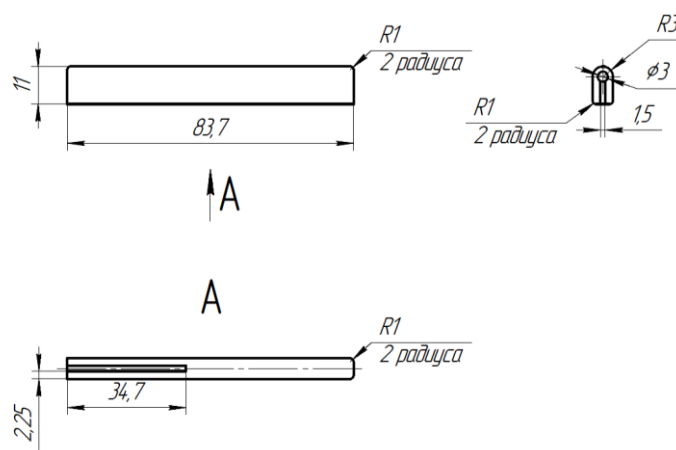
В работе рассмотрены вопросы увеличения точности деталей при их аддитивном производстве. Несмотря на то что большинство способов увеличения точности, описанных в работе, могут относиться к любому аддитивному производству, в том числе к 3D-печати металлом, в работе речь идет главным образом о печати пластиком (ABS, PLA и др.).

**Ошибки при 3D печати.** На точность 3D-печати влияют различные колебания внешней среды. Наличие воздушных потоков в помещении или изменение влажности воздуха в комнате, где происходит печать, могут стать причиной брака детали [4]. Параметры принтера и печати, характеристики материала печати, геометрические особенности и многие другие факторы могут повлечь за собой необходимость дополнительной настройки принтера для обеспечения стабильной печати.

Помимо внешних факторов причиной брака могут стать геометрические ошибки при 3D-моделировании. Чтобы получить модель надлежащего качества и без ошибок, необходимо соблюдать определенные требования, например, обеспечивать необходимые скругления, замыкать поверхности, правильно устанавливать поддержки и верно ориентировать деталь в 3D-принтере [5, 6].

Для печати детали на 3D-принтере электронную модель необходимо перевести в формат, понятный принтеру. Для этих целей пользуются программами-слайсерами, которые «нарезают» модель на слои, т. е. переводят в G-код, из которого 3D-принтер создает физическую модель. Название программы произошло от английского слова *to slice* (нарезать). Результат работы слайсера — G-код, в котором отражены все параметры печати [7].

Деталь, изображенная на рис. 1, при установке на поверхность стола слайсера в горизонтальном положении (длинным торцом на стол) печатается с браком. Вследствие недостаточной адгезии нижних слоев деталь отклеивается от поверхности стола, в результате чего сильно прогибается и оказывается непригодной для дальнейшего использования.



**Рис. 1.** Эскиз детали, для которой важно правильное расположение на столе принтера

**Программное Обеспечение для подготовки и оптимизации 3D-печати.** Существует множество программных продуктов, которые помогают устранять ошибки моделирования для трехмерной печати, повысить качество моделей для печати.

Для анализа печатной модели предназначены программные пакеты SolidWorks и Blender. В пакете SolidWorks имеются инструменты, с помощью кото-

рых можно проверить, насколько технологичной будет модель при печати. Данный программный пакет отмечает элементы, для которых необходимы поддержки, сравнивает выбранную толщину стенки с шириной используемого сопла, позволяет увидеть верное расположение детали на поверхности стола в принтере и т. п. С помощью SolidWorks также можно подобрать оптимальное решение и для конструктивного элемента, и для его опоры. На рис. 2, а оранжевым цветом показаны элементы, для которых потребуются поддержки. Если же у этих элементов добавить фаски, необходимость в опорах пропадает (оранжевые фаски на рис. 2, б). Таким образом, можно оптимизировать деталь для аддитивного производства, одновременно сэкономив материал, время печати, а также время, необходимое на удаление опор [8].

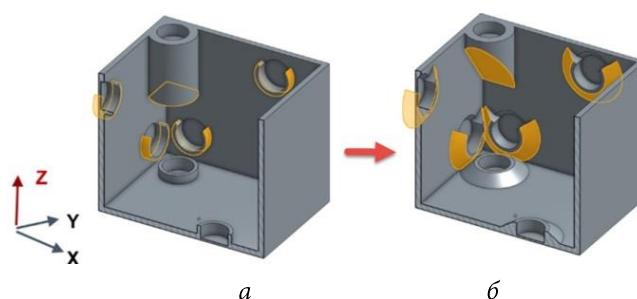


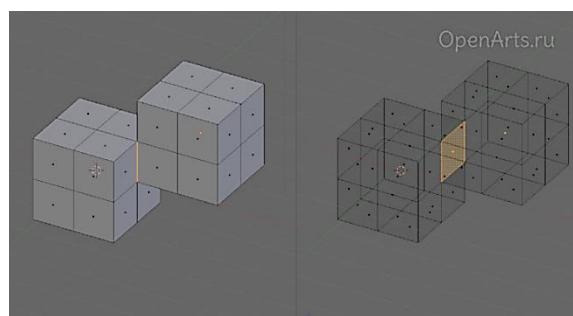
Рис. 2. Пример оптимизации детали для печати в SolidWorks

В программе Blender предусмотрены инструменты, которые помогают обнаружить в модели незамкнутые поверхности и поверхности с нулевой толщиной. Наличие таких поверхностей необходимо избегать, поскольку принтеры не умеют печатать объекты без заданного объема и толщины, и Blender помогает это сделать. Программа Blender позволяет найти поверхности, принадлежащие двум разным объемам и наложенные друг на друга (рис. 3). С ее помощью также можно минимизировать количество полигонов, что позволяет сглаживать модели, определять длинные и тонкие линии, которые нельзя будет напечатать из-за того, что они тоньше минимальной толщины печати, исправлять инвертированные нормали, т. е. нормали, которые неправильно ориентированы (файлы формата STL описывают твердые тела с поверхностью, представляющей собой набор треугольников, у которых нормали должны быть направлены наружу по «правилу буравчика»), и др. [10].

Аналогами представленных пакетов программ являются программные средства Fusion 360, FreeCAD, TinkerCAD, OnShape, Компас 3D.

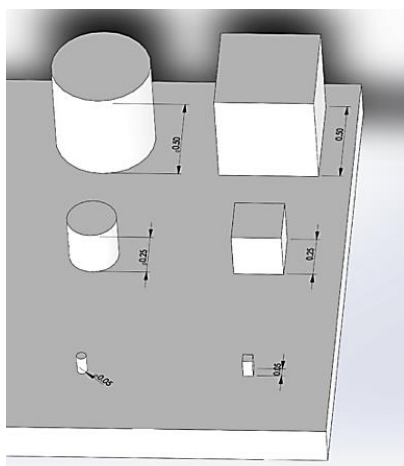
Для анализа процесса печати предназначена программа Digimat Additive Manufacturing (Digimat AM). Программа Digimat AM представляет собой сочетание инструментов для виртуальной разработки композиционных материалов, точного моделирования процесса производства детали методом 3D-печати и расчета детали на прочность и жесткость с учетом микроструктуры в ней после изготовления. Программа моделирует процесс изготовления детали методом

аддитивных технологий, определяет возможные проблемы в конструкции, такие как коробление и остаточные напряжения, и минимизирует их до начала изготовления. Программа Digimat AM позволяет оптимизировать технологию трехмерной печати: с ее помощью упрощается подбор оптимальной геометрии для печати, выбор материала и технологических параметров изготовления [11]. Для печати пластиком аналогов Digimat AM не существует; для печати металлом можно использовать программный комплекс Simufact Additive.



**Рис. 3.** Наложенные друг на друга поверхности, которые определяет Blender

В качестве STL-редактора применяется программное обеспечение MeshLab. С ее помощью можно исправлять и редактировать поверхности, объединять объекты и повышать качество моделей для печати, проверять структурную целостность и пригодность файла для печати. MeshLab позволяет проверить STL-файл на наличие ошибок перед началом 3D-печати. Аналогами программной среды являются пакеты программ 3D-Tool Free Viewer, Meshmixer, Simplify 3D, Netfabb. и др. [12].



**Рис. 4.** Электронные модели, использованные для печати в эксперименте

Помимо геометрических сложностей 3D-печати существуют и другие проблемы аддитивного метода. При 3D-печати часто оказывается невозможным обеспечить необходимую точность печати деталей малых размеров. После получения детали ее размеры могут не соответствовать размерам электронной модели. Одним из методов решения данной проблемы является итерационный метод, когда на повторную печать модель направляется с небольшими корректировками размеров. Из-за трудоемкости данный метод применим только для небольших деталей с малым числом контролируемых размеров. Для моделей больших размеров требуется намного больше времени печати и количества материала, поэтому итерационный метод становится слишком затратным.

Для решения проблемы точности трехмерной печати был проведен эксперимент, в ходе которого были напечатаны модели разных форм и размеров из ABS-пластика: три цилиндра разных диаметров и три куба разных размеров (рис. 4). В результате измерения размеров данных моделей с помощью высокоточного цифрового штангенциркуля для разных напечатанных моделей была получена разная погрешность печати (табл. 1) [13].

Таблица 1

#### Результаты измерений размеров напечатанных объектов

Форма детали	Размер напечатанного объекта, мм, при исходном размере детали, мм			Средняя ошибка печати*
	Большая (0,5)	Средняя (0,25)	Маленькая (0,05)	
Куб	0,5040	0,2515	0,0540	0,003167
Цилиндр	0,5020	0,2510	0,0524	0,001833

\* Средняя ошибка печати — среднее арифметическое разности между самым большим значением толщины напечатанного объекта и номинальной толщиной детали и разницы между самым малым значением толщины и номинальной толщиной детали.

В другом рассмотренном эксперименте при изменении различных параметров была получена зависимость разрешения печати от температуры и скорости печати (табл. 2) [14, 15].

Таблица 2

#### Зависимость разрешения печати от температуры и скорости печати

Номер опыта	Параметр печати		
	Температура печати, °С	Скорость печати, мм/с	Разрешение печати*, мкм
1	220	30	150
2	220	70	200
3	220	110	250
4	240	30	200
5	240	70	250
6	240	110	150
7	260	30	250
8	260	70	150
9	260	110	200

\* Разрешение печати — контролируемые по результатам печати отклонения от исходной проектной формы.

**Описание метода исследования.** Как видно из рассмотренных выше экспериментов, существует множество параметров, влияющих на точность 3D-печати. В результате рассмотрения существующих методов и анализа литературы будем использовать суррогатное моделирование для оценки точности 3D-печати.

В задачах проектирования часто возникает необходимость замены точной, но вычислительно сложной модели так называемой суррогатной моделью, позволяющей быстро выполнять вычисления. Суррогатная модель дает возмож-

ность аппроксимировать зависимость экспериментальных данных и построить конечное множество пар «набор входных параметров — значения выходных характеристик физической модели». Набор экспериментальных данных в рассматриваемом случае будет выступать в роли физической модели.

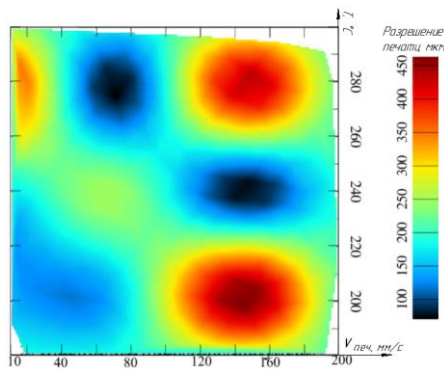
Метод суррогатного моделирования можно описать следующим образом. Все известные данных эксперимента подразделяются на два набора данных: тренировочные и валидационные. Суррогатная модель создается по набору тренировочных точек (отмечены крестиками на рис. 5). Построенная модель проверяется набором валидационных данных (точки на рис. 5) [16, 17].

**Исследование.** В данном случае цель исследования состоит в создании суррогатной функции точности 3D-печати в зависимости от двух входных параметров (скорость и температура печати). Набор входных параметров может быть расширен за счет геометрических параметров модели и характеристик материала печати [18], но в данной работе это не рассмотрено. Разрешение печати принято за выходной параметр, который служит в качестве точности 3D-печати. Таким образом, качество 3D-печати можно представить в виде функции

$$K = F(x_1, x_2) \quad (1)$$

где  $x_1 \in [x_{10}; x_{1n}]$  — температура печати,  $x_2 \in [x_{20}; x_{2n}]$  — скорость печати;

Исследование было выполнено с использованием программной платформы pSeven. Платформа предназначена для исследования пространства проектных параметров. Она расширяет возможности проектирования, моделирования и анализа и помогает принимать осознанные и быстрые решения по проектированию.



**Рис. 6.** Двумерный график суррогатной модели

точной является 3D-печать. Таким образом, суррогатная модель позволяет определить, с какой точностью будет изготовлена деталь при определенных параметрах работы 3D-принтера. В случае необходимости параметры печати могут быть изменены для увеличения точности 3D-печати.

Суррогатная модель строится по входным данным, представленным в табл. 2. Из-за недостаточного количества экспериментальных точек все имеющиеся в табл. 2 значения принимаются за тренировочные. При добавлении точек в исходную модель точность суррогатной модели будет увеличиваться.

На рис. 6 приведена функция суррогатной модели, цветные участки показывают точность 3D-печати при определенных входных данных по оси абсцисс и ординат. Чем насыщеннее красный цвет в изображении области, тем менее

**Выводы.** В результате исследования были изучены проблемы трехмерной печати и методы устранения данных проблем, рассмотрены программы, позволяющие оптимизировать аддитивное производство, и кратко описаны их возможности. Предложен метод суррогатного моделирования в качестве решения проблемы точности 3D-печати и описана перспектива создания суррогатной модели. В ходе исследования получена построенная по суррогатной модели функция точности, которую можно использовать для увеличения точности 3D-печати. Полученную функцию планируется ввести в качестве плагина в программу нарезки слоев (слайсер).

### Литература

- [1] Evans B. Practical 3D printers. The science and art of 3D printing. Apress, 2012.
- [2] Михайлова А.Е., Дошина А.Д. 3D-принтер — технология будущего. *Молодой ученый*, 2015, № 20(100), с. 40–44.
- [3] Аддитивные технологии и аддитивное производство. *3d.globatek.ru: веб-сайт*. URL: [https://3d.globatek.ru/world3d/additive\\_tech](https://3d.globatek.ru/world3d/additive_tech) (дата обращения 10.05.2020).
- [4] Проблемы качества 3D печати и методы устранения. *myshop3d.ru: веб-сайт*. URL: <https://myshop3d.ru/page/Problemy-kachestva-3D-pechati-i-metody-ustraneniya> (дата обращения: 12.05.2020).
- [5] Основы 3D-моделирования для 3D-печати. *habr.com: веб-сайт*. URL: <https://habr.com/ru/post/417605> (дата обращения: 05.05.2020).
- [6] Правила 3D-моделирования для 3D-печати. *cubicprints.ru: веб-сайт*. URL: <https://www.cubicprints.ru/tutorials/pravila-3d-modelirovaniya-dlya-3d-pechati> (дата обращения: 05.05.2020).
- [7] Лучшие слайсеры для 3D-принтера на русском и английском языке. *top3dshop.ru: веб-сайт*. URL: <https://top3dshop.ru/blog/best-slicers-for-3d-printer-rus-eng.html> (дата обращения: 12.05.2020).
- [8] Три приема работы в SOLIDWORKS при моделировании деталей для 3D. *3-info.ru: веб-сайт*. URL: <https://3-info.ru/post.php?post=11059> (дата обращения: 05.05.2020).
- [9] 3D печать в Blender: создание подходящей модели. *openarts.ru: веб-сайт*. URL: <https://openarts.ru/blender-3d-printing-modeling> (дата обращения: 05.05.2020).
- [10] Программы для 3D-принтера: моделирование, слайсеры, печать. *top3dshop.ru: веб-сайт*. URL: <https://top3dshop.ru/blog/reviews/3d-printer-programs-modelling-slicing-fixing-printing.html> (дата обращения: 05.05.2020).
- [11] Федоренко В.Ф., Голубев. И.Г. Перспективы применения аддитивных технологий при производстве и техническом сервисе сельскохозяйственной техники. М., Юрайт, 2019.
- [12] Программы для 3D-принтера. *3dpt.ru: веб-сайт*. URL: <https://3dpt.ru/page/soft> (дата обращения: 05.05.2020).
- [13] Vanderpol R. Testing 3D printer accuracy. Objet24 tolerance analysis. URL: <https://mindtribe.com/2016/09/our-trusty-creators-error-aka-objet24-tolerance-analysis/> (дата обращения 05.05.2020).
- [14] Wu J. Study on optimization of 3D printing parameters. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2018, vol. 392, no. 6, art. 062050. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/392/6/062050>
- [15] Bazin M.M., Othman M.Z.M., Padzi M.M., et al. Optimisation of 3D printing parameter for improving mechanical strength of ABS printed parts. *Int. J. Mech. Eng. Technol.*, 2019, vol. 10, no. 1, pp. 255–260.

- [16] Bouhlef M.A., Hwang J.T., Bartoli N., et al. A Python surrogate modeling framework with derivatives. *Adv. Eng. Softw.*, 2019, vol. 135, art. 102662. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2019.03.005>
- [17] Кулешов А.П., Бернштейн А.В., Бурнаев Е.В. Адаптивные модели сложных систем на основе обработки данных. *Мат. 3-й Межд. конф. по индуктивному моделированию*. Киев, 2010, с. 64–71.
- [18] Бурнаев Е.В., Приходько П.В. Методология построения суррогатных моделей для аппроксимации пространственно неоднородных функций. *Труды МФТИ*, 2013, т. 5, № 4, с. 122–132.

**Свинарева Алена Михайловна** — студентка кафедры «Аэрокосмические системы», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

**Научный руководитель** — Кашфутдинов Булат Дамирович, старший преподаватель кафедры «Аэрокосмические системы», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

**Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:**

Свинарева А.М. Суррогатное моделирование 3D-печати с заданной точностью. *Политехнический молодежный журнал*, 2020, № 08(49). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2020-08-637>



## SURROGATE 3D PRINTING WITH DEFINED PRECISION

A.M. Svinareva

svinarevaam@student.bmstu.ru

SPIN-code: 8015-1156

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

---

### Abstract

The article reveals main features of 3D modeling for further 3D printing with plastic and possible problems of additive technologies, as well as their solutions. A description of possible methods for improving the quality of a printed part and increasing the accuracy of printing on a 3D printer is given. The paper considers programs for preparing and optimizing a three-dimensional model before printing on a 3D printer. The authors gave a concept of surrogate modeling, studied the possibility of using surrogate modeling to increase the accuracy of three-dimensional printing and described a strategy for creating such a model. A surrogate model has been obtained, which can be entered into the program for slicing layers for further printing with greater printing accuracy.

### Keywords

Additive technologies, STL file, 3D printing, 3D modeling, printing accuracy, surrogate modeling, prototyping, SolidWorks, computer-aided design, optimization

Received 02.07.2020

© Bauman Moscow State Technical University, 2020

---

### References

- [1] Evans B. Practical 3D printers. The science and art of 3D printing. Apress, 2012.
- [2] Mikhaylova A.E., Doshina A.D. 3D-printer — future technology. *Molodoy uchenyy* [Young Scientist], 2015, no. 20(100), pp. 40–44 (in Russ.).
- [3] Additivnye tekhnologii i additivnoe proizvodstvo [Additive technologies and additive production]. *3d.globatek.ru: website* (in Russ.). URL: [https://3d.globatek.ru/world3d/additive\\_tech](https://3d.globatek.ru/world3d/additive_tech) (accessed: 10.05.2020).
- [4] Problemy kachestva 3D pechati i metody ustraneniya [3D quality problems and methods for solving them]. *myshop3d.ru: website* (in Russ.). URL: <https://myshop3d.ru/page/Problemy-kachestva-3D-pechati-i-metody-ustraneniya> (accessed: 12.05.2020).
- [5] Osnovy 3D-modelirovaniya dlya 3D-pechati [3D modelling foundations for 3D printing]. *habr.com: website* (in Russ.). URL: <https://habr.com/ru/post/417605> (accessed: 05.05.2020).
- [6] Pravila 3D-modelirovaniya dlya 3D-pechati [3D modelling rules for 3D printing]. *cubicprints.ru: website* (in Russ.). URL: <https://www.cubicprints.ru/tutorials/pravila-3d-modelirovaniya-dlya-3d-pechati> (accessed: 05.05.2020).
- [7] Luchshie slaysery dlya 3D-printera na russkom i angliyskom yazyke [The best slicers for 3D printer in Russian and English]. *top3dshop.ru: website* (in Russ.). URL: <https://top3dshop.ru/blog/best-slicers-for-3d-printer-rus-eng.html> (accessed: 12.05.2020).
- [8] Tri priema raboty v SOLIDWORKS pri modelirovanii detaley dlya 3D [Three SOLIDWORKS procedures at parts modelling for 3D]. *3-info.ru: website* (in Russ.). URL: <https://3-info.ru/post.php?post=11059> (accessed: 05.05.2020).

- [9] 3D pechat' v Blender: sozдание podkhodyashchey modeli [3D printing in Blender: making proper model]. *openarts.ru: website* (in Russ.). URL: <https://openarts.ru/blender-3d-printing-modeling> (accessed: 05.05.2020).
- [10] Programmy dlya 3D-printera: modelirovanie, slaysery, pechat' [Programs for 3D printer: modelling, slicers, printing]. *top3dshop.ru: website* (in Russ.). URL: <https://top3dshop.ru/blog/reviews/3d-printer-programs-modelling-slicing-fixing-printing.html> (accessed: 05.05.2020).
- [11] Fedorenko V.F., Golubev. I.G. Perspektivy primeneniya additivnykh tekhnologiy pri proizvodstve i tekhnicheskoy servise sel'skokhozyaystvennoy tekhniki [Application prospects of additive technologies at production and maintenance of agricultural machinery]. Moscow, Yurayt Publ., 2019 (in Russ.).
- [12] Programmy dlya 3D-printera [Programs for 3D printer]. *3dpt.ru: website* (in Russ.). URL: <https://3dpt.ru/page/soft> (accessed: 05.05.2020).
- [13] Vanderpol R. Testing 3D printer accuracy. Objet24 tolerance analysis. URL: <https://mindtribe.com/2016/09/our-trusty-creators-error-aka-objet24-tolerance-analysis> (accessed 05.05.2020).
- [14] Wu J. Study on optimization of 3D printing parameters. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2018, vol. 392, no. 6, art. 062050. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/392/6/062050>
- [15] Bazin M.M., Othman M.Z.M., Padzi M.M., et al. Optimisation of 3D printing parameter for improving mechanical strength of ABS printed parts. *Int. J. Mech. Eng. Technol.*, 2019, vol. 10, no. 1, pp. 255–260.
- [16] Bouhlel M.A., Hwang J.T., Bartoli N., et al. A Python surrogate modeling framework with derivatives. *Adv. Eng. Softw.*, 2019, vol. 135, art. 102662. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2019.03.005>
- [17] Kuleshov A.P., Bernshteyn A.V., Burnaev E.V. Adaptivnye modeli slozhnykh sistem na osnove obrabotki dannykh [Adaptive models of complex systems based on data processing]. *Mat. 3-y Mezhd. konf. po induktivnomu modelirovaniyu* [Proc. 3<sup>rd</sup> Int. Conf. on Inductive Modelling]. Kiev, 2010, pp. 64–71 (in Russ.).
- [18] Burnaev E.V., Prikhod'ko P.V. Surrogate models methodology for approximation of spatially nonuniform functions. *Trudy MFTI*, 2013, vol. 5, no. 4, pp. 122–132 (in Russ.).

**Svinareva A.M.** — Student, Department of Aerospace Systems, Bauman Moscow State Technical University, Russian Federation.

**Scientific advisor** — Kashfudinov B.D., Senior Lecturer, Department of Aerospace Systems, Bauman Moscow State Technical University, Russian Federation.

**Please cite this article in English as:**

Svinareva A.M. Surrogate 3D printing with defined precision. *Politekhicheskiy molodezhnyy zhurnal* [Politechnical student journal], 2020, no. 08(49). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2020-08-637.html> (in Russ.).