

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ 3D-ПЕЧАТИ НА РАЗМЕРНУЮ ТОЧНОСТЬ ИЗДЕЛИЙ

INFLUENCE OF 3D PRINTING PARAMETERS ON THE DIMENSIONAL ACCURACY OF PRINTED MODELS

УДК 004.925.84 : 655.222.343

В.В. Савицкий, А.Н. Голубев*, Д.И. Быковский
Витебский государственный технологический университет

<https://doi.org/10.24411/2079-7958-2018-13506>

V. Savitski, A. Holubeu*, D. Bykouski
Vitebsk State Technological University

РЕФЕРАТ

3D-ПЕЧАТЬ, АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, ПАРАМЕТРЫ ПЕЧАТИ, 3D-ПРИНТЕР, FDM, ТОЧНОСТЬ ПЕЧАТИ, КАЧЕСТВО ПЕЧАТИ

Предметом исследований являются влияние различных параметров 3D-печати на точность и качество получаемых изделий.

В ходе работы спроектированы тестовые модели, которые были распечатаны для дальнейшего анализа. На основе проведенных измерений выявлены ограничения на возможность распечатки мелких геометрических элементов модели, изучено влияние на точность получаемых изделий следующих параметров программного обеспечения 3D-принтера: настройка режима качества печати; настройка степени заполнения при печати; настройка коэффициента экструдирования.

Полученные данные могут быть использованы при распечатке деталей для управления их качеством и точностью. Результаты работы будут использованы при разработке прикладного приложения для подготовки 3D-модели к печати.

ABSTRACT

3D PRINTING, ADDITIVE MANUFACTURING, 3D PRINTING PARAMETERS, 3D PRINTER, FDM, 3D PRINTING ACCURACY, 3D PRINTING QUALITY

The subject of research is the influence of different 3D printing parameters on accuracy and quality of the final product.

During the work test models were designed. They were printed for further analysis. Based on the measurements made, limitations on the ability to print small geometric elements of the model are revealed. The influence on the resulting products accuracy of the following parameters of the 3D printer software has been studied: the print quality mode setting; the fill density setting; adjustment of the extrusion ratio.

The data obtained can be used for details printing to control their quality and accuracy. The results of the work will be used to develop an application for preparing a 3D model for printing.

ВВЕДЕНИЕ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

3D-принтер – это периферийное устройство, использующее метод послойного создания физического объекта по цифровой 3D-модели. Трёхмерная печать может осуществляться с использованием различных материалов и разными способами, но в основе любого из них лежит принцип послойного создания (выращивания) твёрдого объекта [1].

Применение 3D-принтеров охватывает очень широкую сферу деятельности людей. Область использования 3D-печати расширяется, совершенствуются методы печати, находят применение новые материалы, улучшается качество, точность и прочность получаемых изделий. Принтеры для трехмерной печати уменьшаются в размерах, становятся доступнее и проще. В связи с этим исследования процессов 3D-печати являются

* E-mail: a_golubev@tut.by (A. Holubeu)

актуальными [2].

В настоящее время наиболее широкое распространение получила 3D-печать полимерными материалами по технологии послойного наплавления (FDM – Fused Deposition Modeling), которая используется как для получения прототипов, так и для изготовления мелких партий изделий различного назначения. При отработке технологии 3D-печати важной проблемой является получение изделий с геометрической формой и размерами, соответствующими заданным требованиям.

Особенности технологии FDM-печати (послойное построение детали снизу вверх) неизбежно накладывают ограничения на форму и размеры элементов детали, которые могут быть распечатаны. Поэтому одной из актуальных задач является выработка рекомендаций по технологичности конструкции изделий, подлежащих 3D-печати.

На отклонения формы и размеров изделий большое влияние оказывают технологические режимы работы экструзионных головок 3D-принтера, которые задаются через настройки специализированного программного обеспечения, осуществляющего генерацию управляющего G-кода. Важной задачей является определение оптимальных значений настроек, обеспечивающих получение максимально точных по размерам изделий, а также создание прикладных приложений, выполняющих предварительный

анализ геометрии 3D-модели и позволяющих автоматизировать выбор оптимальных настроек печати.

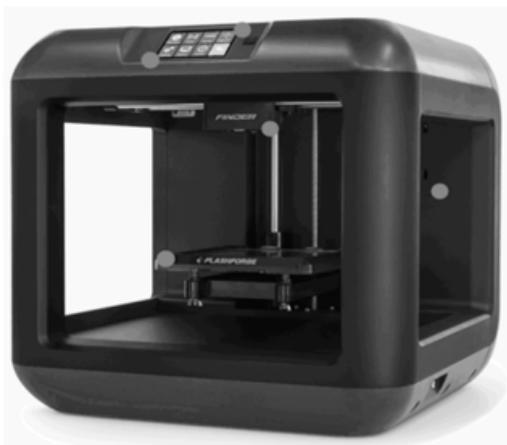
В данной статье приведены результаты экспериментальных исследований, выполненных с целью решения перечисленных выше задач для условий печати на 3D-принтерах моделей Flashforge Finder и Flashforge Dreamer.

ОБОРУДОВАНИЕ И МАТЕРИАЛЫ

Экспериментальные исследования проводились на 3D-принтере Flashforge Finder, установленном в лаборатории аддитивных технологий «Центр прототипирования» Витебского государственного технологического университета [3]. Для исследования влияния коэффициента экструдирования на размерную точность и качество печати дополнительно использовался 3D-принтер Flashforge Dreamer [4]. Общий вид принтеров показан на рисунке 1. Технические характеристики устройств приведены в таблице 1.

Для подготовки 3D-модели к печати и настройки параметров печати использовалось специальное программное обеспечение, разработанное производителем принтера FlashPrint [5].

Оценка размерной точности и качества печати производилась для 3D-модели, которая была построена в САПР КОМПАС-3D. Модель имеет геометрические элементы различной формы и размеров (рисунок 2). В таблице 2 приведены размеры геометрических элементов тестовой



а



б

Рисунок 1 – Используемые принтеры: а – Flashforge Finder, б – Flashforge Dreamer

Таблица 1 – Технические характеристики 3D-принтеров Flashforge Finder и Flashforge Dreamer

Модель принтера	Flashforge Finder	Flashforge Dreamer
Технология печати	FDM (послойное наплавление)	FDM (послойное наплавление)
Рабочий материал	PLA (полилактид)	ABS-пластик
Рабочая область построения, мм	140 x 140 x 140	230 x 150 x 140
Толщина слоя, мм	0,05–0,3	0,1–0,5
Количество печатающих головок	1	1
Заявленная точность печати, мкм	100–200	100



Рисунок 2 – Внешний вид тестовой модели: а – 3D-модель, б – распечатанное изделие

Таблица 2 – Размеры геометрических элементов тестовой модели

Геометрический элемент	Размеры элементов									
	ширина выступа, мм	0,5		0,75		0,9		1		
шаг зубчатой рейки, мм	0,25		0,5		0,75		1		2	
ширина паза, мм	0,1	0,25	0,5	0,75	1,43	1,44	1,46	8,69	13,01	
шаг резьбы, мм	0,5					0,7				
перемычка между отверстиями, мм	0,5			1			2		3	
угловые размеры	10°30'					15°10'				
диаметры отверстий, мм	4			7,6			9,09			
межосевое расстояние, мм	27,6									
сторона квадратного паза, мм	4									

модели. Модель была распечатана на 3D-принтере Flashforge Finder.

Для измерений распечатанных изделий использовали штангенциркуль с ценой деления 0,05 мм, микрометр с ценой деления 0,01 мм. Геометрическая форма мелких элементов исследовалась с помощью поста микроконтроля Planar МК-3 на базе микроскопа МИ-1, позволяющего измерять линейные размеры деталей с точностью до 0,0005 мм.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

В ходе исследования на тестовых моделях изучалась возможность распечатки мелких геометрических элементов для рассматриваемых принтеров и рабочего материала, а также влияние входных параметров на абсолютное и относительное отклонение действительных размеров распечатанных изделий от номинальных значений.

При подготовке моделей и проведении пробных экспериментов были отобраны следующие параметры, которые могут оказывать влияние на качество и точность деталей.

1. Степень заполнения (Fill Density), которая выражается процентом заполнения структурами поддержки внутренней полости модели в ходе печати.

2. Коэффициент экструдирования (Extrusion Ratio), позволяющий управлять интенсивностью подачи материала в печатающую головку принтера. Этот параметр задает отношение реального количества материала, расходуемого на один слой, к номинальному. Данный параметр задает-

ся в процентах и составляет от 80 до 125 %.

3. Различные настройки, определяющие толщину (высоту) и количество укладываемых слоев при печати изделия.

4. Число проходов при построении оболочки (то есть число проходов при построении внешнего контура изделия на каждом слое). Данный параметр влияет на толщину оболочки изделия – чем он выше, тем больше толщина оболочки.

5. Стандартные наборы настроек качества печати (Resolution), определенные производителем принтера. Пользователю доступны четыре предопределенных режима качества печати: низкое; стандартное; высокое; наилучшее. При выборе одного из режимов автоматически включается соответствующий набор параметров (толщина и количество слоев, скорость движения печатающей головки во время рабочих и холостых перемещений). Значения основных параметров, входящих в стандартные наборы настроек, приведены в таблице 3.

Были распечатаны 5 тестовых моделей с различными наборами перечисленных выше параметров. Также было распечатано несколько партий моделей в виде кубов с длиной ребра 10 мм и 20 мм. Результаты экспериментальных исследований обрабатывались методами математической статистики.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Минимальные размеры мелких элементов тестовых моделей

При оценке качества печати и измерениях, выполненных на микроскопе МИ-1 (рисунок 3)

Таблица 3 – Значения основных параметров, входящих в стандартные наборы настроек качества печати

Название параметра	Принимаемые значения в зависимости от качества печати			
	Низкое	Среднее	Высокое	Наилучшее
Толщина первого слоя, мм	0,30	0,27	0,21	0,20
Толщина последующих слоев, мм	0,30	0,18	0,14	0,08
Число проходов при построении оболочки	2	2	3	3
Степень заполнения, %	10	15	15	15
Коэффициент экструдирования, %	109	109	109	109

выявлено, что алгоритм печати не позволяет получать на готовом изделии элементы с размерами меньше определенных значений, а именно:

- с толщиной выступов менее 0,75 мм при всех режимах качества;
- с толщиной пазов менее 0,5 мм при режиме низкого качества и менее 0,25 мм на моделях стандартного качества и выше;
- с шагом зубчатой рейки менее 0,25 мм при всех режимах качества;
- с шагом резьбы 0,5 мм на моделях стандартного качества и выше.

Отклонения действительных размеров геометрических элементов тестовых моделей от номинальных значений

Качество печати крупных (более 5 мм) геометрических элементов оценивалось по абсолютному и относительному отклонению действительного размера элемента на распечатанном изделии по сравнению с номинальным размером, заданным при построении 3D-модели. Результаты измерений открытого паза (внутренний размер) с номинальным значением 8,69 мм и ширины модели (наружный размер) с номинальным значением 40 мм приведены в таблице 4.

Влияние степени заполнения и режима качества печати на размерную точность тестовых моделей

Исследования степени заполнения проводились также в работе [6]. В ней использовал-

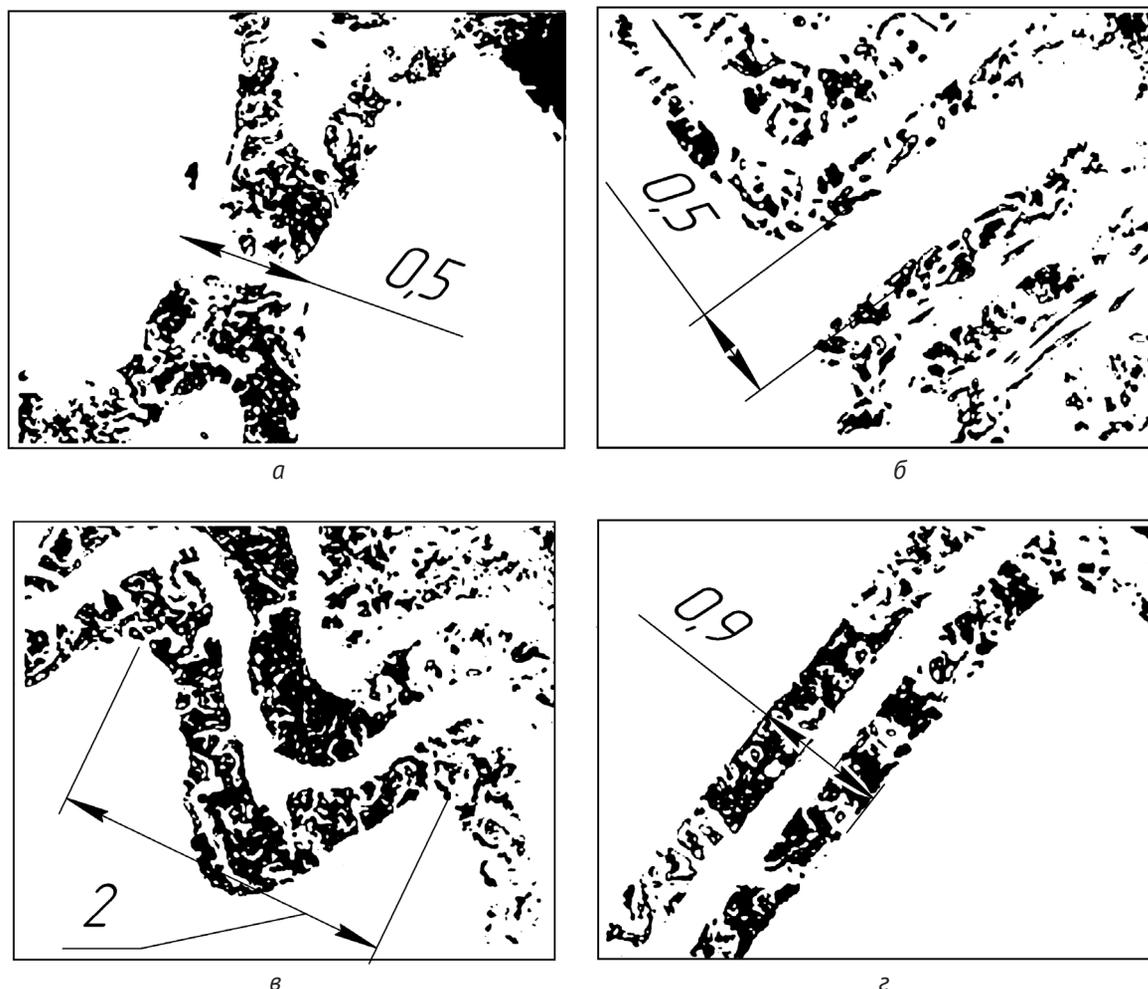


Рисунок 3 – Измерение элементов модели на микроскопе (размеры – в миллиметрах): а – перемычка между отверстиями; б – ширина паза; в – шаг зубчатой рейки; г – толщина выступа

Таблица 4 – Результаты измерений тестовых моделей

Режим качества; степень заполнения	Номинальный внутренний размер 8,69 мм			Номинальный наружный размер 40 мм		
	действительный размер в изделии, мм	действительное отклонение		действительный размер в изделии, мм	действительное отклонение	
		абсолютное, мм	относительное, %		абсолютное, мм	относительное, %
Низкое; 15 %	8,51	-0,18	-2,1	40,28	0,28	0,7
Низкое; 75 %	8,47	-0,22	-2,5	40,26	0,26	0,7
Стандартное; 15 %	8,48	-0,21	-2,4	40,18	0,18	0,5
Высокое; 15 %	8,45	-0,24	-2,7	40,10	0,10	0,3
Наилучшее; 15 %	8,55	-0,14	-1,6	40,11	0,11	0,3

ся 3D-принтер Maker Bot Replicator 2. Согласно данным этой работы степень заполнения оказывает влияние на размерную точность деталей. В отличие от результатов из [6], в нашем случае влияние степени заполнения на размерную точность оказалось несущественным: разница размеров деталей с различной степенью заполнения составила менее 0,05 мм в абсолютной величине и менее 1 % в относительной величине (таблица 4).

Аналогично смена одного стандартного режима качества печати на другой, которая вызывает изменение сразу многих параметров, не влияет существенно на размерную точность. При этом внутренние размеры в изделии, по сравнению с номинальными, уменьшились, наружные – увеличились. Предполагается, что такой результат может быть объяснен увеличенным значением коэффициента экструдирования 109 % в ходе печати, которое является частью стандартных наборов настроек для всех режимов качества печати.

Размерная точность по высоте изделия

Поскольку распечатка изделия происходит послойно снизу вверх, на размерную точность изделия по высоте существенное влияние могут оказывать настройки, задающие высоту первого и последующих слоев материала, выходящего из экструзионной головки. В настройках высоты слоев, задаваемых по умолчанию стандартными режимами печати, не учитываются габаритные размеры модели по высоте, что может приводить к снижению размерной точности. С целью оценки точности печати по высоте и изучения

влияния высоты слоев на размерную точность были распечатаны изделия в виде куба с номинальным размером ребра 10 мм.

Путем подбора оптимальных сочетаний высоты первого слоя при печати и остальных слоев удалось распечатать изделия с отклонениями размеров по высоте менее 0,1 мм (таблица 5). Экспериментально подтверждено, что для достижения максимальной размерной точности по высоте необходимо соблюдение следующего условия: сумма высот первого и последующего слоев материала должна быть как можно ближе к значению номинального размера высоты модели.

Влияние режимов печати на размеры вдоль осей изучалось также в исследовании [7], посвященном 3D-печати пористых образцов костной ткани. Как следует из опубликованных данных, размеры вдоль различных координатных осей имеют различия. По результатам наших исследований, также наблюдается различие размеров по осям координат: размеры по оси **Oy** в готовом изделии оказались в среднем в 1,03 раза большими, чем размеры по оси **Ox**.

Влияние коэффициента экструдирования на размерную точность тестовых моделей

Стандартным установленным значением коэффициента экструдирования для всех predeterminedных производителем режимов качества печати является 109 %. Для оценки влияния коэффициента экструдирования на размерную точность были распечатаны модели в виде куба с длиной ребра 10 мм на принтере Flashforge Finder из PLA-пластика и на принтере

Таблица 5 – Результаты измерений распечатанных изделий в виде куба с длиной ребра 10 мм

	Размер по оси Ox , мм	Размер по оси Oy , мм	Высота, мм
Образец 1	10,08	10,45	10,05
Образец 2	10,14	10,435	10,05
Образец 3	10,07	10,41	10,05
Образец 4	10,155	10,44	10,04
Образец 5	10,08	10,43	10,05
Среднее	10,11	10,43	10,05
Отношение размеров Oy/Ox	1,03		

Таблица 6 – Влияние коэффициента экструдирования на отклонения размеров при печати на принтере Flashforge Finder

	Коэффициент экструдирования, %				Абсолютное приращение размера, мм	
	90		109		по оси Ox	по оси Oy
	размер по оси Ox , мм	размер по оси Oy , мм	размер по оси Ox , мм	размер по оси Oy , мм		
Образец 1	9,77	9,95	9,89	10,09	0,13	0,13
Образец 2	9,87	9,96	10,03	10,09		
Образец 3	9,87	9,91	9,98	10,04		
Среднее	9,84	9,94	9,97	10,07		
Стандартное отклонение	0,058	0,026	0,071	0,029		
Доверительный интервал	0,07	0,03	0,09	0,04		
Отношение размеров Oy/Ox	1,01		1,01			

Flashforge Dreamer из ABS-пластика. В таблице 6 и на рисунке 4 показаны результаты измерений распечатанных изделий. Абсолютное приращение размера в таблице 6 представляет собой разность средних размеров, полученных при значениях коэффициента экструдирования 109 % и 90 % по соответствующим осям. Согласно полученным данным наблюдается зависимость абсолютных отклонений размеров от коэффициента экструдирования. Разность средних размеров по каждой горизонтальной оси координат при значении коэффициента экструдирования 109 % и 90 % оказалась одинаковой и составила 0,13 мм.

Влияние числа проходов при построении оболочки

Для оценки влияния настройки числа про-

ходов при построении оболочки на размерную точность были распечатаны две партии изделий в виде куба с номинальным размером длины ребра 20 мм.

Результаты измерений распечатанных изделий приведены в таблице 7. Как видно, данный параметр оказывает достаточно сильное влияние на точность печати. Наилучшие показатели средней точности (в пределах 0,1 мм) получены при значении данного параметра, равном 3.

ВЫВОДЫ
В результате выполнения работы получены экспериментальные данные и выявлены закономерности в отношении геометрической точности печати изделий из PLA-пластика на принтере Flashforge Finder.

1. Алгоритм печати не позволяет получать на

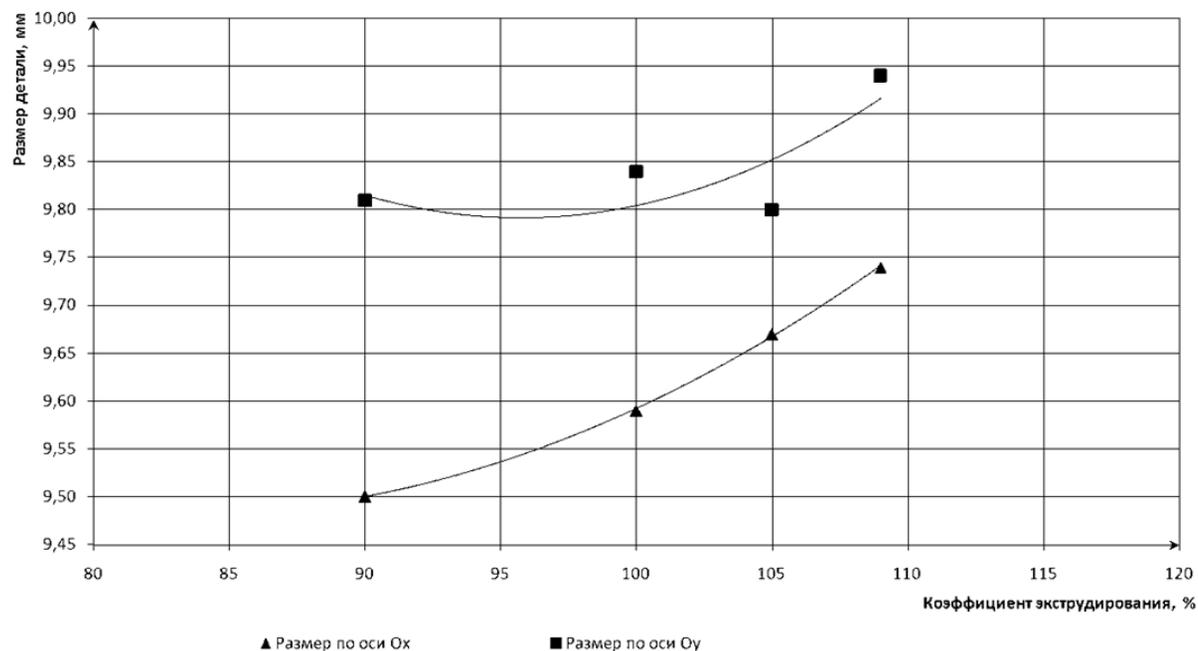


Рисунок 4 – Влияние коэффициента экструдирования на размеры изделий при печати на принтере Flashforge Dreamer

Таблица 7 – Исследования числа проходов для построения оболочки

Число проходов	Размер по оси Oх, мм	Размер по оси Oу, мм
1	19,84	19,96
	19,78	19,93
	19,71	19,88
	Среднее: 19,78	Среднее: 19,92
3	20,0	20,10
	19,90	20,03
	20,03	20,13
	Среднее: 19,98	Среднее: 20,09
4	19,98	20,13
	20,01	20,17
	19,86	20,11
	Среднее: 19,95	Среднее: 20,14
10	20,11	20,32
	20,065	20,34
	20,12	20,33
	Среднее: 20,10	Среднее: 20,33

готовом изделии элементы с размерами меньше определенных значений, а именно:

- с толщиной выступов менее 0,75 мм при всех режимах качества;
- с толщиной пазов менее 0,5 мм при режиме низкого качества и менее 0,25 мм на моделях стандартного качества и выше;
- с шагом зубчатой рейки менее 0,25 мм при всех режимах качества;
- с шагом резьбы 0,5 мм на моделях стандартного качества и выше.

2. Влияние степени заполнения на размерную точность образцов не существенно.

3. Смена одного стандартного режима качества печати на другой не влияет существенно на размерную точность.

4. После печати внутренние размеры в изделии, по сравнению с номинальными, уменьшились, наружные – увеличились. Предполагается, что такой результат может быть объяснен увеличенным значением коэффициента экструдирования 109 % в ходе печати.

5. Экспериментально подтверждено, что для достижения максимальной размерной точности по высоте необходимо соблюдение следующего

условия: сумма высот первого и последующего слоев материала должна быть как можно ближе к значению номинального размера высоты модели.

6. Наблюдается пропорциональная зависимость абсолютных отклонений размеров от коэффициента экструдирования. Этот вывод также является справедливым для принтера Flashforge Dreamer при печати изделий из ABS-пластика.

7. Число проходов при построении оболочки, определяющее ее толщину, оказывает достаточно сильное влияние на точность печати. Наилучшие показатели были получены при значении данного параметра, равном 3.

Полученные наборы экспериментальных данных легли в основу при разработке прикладного приложения, позволяющего автоматизировать выбор настроек принтера в зависимости от заданных условий с учетом анализа геометрии 3D-модели [8].

Полученные результаты могут быть полезными при обоснованном выборе оптимальных значений настроек с целью повышения качества распечатанных изделий для соответствующих моделей принтеров и материалов изделий.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Технологии 3D-печати, [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.ixbt.com/printer/3d/3d_tech.shtml. – Дата доступа: 20.06.2018.
2. Зачем нужны 3D-принтеры, [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://pechat-3d.ru/3d-printer/primenenie/3d-printer-primenenie.html>. – Дата доступа: 20.06.2018.
3. Flashforge Finder 3D-Printer. UserGuide, [Электронный ресурс]. – Режим доступа:<http://static.creativetools.se/misc/doc/flashforge/finder/Finder-User-Guide.pdf>. – Дата доступа: 20.06.2018.
4. Flashforge Dreamer, [Электронный ресурс]. –

REFERENCES

1. Technologies 3D-pechati [3D-Printing Technologies], (2018), available at: http://www.ixbt.com/printer/3d/3d_tech.shtml (accessed 20 June 2018).
2. Zachemnuzhny 3D-printery [Why do we need 3D-printers], (2018), available at: <http://pechat-3d.ru/3d-printer/primenenie/3d-printer-primenenie.html> (accessed 20 June 2018).
3. Flashforge Finder 3D-Printer. UserGuide, (2018), available at: <http://static.creativetools.se/misc/doc/flashforge/finder/Finder-User-Guide.pdf> (accessed 20 June 2018).
4. Flashforge Dreamer, (2018), available at: <https://www.3dhubs.com/3d-printers/flashforge->

- Режим доступа: <https://www.3dhubs.com/3d-printers/flashforge-dreamer>. – Дата доступа: 11.10.2018.
5. The Latest Flashforge Software, Firmware, and User Manual Download, [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.flashforge.com.hk/downloads.html>. – Дата доступа: 20.06.2018.
 6. Garrett W. Melenka (2015), Evaluation of dimensional accuracy and material properties of the MakerBot 3D-desktop printer, *Rapid Prototyping Journal*, 2015, № 21.
 7. Farzadi, A. (2014), Effect of Layer Thickness and Printing Orientation on Mechanical Properties and Dimensional Accuracy of 3D-Printed Porous Samples for Bone Tissue Engineering, *PLOS*, 2014, № 9.
 8. Библиотека анализа моделей для 3D-печати, [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://edu.ascon.ru/main/competition/gallery/items/?bm_id=65174. – Дата доступа: 20.06.2018.
 - dreamer (accessed 11 October 2018).
 5. The Latest Flashforge Software, Firmware, and User Manual Download, (2018), available at: <http://www.flashforge.com.hk/downloads.html> (accessed 20 June 2018).
 6. Garrett W. Melenka (2015), Evaluation of dimensional accuracy and material properties of the MakerBot 3D-desktop printer, *Rapid Prototyping Journal*, 2015, № 21.
 7. Farzadi, A. (2014), Effect of Layer Thickness and Printing Orientation on Mechanical Properties and Dimensional Accuracy of 3D Printed Porous Samples for Bone Tissue Engineering, *PLOS*, 2014, № 9.
 8. Библиотека анализа моделей для 3D-печати [3D-printing models analyse library], (2018), available at: http://edu.ascon.ru/main/competition/gallery/items/?bm_id=65174 (accessed 20 June 2018).

Статья поступила в редакцию 27.08.2018 г.