

DOI: 10.12737/article_5c1c9969a10128.83957539

^{1,*}Варнавский А.Н., ²Гадельшин А.Р., ²Салин Д.С.¹Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»

Россия, 101000, г. Москва, ул. Мясницкая, д. 20

²Рязанский государственный радиотехнический университет

Россия, 390005, Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1

*E-mail: avarnavsky@hse.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПЕЧАТИ НА КАЧЕСТВО И СООТНОШЕНИЕ ЦЕНА/КАЧЕСТВО РЕЗУЛЬТАТА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ НА БЮДЖЕТНОМ 3D-ПРИНТЕРЕ

Аннотация. Работа посвящена разработке и созданию недорогого 3D-принтера и моделей, описывающих качество и соотношение цена/качество результата изготовления изделий на таком принтере. Актуальность данной работы обусловлена тем, что подобные исследования позволят создавать бюджетную аппаратуру, которая будет осуществлять 3D-печать в соответствии с критерием минимизации соотношения цена/качество. На основе регрессионного анализа результатов эксперимента по изготовлению на полученном 3D-принтере кубиков с разными параметрами печати построены линейная и логистическая регрессии. Линейная регрессия позволяет оценить уровень качества результата изготовления в зависимости от параметров печати, а логистическая регрессия - классифицировать и предсказать вероятность изготовления объектов с низким и высоким уровнями качества. Логистическая модель позволяет верно классифицировать качество напечатанных кубиков в зависимости от параметров их печати в 81 % случаев. Проанализировано влияние каждого из параметров печати на качество и результат классификации и получено, что важность параметра «скорость подачи филамента» в 1,5 раза превышает важность параметра «высота слоя печати». Построена модель зависимости времени печати от показателей скорости подачи филамента и высоты слоя печати, которая показала, что важность показателя «высота слоя печати» в 2,6 раз превышает важность показателя «скорость подачи филамента». Построена модель, описывающая соотношение цена/качество для результата изготовления. Используя данную модель, можно найти оптимальные значения скорости подачи филамента и высоты слоя печати, при которых будет минимальным соотношение цена/качество результата изготовления.

Ключевые слова: 3D-принтер, качество печати, параметры печати, бракованные слои, линейная модель, логистическая регрессия, соотношение цена/качество.

Введение. На сегодняшний день аддитивные технологии занимают все более важное значение в различных отраслях народного хозяйства, в частности, в медицине (например, [1]), авиакосмической отрасли (например, [2]), строительстве (например, [3]), машиностроении (например, [4]), пищевой промышленности [5] и т.д. Данные технологии появились на рынке относительно недавно, но в динамике развития опережают остальные отрасли производства. Так если в 2015 г. их объем оценивался порядка 11 млрд. долларов США, то по прогнозам в 2019 г. превысит 26 млрд. Одним из направлений применения аддитивных технологий является создание макетов и прототипов различных объектов и изделий, осуществляемое с использованием 3D-принтеров [например, 6].

В российской и зарубежной литературе поднимаются различные вопросы, касающиеся оптимизации процесса 3D-печати и повышения качества ее результатов, а также настройки, калибровки и изготовления 3D-принтеров.

Так в работе [7] представлена классификация дефектов 3D-печати по источнику возникновения и показана возможность автоматизации поиска решений по их устранению. Во многом аналогичный подход рассмотрен и в работе [8], в которой предложено параметры нестационарного процесса формирования изделия и типовые дефекты 3D-печати сохранять в базе знаний. Соответственно, такую информацию совместно с результатами моделирования предлагается использовать для формирования рекомендаций по улучшению качества изделий [8]. Задача обеспечения и контроля качества, оценки риска возникновения дефектов, изменения прочности материала изделия, состоящего из волокон ячеистой структуры и изготавливаемого методом 3D-печати на примере полилактида, рассматривается в работе [9].

Вопросы оптимизации 3D-печати шоколада на основе учета корреляций между тепловыми и потоковыми свойствами и структурными особенностями 3D-модели исследуются в работе [10]. В работе [11] описано использование разработанной технологии μ CLIP для точной 3D-печати

биомедицинских изделий, обеспечивающей компромисс между скоростью и качеством печати. Основные аспекты топологической оптимизации 3D-печати выделены и проанализированы с использованием различного программного обеспечения в работе [12].

В работе [13] осуществлена разработка новых конструкций 3D-принтера для пищевой промышленности на основе геля из лимонного сока, а также исследовано влияние параметров печати на качество изготовленных продуктов. Отдельно можно выделить работы, посвященные разработке и использованию недорогих, бюджетных 3D-принтеров. Так, например, работа [14] посвящена созданию 3D-принтера, разработанного на основе технологии SLA и являющегося низкобюджетным. В [15] исследуются вопросы, связанные с оптимальными методами настройки и параметрической калибровкой недорогих 3D-принтеров, а также влиянием программного обеспечения по нарезке на слои 3D-модели на качество результата печати.

В то же время ряд вопросов, связанных с 3D-печатью, остаются открытыми. В частности, актуальной задачей является построение моделей, описывающих влияние различных факторов на соотношение цена/качество результата печати, в том числе недорогих 3D-принтеров. Подобные исследования позволят создавать аппаратуру, которая будет осуществлять 3D-печать в соответствии с критерием минимизации/максимизации соотношения цена/качество. Особенно это актуально в свете того, что в настоящее время развивается направление создания многофункциональных 3D-принтеров, которые могут воспроизводить себе подобную конструкцию на 80 %, в том числе с установкой вместо экструдера шпинделя или лазера. Поэтому необходимы модели, прогнозирующие уровень качества такой новой конструкции.

Целью работы является разработка и создание недорогого 3D-принтера, а также моделей, описывающих качество и соотношение цена/качество результата изготовления изделий на таком принтере.

Для достижения поставленной цели в работе решались следующие задачи.

1. Разработка конструкции, модели 3D-принтера и блока его управления.
2. Создание 3D-принтера.
3. Проведение серии экспериментов по оценке качества 3D-печати.
4. Регрессионный анализ полученных экспериментальных данных. Разработка моделей, описывающих качество и соотношение цена/качество результата изготовления изделий на 3D-принтере.

Разработка конструкции, модели 3D-принтера и блока его управления. Разработку 3D-принтера начнем с создания моделей самого принтера и его составных частей. Используем инженерный анализ для оптимизации конструкций. Процессы разработки моделей принтера, его составных частей и их инженерный анализ выполним в САД и САЕ системах КОМПАС-3D.

Основными составляющими разрабатываемого 3D-принтера являются рама, подогреваемый стол, блок питания, устройство управления, 4 шаговых двигателя, экструдер. Полученная 3D модель принтера представлена на рис. 1.

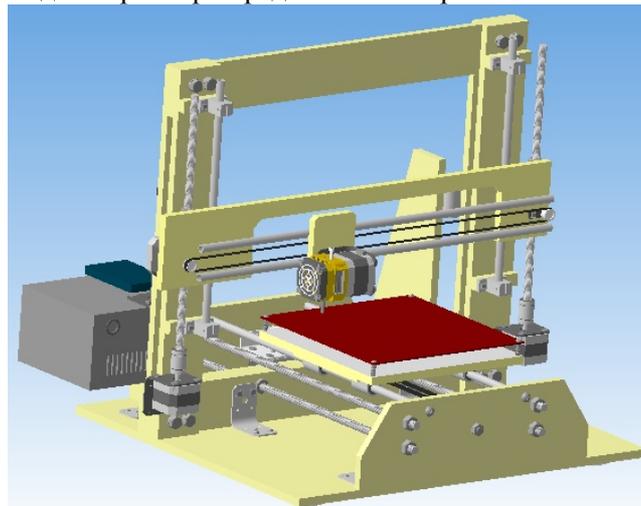


Рис. 1. 3D модель разрабатываемого 3D-принтера

Для оценки прочности разработанной конструкции при эксплуатации в САЕ системе с использованием библиотеки APM FEM выполним прочностной анализ. В процессе этого анализа будем задавать закрепления исследуемых объектов, приложенные нагрузки и конечно-элементную сетку.

Покажем результат прочностного анализа детали «Направляющая». Поскольку стол принтера массой $m = 2$ кг передвигается по двум направляющим, нагрузка на которые распределяется равномерно, в соответствии со вторым законом Ньютона линейная нагрузка Fl на одну деталь «Направляющая» равна

$$Fl = mg/2 = 9,8 \text{ Н.}$$

Выберем материал для изготовления направляющих – алюминий, который обладает следующими свойствами, влияющими на прочность конструкции и распределение нагрузок: предел текучести – 195 МПа, плотность – 2712 кг/м³, теплопроводность – 202 Вт/(м·°С), предел текучести – 110 МПа, относительное удлинение – 12 %.

Установим закрепления с торцов детали и приложим линейную нагрузку $Fl = 9,8$ Н. Резуль-

таты анализа показали, что эквивалентное напряжение по Мизесу равняется 4.3 МПа, минимальный предел текучести превышает значение, при котором деформация продолжала бы расти без увеличения напряжения, в 54,5 раз, минимальный коэффициент запаса по прочности выше в 95,2 раз. По этим данным сделан вывод, что в конструкции 3D-принтера можно использовать

направляющие с меньшим диаметром или меньшей толщиной стенки. По расчету суммарного линейного перемещения, максимальное значение которого равно 0,03 мм, можно сделать вывод, что возможно использование более текучего металла. На рис. 2 в качестве примера приведена диаграмма коэффициента запаса по прочности.

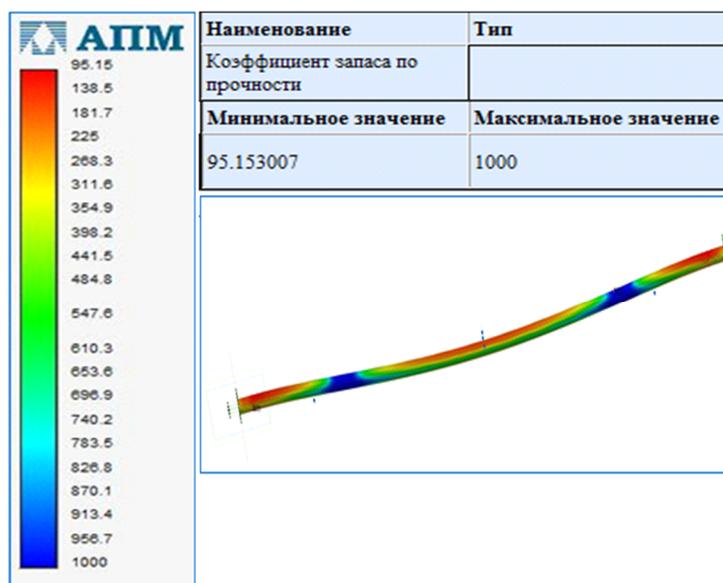


Рис. 2. Диаграмма коэффициента запаса по прочности

Устройство управления принтера реализуем на основе контроллера Arduino Mega 2560, который будет осуществлять управление работой 3D-принтера посредством команд в G-коде, и платы расширения Ramps 1.4, через которую силовая часть принтера будет подключаться к контроллеру.

Изготовление 3D принтера и блока его управления. Учитывая результаты моделирования и инженерного анализа конструкции, изготовим составные части 3D-принтера. Раму выполним из фанеры толщиной 10 мм, направляющие – из алюминия, крепежные уголки – из стали 2 мм. Используем резьбовые шпильки с метрической резьбой M10 и линейные подшипники диаметром 10 мм под алюминиевые направляющие.

На Ramps 1.4 установим драйверы шаговых двигателей A4988 с допустимым током до 2 А и подключим шаговые двигатели Nema17, нагревательный стол, экструдер, термисторы и концевые выключатели. Используем блок питания напряжением 12 В и мощностью 240 Вт. Преобразование вращательного движения двигателя в поступательное осуществляется ременной передачей с использованием ремня GT2 шириной 6 мм.

Собранный из изготовленных составных частей 3D-принтер представлен на рис. 3.

Работа с изготовленным принтером осуществляется через программу Repetier-Host. Загруженная в Repetier-Host 3D модель изделия для изготовления в слайсере Slic3r нарезается на слои, и формируется управляющая программа в G-кодах, которая отправляется на Arduino Mega 2560.

Эксперименты по оценке качества 3D-печати. Для того чтобы построить аналитическую модель зависимости оценки уровня качества результата изготовления от параметров печати выделим следующие факторы: высота слоя печати (h), температура экструдера (T), скорость подачи филамента (пластиковой нити) (U), время печати (t), а откликом сделаем количество бракованных слоев (w) и процент бракованных слоев (ν) изготовленного изделия.

В качестве изготавливаемого изделия в данном эксперименте будем использовать кубик размером $20 \times 20 \times 20$ мм³. Пример результата работы слайсера Slic3r применительно к 3D модели такого кубика представлен на рис. 4.

Суть эксперимента заключается в изготовлении кубиков при разных значениях h , T , U , t : $h = \{0.1; 0.25\}$ мм, $T = \{210; 215; 220; 225; 230; 235; 240; 245; 250\}$ °С, $U = \{30; 40; 60\}$ мм/с, $t = \{490; 597; 755; 986; 1075; 1164\}$ с. Эксперименты проведем при температуре в помещении 22 °С. Температура нагревательного стола во

всех экспериментах равна 105 °С. Всего было изготовлено 32 кубика (рис. 5). У каждого кубика

подсчитывалось количество бракованных слоев и процент таких слоев от общего числа.

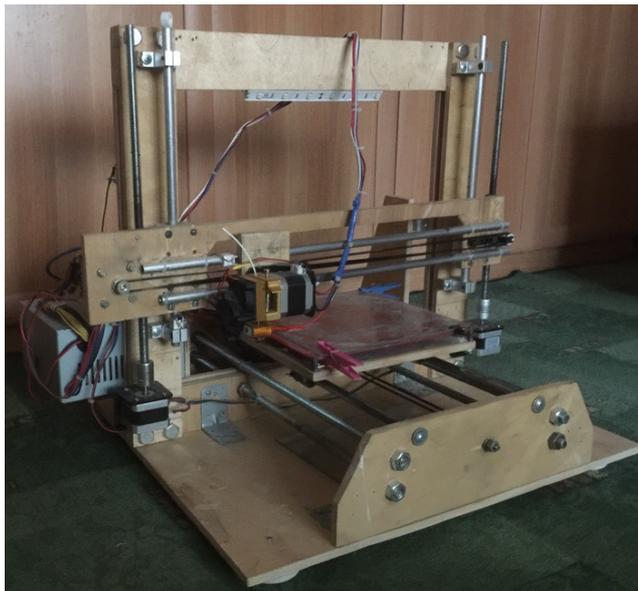


Рис. 3. Изготовленный 3D-принтер

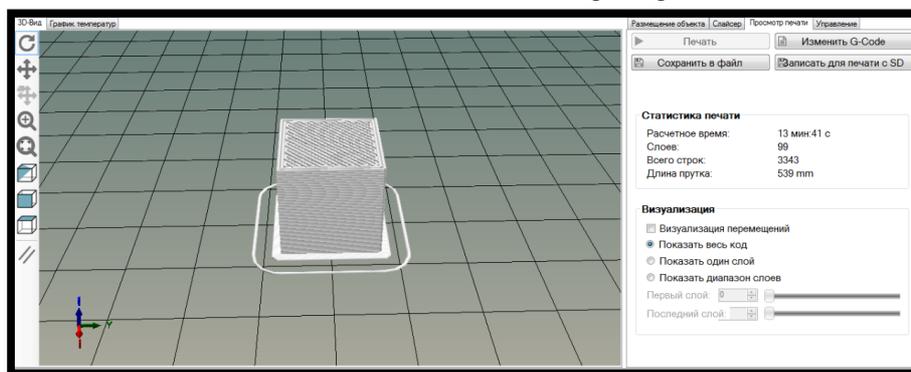


Рис. 4. Результат работы слайсера Slic3r



Рис. 5. Изготовленные в результате экспериментов

Разработка моделей. Анализ данных, полученных в результате эксперимента, выполним в пакете R.

Оценим коэффициенты корреляции между выделенными показателями h , T , U , t , w , y (рис. 6). Видим, что все выделенные показатели влияют на процент бракованных слоев. Уровни связи между соответственно высотой слоя печати, скоростью подачи филамента и процентом бракованных слоев положительные. Уровни связи между соответственно температурой экструдера,

временем печати и процентом бракованных слоев отрицательные. Можно отметить, что уровень связи между соответственно высотой слоя печати, временем печати и числом бракованных слоев слабые.

Построим регрессионные модели, описывающие влияние выделенных показателей на количество бракованных слоев в кубике и процент от общего их числа. При этом будем выполнять проверку мультиколлениарности и других предпосылок линейной модели.

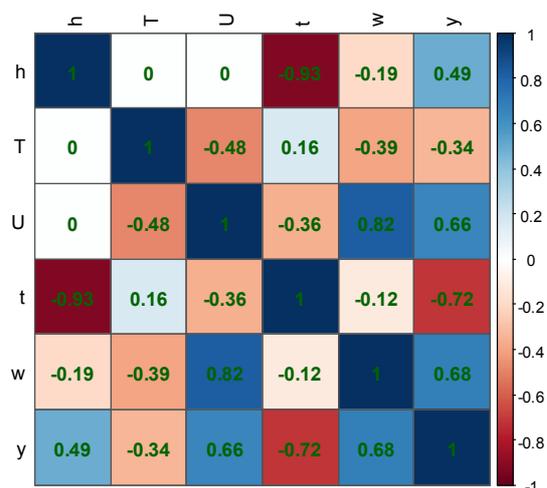


Рис. 6. Корреляционная матрица параметров печати и результата изготовления

Поскольку ставится задача построения моделей для оценки качества печати, то целесообразным будет преобразование зависимой переменной y , в частности извлечение квадратного корня. Такое преобразование продиктовано тем, что значения переменной y меньше 0,25 и извлекая квадратный корень мы усиливаем эти значения, приближая к 1, причем чем меньше значение, тем в большей степени оно усиливается. Таким образом, при построении регрессионной модели вместо y будем использовать y_2 : $y_2 = y^{0.5}$. Получим

$$w = -a_0 - a_1 \cdot h + a_2 \cdot U, \quad a_1 > 0, \quad a_2 > 0, \quad a_0 > 0, \\ p(a_1) < 0.1, \quad p(a_2) < 0.001$$

$$с R^2 = 0.7133 (F(2, 29) = 36.07, p < 0.001),$$

а также

$$y_2 = -b_0 + b_1 \cdot h + b_2 \cdot U, \quad b_1 > 0, \quad b_2 > 0, \quad b_0 > 0, \\ p(b_1) < 0.001, \quad p(b_2) < 0.001, \quad p(b_0) < 0.1$$

$$с R^2 = 0.7326 (F(2, 29) = 39.72, p < 0.001).$$

Поскольку y_2 может принимать значения от 0, в случае отсутствия дефектных слоев, до 1, в случае если все слои дефектные, то показатель качества Q можно будет определить, как

$$Q = 1 - y_2 = 1 + b_0 - b_1 \cdot h - b_2 \cdot U, \quad b_1 > 0, \quad b_2 > 0, \\ b_0 > 0. \tag{1}$$

Соответственно, данный показатель будет принимать значения в диапазоне от 0, в случае если все слои дефектные и изделие полностью некачественное, до 1, в случае полного отсутствия дефектных слоев, т.е. высокого качества изделия.

Оценим важность независимых переменных в моделях. Для этого перед построением регрессионной модели выполним преобразования всех переменных так, чтобы их средние значения равнялись 0, а стандартное отклонение – 1. В этом случае полученные в результате регрессионного анализа коэффициенты являются стандартизо-

ванными. В результате таких преобразований получили, что важность переменной U в 1,5 раза превышает важность переменной h .

Используя данные модели, можем оценить вклад каждой переменной в качество печати и наличие дефектов.

Осуществим построение логистической регрессии, которая позволит осуществить прогнозирование и классификацию уровню качества результата изготовления. Для этого введем уровень качества для процента бракованных слоев. При превышении процентом бракованных слоев данного значения изделие будет считаться низкокачественным, в противном случае – качественным. Соответственно переменная y_l , описывающая уровень качества, будет иметь 2 уровня: 0 – если изделие низкокачественное и 1 – если изделие качественное.

Получена следующая логистическая регрессия:

$$y_l(h, U) = 1/(1+e^{-(c_0 - c_1 \cdot h + c_2 \cdot U)}), \quad c_1 > 0, \quad c_2 > 0, \quad c_0 > 0, \\ p(c_1) < 0.01, \quad p(c_0) < 0.1$$

$$с AIC = 32.436.$$

Данная модель позволяет верно классифицировать качество напечатанных кубиков в зависимости от параметров их печати в 81 % случаев при использовании порогового уровня 0,52.

При рассмотрении соотношения цена/качество результата печати необходимо выделить затраты, связанные с печатью объектов. Эти затраты будут определяться расходом материала, машинным временем работы 3D-принтера, а также эксплуатационными издержками. Если считать, что расход на эксплуатацию принтера не зависит от параметров печати, то эксплуатационными затратами можно будет пренебречь. Будем рассматривать случай, когда затраты на машинное время значительно превышают затраты на расход материала, поскольку в противном случае цена будет определяться только расходом материала и не будет зависеть от параметров печати. Тогда цену (затраты) q будем определять, как

$$q = k \cdot t, \tag{2}$$

где k – коэффициент пропорциональности, связывающий значение времени печати t и величину затрат q .

Построим регрессионную модель, влияния параметров h и U на время печати кубика. Получим, что

$$t = d_0 - d_1 \cdot h - d_2 \cdot U, \quad d_1 > 0, \quad d_2 > 0, \quad d_0 > 0, \\ p(d_1) < 0.001, \quad p(d_2) < 0.001, \quad p(d_0) < 0.001 \tag{3}$$

$$с R^2 = 0.9864 (F(2, 29) = 1050, p < 0.001).$$

В данной модели важность переменной h в 2,6 раз превышает важность переменной U .

Для определения соотношения цена/качество W используем выражения (1)-(3). Получим:

$$W = \frac{q}{Q} = \frac{k(d_0 - d_1 \cdot h - d_2 \cdot U)}{1 + b_0 - b_1 \cdot h - b_2 \cdot U} = \frac{g_0 - g_1 \cdot h - g_2 \cdot U}{1 + b_0 - b_1 \cdot h - b_2 \cdot U}, \quad (4)$$

где $g_i = k \cdot d_i$, $i = 0..2$, $g_i > 0$.

Если требуется минимизировать отношение цена/качество результата изготовления, т.е. $W \rightarrow \min$, то необходимо найти такие h и U , при которых выражение (4) принимает минимальное значение.

Заключение. Учитывая актуальность задачи использования 3D-принтеров для изготовления некоторых объектов с заданным уровнем соотношения цена/качество, в работе осуществлена разработка и сборка недорогого 3D-принтера. Для этого проведено создание геометрических моделей составных частей и самого принтера и выполнены инженерные расчеты и оптимизация полученных конструкций. Разработана система управления принтером.

Проведен эксперимент по изготовлению на таком принтере кубиков с разными параметрами печати. Путем подсчета нормальных и бракованных слоев сделан вывод о качестве изготовления каждого кубика при его печати с теми или иными параметрами.

На основе регрессионного анализа построены линейная и логистическая регрессии. Линейная регрессия позволяет оценить уровень качества результата в зависимости от параметров печати, а логистическая регрессия – классифицировать и предсказать вероятность изготовления объектов с заданным уровнем качества. Проанализировано влияние каждого из параметров печати на качество и результат классификации, в результате чего получено, что важность показателя скорости подачи филамента в 1,5 раза превышает важность переменной высота слоя печати. В построенной модели зависимости времени печати от показателей скорости подачи филамента и высоты слоя печати важность последнего показателя в 2,6 раз превышает важность первого. Построена модель, описывающая соотношение цена/качество для результата изготовления. Используя данную модель, можно найти оптимальные значения скорости подачи филамента и высоты слоя печати, при которых будет минимальным соотношение цена/качество результата изготовления.

Дальнейшая работа в данном направлении подразумевает включение в модель большего числа факторов, а также использование методов машинного обучения или других видов регрессий для повышения точности прогнозирования результата 3D-печати в зависимости от параметров печати.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Карякин Н.Н., Горбатов Р.О., Новиков А.Е., Нифтуллаев Р.М.О. Хирургическое лечение пациентов с опухолями длинных трубчатых костей верхних конечностей с использованием индивидуальных имплантатов из костнозамещающего материала, созданных по технологиям 3D-печати // Гений ортопедии. 2017. № 3. С. 323–330.
2. Леоненков А.Д., Двирный В.В. Перспективы применения аддитивных технологий в аэрокосмической отрасли // Решетневские чтения. 2017. № 21-2. С. 632–633.
3. Лунева Д.А., Кожевникова Е.О., Калюшина С.В. Применение 3D-печати в строительстве и перспективы ее развития // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. 2017. №1. Т. 8. С. 90–101.
4. Чемодуров А.Н. Применение аддитивных технологий в производстве изделий машиностроения // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2016. № 8-2. С. 210–217.
5. Гришин А.С., Бредихина О.В., Помоз А.С., Пономарев В.Г., Красуля О.Н. Новые технологии в индустрии питания - 3D-печать // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Пищевые и биотехнологии. 2017. №2. Т. 4. С. 36–44.
6. Маликов А.А., Феофилов Н.Д., Сидоркин А.В., Янов Е.С. Использование 3D-принтеров для прототипирования деталей изоляторов токоъемных узлов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2015. № 8-1. С. 17–23.
7. Ивашкова К.П., Филиппов А.Н., Копасов Е.А. Анализ и систематизация дефектов 3D-печати // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2017. № 5. Т. 60. С. 426–430.
8. Колесников А.А. Ситуационное управление обеспечением качества изготовления изделий по аддитивной технологии // Образовательные ресурсы и технологии. 2017. № 4 (21). С. 84–92.
9. Петров В.М., Безпальчук С.Н., Яковлев С.П. О влиянии структуры на прочность изделий из пластиков, получаемых методом 3D-печати // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2017. №4 (44). С. 765–776.
10. Mantihal S., Prakash S., Godoi F.C., Bhandari B. Optimization of chocolate 3D printing by correlating thermal and flow properties with 3D structure modeling // Innovative Food Science & Emerging Technologies. 2017. Vol. 44. Pp. 21–29.
11. Webb B., Doyle B.J. Parameter optimization for 3D bioprinting of hydrogels // Bioprinting. 2017. Vol. 8. Pp. 8–12.

12. García-Domínguez A., Claver J., Sebastián M.A. Study for the selection of design software for 3D printing topological optimization // *Procedia Manufacturing*. 2017. Vol. 13. Pp. 903–909.

13. Yang F., Zhang M., Bhandari B., Liu Y. Investigation on lemon juice gel as food material for 3D printing and optimization of printing parameters // *LWT - Food Science and Technology*. 2018. Vol. 87. Pp. 67–76.

14. Бузиков М.М., Егоренко М.П., Карманов И.Н. Разработка 3D-принтера на основе SLA технологии // *Интерэкспо Гео-Сибирь*. 2016. № 1. Т. 5. С. 152–156.

15. Santana L., Alves J.L., Netto A.C.S. A study of parametric calibration for low cost 3D printing: Seeking improvement in dimensional quality // *Materials & Design*. 2017. Vol. 135. Pp. 159–172.

Информация об авторах

Варнавский Александр Николаевич, кандидат технических наук, доцент Департамента компьютерной инженерии МИЭМ. E-mail: avarnavsky@hse.ru. Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Россия, 101000, г. Москва, ул. Мясницкая, д. 20.

Гадельшин Артур Равильевич, магистрант. E-mail: arturgadelshin@gmail.com. Рязанский государственный радиотехнический университет. Россия, 390005, Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1.

Салин Дмитрий Сергеевич, магистрант. E-mail: salin.dmitry1995@mail.ru. Рязанский государственный радиотехнический университет. Россия, 390005, Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1.

Поступила в августе 2018 г.

© Варнавский А.Н., Гадельшин А.Р., Салин Д.С., 2018

^{1,*}Varnavsky A.N., ²Gadelshin A.R., ²Salin D.S.

¹National Research University Higher School of Economics
Russia, 101000, Moscow, Myasnitskaya st., 20

²Ryazan State Radio Engineering University
Russia, 390005, Ryazan, Gagarin st., 59/1

*E-mail: avarnavsky@hse.ru

THE RESEARCH OF PRINTING PARAMETERS IMPACT ON QUALITY AND PRICE/QUALITY RATIO OF THE PRODUCT'S PRINTING RESULT ON A BUDGET 3D-PRINTER

Abstract. The work is devoted to creation and development of inexpensive 3D printer and models describing the quality and price/quality ratio of the result of manufacturing products. The research is actual; studies will allow to create budget equipment to carry out 3D printing in accordance with the criterion of minimizing the price / quality ratio. The linear and logistic regressions are based on a regression analysis of making cubes with different print parameters on the resulting 3D printer. Linear regression allows estimating the quality level of the manufacturing result depending on printing parameters. Logistic regression allows classifying and predicting the probability of printing objects with low and high quality levels. The logistic model allows to classify correctly the quality of the printed cubes depending on the parameters of printing in 81% of cases. The influence of each print parameters on the quality and result of the classification is analyzed. It is obtained that the importance of “the filament feeding rate” parameter is 1.5 times higher than the importance of “the print layer height” parameter. A model of the dependence of printing time on “the filament feeding speed” and “the print layer height” is constructed. According to this model, the importance of “the print layer height” parameter is 2.6 times higher than the importance of the “filament feeding speed” parameter. A model describing the price/quality ratio for the print result is constructed. The use of the model can provide the optimal values of the filament feeding speed and the print layer height, at which the price/quality ratio of the printing result will be minimal.

Keywords: 3D printer, print quality, print parameters, defective layers, linear model, logistic regression, price/quality ratio.

REFERENCES

1. Karyakin N.N., Gorbatov R.O., Novikov A.E., Niftullaev R.M.O. Surgical treatment of patients with tumors of long tubular bones of the upper extremities with the use of individual implants from

osteoreplacing material, created using 3D printing technologies. *Genius of orthopedics*, 2017, no. 3, pp. 323–330.

2. Leonenkov A.D., Dvirny V.V. Prospects of application of additive technologies in the aerospace

industry. Reshetnevsky readings, 2017, no. 21-2, pp. 632–633.

3. Luneva D.A., Kozhevnikova E.O., Kaloshina S.V. Application of 3D printing in construction and prospects for its development. Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Construction and architecture, 2017, no. 1, vol. 8, pp. 90–101.

4. Chemodurov A.N. Application of additive technologies in the manufacture of engineering products. Izvestiya Tula State University. Technical science, 2016, no. 8–2, pp. 210–217.

5. Grishin A.S., Bredikhina O.V., Pomozev A.S., Ponomarev V.G., Krasulya O.N. New technologies in the food industry - 3D printing. Bulletin of the South Ural State University. Series: Food and biotechnology, 2017, no. 2, vol. 4, pp. 36–44.

6. Malikov A.A., Feofilov N.D., Sidorkin A.V., Yanov E.S. Use of 3D printers for prototyping of parts of current collector insulators. Izvestiya Tula State University. Technical science, 2015, no. 8-1, pp. 17–23.

7. Ivashkova K.P., Filippov A.N., Kopasov E.A. Analysis and systematization of defects in 3D printing. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Instrument making, 2017, no. 5, vol. 60, pp. 426–430.

8. Kolesnikov A.A. Situational management of ensuring the quality of manufacturing products by additive technology. Educational resources and technologies, 2017, no. 4 (21), pp. 84–92.

9. Petrov V.M., Bezpalkchuk S.N., Yakovlev S.P. On the influence of the structure on the strength of products made of plastics, obtained by the method of 3D printing. Bulletin of the State University of the Marine and River Fleet named after Admiral S.O. Makarova, 2017, no. 4 (44), pp. 765–776.

10. Mantihal S., Prakash S., Godoi F.C., Bhandari B. Optimization of chocolate 3D printing by correlating thermal and flow properties with 3D structure modeling. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2017, vol. 44, pp. 21–29.

11. Webb B., Doyle B.J. Parameter optimization for 3D bioprinting of hydrogels. Bioprinting, 2017, vol. 8, pp. 8–12.

12. García-Domínguez A., Claver J., Sebastián M.A. Study for the selection of design software for 3D printing topological optimization. Procedia Manufacturing, 2017, vol. 13, pp. 903–909.

13. Yang F., Zhang M., Bhandari B., Liu Y. Investigation on lemon juice gel as food material for 3D printing and optimization of printing parameters. LWT - Food Science and Technology, 2018, vol. 87, pp. 67–76.

14. Buzikov M.M., Egorenko M.P., Karmanov I.N. Development of 3D-printer based on SLA technology. Interexpo Geo-Siberia, 2016, no. 1, vol. 5, pp. 152–156.

15. Santana L., Alves J.L., Netto A.C.S. A study of parametric calibration for low cost 3D printing: Seeking improvement in dimensional quality. Materials & Design, 2017, vol. 135, pp. 159–172.

Information about the author

Varnavsky, Alexander N. PhD, Assistant professor. E-mail: avarnavsky@hse.ru. National Research University Higher School of Economics, Russia, 101000, Moscow, Myasnitskaya st., 20.

Gadelshin, Arthur R. Master student. E-mail: arturgadelshin@gmail.com. Ryazan State Radio Engineering University. Russia, 390005, Ryazan, Gagarin st., 59/1.

Salin, Dmitry S. Master student. E-mail: salin.dmitry1995@mail.ru. Ryazan State Radio Engineering University. Russia, 390005, Ryazan, Gagarin st., 59/1.

Received in August 2018

Для цитирования:

Варнавский А.Н., Гадельшин А.Р., Салин Д.С. Исследование влияния показателей печати на качество и соотношение цена/качество результата изготовления изделий на бюджетном 3D-принтере // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2018. №12. С. 124–131. DOI: 10.12737/article_5c1c9969a10128.83957539

For citation:

Varnavsky A.N., Gadelshin A.R., Salin D.S. The research of printing parameters impact on quality and price/quality ratio of the product's printing result on a budget 3D-printer. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov, 2018, no. 12, pp. 124–131. DOI: 10.12737/article_5c1c9969a10128.83957539