

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ В ЗАКРЫТОЙ КАМЕРЕ FDM 3D-ПРИНТЕРА С КИНЕМАТИКОЙ DELTA BOT

Соловьев А.А.\*

*МИРЭА – Российский технологический университет*

\*mongousse2@yandex.ru

Исследованы тепловые потоки в закрытой камере 3D-принтера с кинематикой delta bot. Проведено компьютерное моделирование распределения температур и воздушных потоков в программном комплексе Autodesk CFD. Установлена зона равномерного нагрева в камере 3D-принтера с температурой равной нижнему пределу температуры формы для литья АБС пластика. Обозначена необходимость предварительного прогрева камеры принтера для избежания эффекта деламации слоев. Проведен анализ возможности нагрева 3d принтера до верхнего предела температуры формы (70 °С).

**Ключевые слова:** теплообмен, аддитивные технологии, 3D-печать, послойное наплавление, компьютерное моделирование.

## THE INVESTIGATION OF HEAT FLOW IN THE DELTA BOT FDM 3D-PRINTER WITH ISOLATED HEAT CHAMBER

Solovyev A.A.

*MIREA – Russian Technological University*

Heat flows in a closed chamber of a 3D-printer with delta bot kinematics are investigated. A computer simulation of the distribution of temperatures and air flows in the Autodesk CFD software package was carried out. A uniform heating zone is determined in the 3D-printer chamber with a temperature, that is equal to the low limit of the temperature of the ABS plastic injection mold. The necessity of preheating the printer camera to avoid the effect of delamination of layers is shown. The analysis of the possibility of heating the 3d printer to the upper limit of the mold temperature (70 °C) was carried out.

**Keywords:** heat transfer, additive technologies, 3D-printing, FDM, CFD.

### Введение

Мировой рынок аддитивных технологий с 2014 по настоящее время растет с темпами более 19 % в год. [1] Оборудование для 3D-печати по технологии FDM с каждым годом позволяет работать с более сложными в переработке материалами при условии снижения закупочной цены 3D-принтера. Известны работы, использующие доработанные 3D-принтеры бюджетного сегмента для печати инженерными и суперконструкционными пластмассами. Например, в работе [2] для печати АБС пластиком и суперконструкционным РЕКК использовался 3D-printer Prusa i3 Mk3, у которого нагрев стола был заменен на более производительный и была создана закрытая камера для печати. Уже существует работа [3], посвященная созданию 3D-принтера для печати высокотемпературными пластиками в ультранизком ценовом сегменте (ниже 1000 \$). Проводились работы по исследованию тепловых потоков в 3D-принтере в вакуумированной изолированной камере [4]. Есть также работы, связанные с изучением теплообмена в печатающей головке принтера. Например, в [5] с помощью моделирования и экспериментального введения термопар в ребра радиатора печатающей головки, изучалось поведение полимера в печатающей головке и его фазовые переходы, а в [6] разрабатывался подход, позволяющий предсказывать поведение расплава. В обзоре [7] представлен обширный список работ, так или иначе посвященных фазовым переходам полимеров и теплообмену в печатающей головке в процессе 3D-печати. Стоит заметить, что в большей своей части в работах проводилось моделирование процесса, а небольшую часть экспериментальных работ использовали промышленные принтеры компании Stratasys, недоступные рядовому инженеру, использующему FDM 3D-печать.

Целями данной работы являются:

- 1) изучение распределения температур в закрытой камере 3D-принтера с целью определения наиболее разогретого участка стола принтера;
- 2) создание экспресс-методики, позволяющей определить наиболее разогретый участок стола принтера;
- 3) выявление возможностей нагрева камеры бюджетного 3D-принтера внешними источниками нагрева.

#### **Материалы, оборудование и методы**

Исследования проводились на 3D-принтере 3dq, имеющем кинематику дельта-бот (рис. 1) и закрытую камеру. Стенки камеры выполнены из листового поликарбоната.



Рис. 1. Фото общего вида 3D-принтера

Методика исследования заключалась в следующем: в стенках камеры сверлились ряды отверстий диаметром 6 мм. В каждом ряду было 3 отверстия. Расстояние между центрами отверстий в соседних рядах равняется 50 мм, расстояние между центрами отверстий в ряду равняется 100 мм (рис. 2).

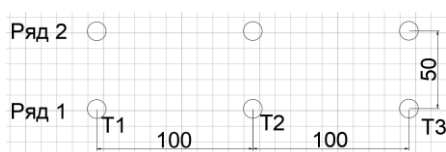


Рис. 2. Принципиальная схема сверловки отверстий

Замерялась температура в помещении поверенным термометром. Показания сравнивались с показаниями датчика, измеряющего температуру внутри камеры.

Измерения температуры внутри камеры проводились следующим образом: включался нагрев 3D-принтера (головы 3D-принтера и стола 3D-принтера) до стандартного рабочего технологического режима ABS пластика (температура головы 240 °С, температура стола 100 °С) и происходило ожидание стабилизации температуры в камере. Общее время нагрева равнялось ~6 минутам, что было выяснено опытным путем.

Критерием выбора времени нагрева являлись следующие параметры:

- 1) температура головы принтера и стола должна прогреться и стабилизироваться. На прогрев от комнатной температуры до рабочей температуры уходит 3 мин.;
- 2) температура в камере должна стабилизироваться и перестать изменяться. Этот процесс идет также около 3-х мин.

Затем, после прогрева камеры через просверленное отверстие в камеру принтера вводился датчик температуры ds18b20 с шагом в 1 см. В каждой точке датчик находился в течение 1 минуты для стабилизации показаний. По окончании съема данных в одном отверстии датчик переставлялся в следующее отверстие и ожидалась стабилизация показаний датчика (как правило, порядка 10 мин.).

Расстояние от стенки камеры до середины 3D-принтера равно 15 см. Это означает, что в одном отверстии будут сниматься 15 показаний от стенки 3D-принтера к середине. Это позволит получить массив данных температуры в камере 3D-принтера.

#### **Результаты численного моделирования**

Моделирование нагрева производилось в ПО Autodesk CFD. Для исследования была взята только часть нагреваемого стола и пространство над ним, так как в процессе физического эксперимента зафиксировать температуры вблизи поверхности стола с достаточной долей точности не представлялось возможным. На рис. 3 представлены результаты моделирования распределения температуры в камере 3D-принтера.

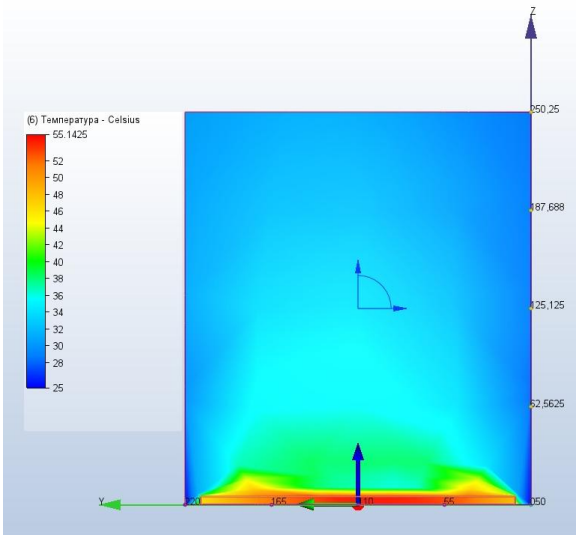


Рис. 3. Результаты моделирования распределения температуры в камере 3D-принтера (единицы оси Z – миллиметры)

Из рис. 3 видно, что наиболее нагретыми являются первые 3–5 мм объема камеры. Далее температура снижается, а следовательно, увеличивается переохлаждение, что будет негативно влиять на свойства получаемых деталей. В случае печати высокой детали (более 100 мм высотой) есть вероятность получения неудовлетворительного качества и заниженных свойств изделия.

**Результаты физического эксперимента**

На рис. 4–6 представлены результаты экспериментального определения температур в камере 3D-принтера. Результаты рассматриваются на примере фронтальной стенки.

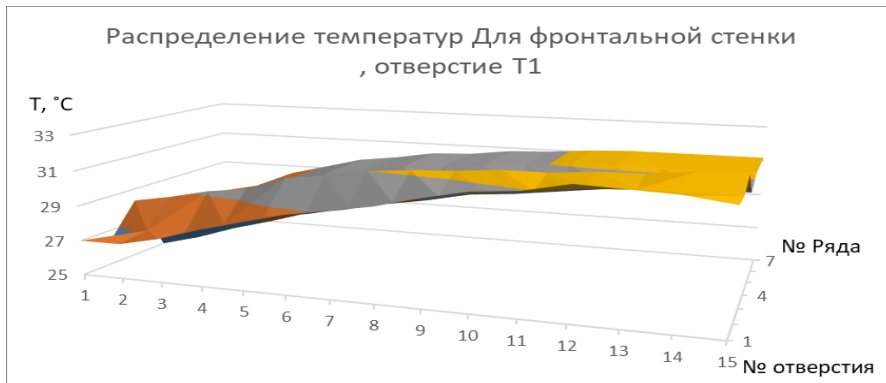


Рис. 4. Распределение температур в камере 3D-принтера для фронтальной стенки, отверстие Т1

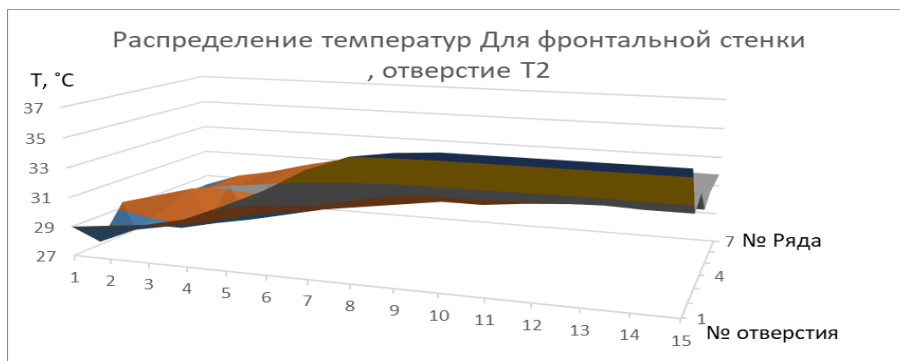


Рис. 5. Распределение температур в камере 3D-принтера для фронтальной стенки, отверстие Т2

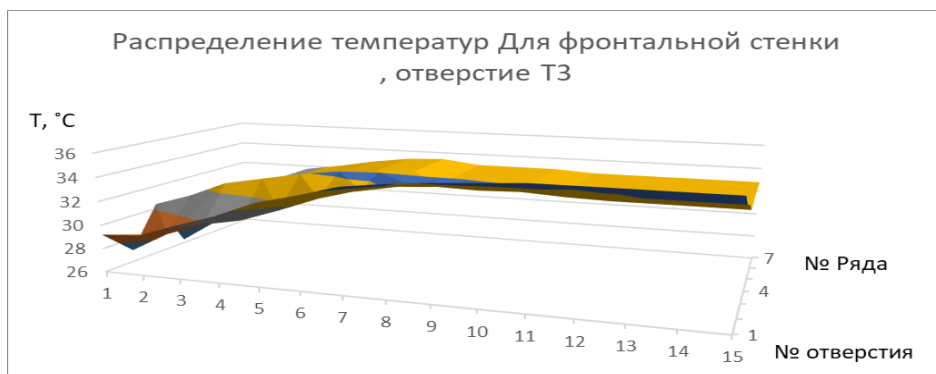


Рис. 6. Распределение температур в камере 3D-принтера для фронтальной стенки, отверстие ТЗ

Из рис. 4–6 видно, что температура в камере принтера изменяется от стенки (отверстие № 1) к середине принтера (отверстие № 15). Наибольшая температура наблюдается в отверстии № 2, которое ближе всех находится к нагреваемой зоне, следовательно именно посередине быстрее всего происходит нагрев.

Сравнивая рис. 4 и рис. 6 можно увидеть, что в правой части принтера (исходя из рис. 3) температура немного выше. Это позволяет сделать вывод о наиболее выгодном расположении детали при печати в данном принтере. На каждом из рисунков можно наблюдать локальное понижение температуры в 4–5 рядах. Это объясняется охлаждением печатающей головки принтера. В головке находится вентилятор, направляющий поток воздуха в радиатор.

#### **Методика определения наиболее нагретого места в камере 3D-принтера**

Из-за неравномерности распределения температур предлагается следующая экспресс-методика определения лучшего места для печати на принтере: используя датчик температуры (оптимальным является датчик температуры с рабочим диапазоном от комнатной температуры до 100 °C или более, в зависимости от необходимой температуры в камере принтера) и образцовый датчик температуры, показывающий температуру в помещении. При выполнении методики необходимо дождаться нагрева камеры 3D-принтера, а затем установить датчик в камере, начиная от области, находящейся за вентилятором, охлаждающим печатающую головку, с шагом не менее чем 3 см. Интервал между сменой положения датчика должен равняться 2 мин., начиная от закрытия дверцы камеры.

#### **Возможности использования внешнего источника нагрева камеры 3D-принтера**

В 3D-принтере есть части, которые стабильно работают при комнатных температурах, но их срок службы снижается под воздействием повышенных температур. К таким узлам относятся: ремни, отвечающие за передвижение печатающей головки; материал воздухопроводов вентиляторов охлаждения; шаговые двигатели; управляющая плата принтера.

Начнем с шаговых двигателей: в паспорте к шаговому двигателю nema 17 [9] в пункте «рабочая температура» указана максимальная температура в 50 °C. Учитывая, что шаговый двигатель во время работы нагревается, дополнительный нагрев камеры приведет к повышенной температуре работы шагового двигателя. Следовательно, нагрев камеры принтера не рекомендуется без установки на шаговые двигатели пассивных радиаторов охлаждения, а в случае нагрева камеры до 50 °C и выше – радиаторов с вентиляторами или жидкостного охлаждения.

Управляющая плата является по сути материнской платой 3D-принтера, что аналогично материнской плате компьютера. Таким образом, температура управляющей платы не должна быть выше 30–35 °C, что возможно при закрытой камере, но маловероятно при дополнительном нагреве камеры. Поэтому управляющая плата должна быть вынесена за пределы корпуса принтера в отдельный корпус.

Ремень для передвижения печатающей головки GT2, по описанию производителя [10] состоит из стекловолокнистого корда, неопрена и полиамида. Неопрен и полиамид имеют предельную температуру эксплуатации 90 и 100 °C, соответственно, что позволяет нагревать при прочих условиях рабочую камеру до 90 °C.

Воздуховоды вентиляторов рекомендуется отпечатать на 3D-принтере из материалов, выдерживающих желаемые температуры в камере 3D-принтера. Например, если в камере необходима температура 80 °C, то подойдет АБС-пластик. Сами же вентиляторы рекомендуется заменить на вентиляторы из термостойкого пластика или металлические.

### Заключение

В результате проведенной работы установлено распределение температур в закрытой камере 3D-принтера с кинематикой delta bot; определена наиболее нагретая часть стола, что позволяет производить печать изделий с более стабильными свойствами и без эффекта деламинации; экспресс-методики, позволяющей определить наиболее разогретый участок стола принтера; показана возможность нагрева камеры принтера до 90 °С.

### Библиография

1. Группа «Деловой ПРОФИЛЬ» Аналитическое исследование. Рынок технологий 3D-печати в России и мире Город, 2020. 15 с.
2. Lepoivre A., Boyard N., Levy A., Sobotka V. Heat transfer and adhesion Study for the FFF Additive Manufacturing Process // 23<sup>rd</sup> International Conference on Material Forming (ESAFORM 2020). Cottbus: Procedia Manufacturing. 2020. V. 47. P. 948–955.
3. Skrzypczak N.G., Tanikella N.G., Pearce, J.M. Open source high-temperature RepRap for 3D-printing heat-sterilizable PPE and other applications // HardwareX. 2020. V. 8. P. 1–40.
4. Maidin S., Wong J.H.U., Mohamed A.S., Romlee W.F.A., Akmal S. Vacuum System Assisted FDM – Characteristic of Heat Transfer using Finite Element Analysis // International Journal of Recent Technology and Engineering. 2019. V. 8, N 5. P. 1–6.
5. Jerez-Mesa R., Travieso-Rodriguez J.A., Corbella X., Busque R., Gomez-Gras G. Finite element analysis of the thermal behaviour of a RepRap 3D-printer liquefier // Mechatronics. 2016. V. 001. P. 1–8.
6. Bellini A., Gucceri S., Bertoldi M. Liquefier Dynamics in Fused Deposition // J. Manuf. Sci. Eng. 2004. V. 126, N 2. P. 237–246.
7. Pandey A., Pradhan S.K. Investigations into Complete Liquefier Dynamics and Optimization of Process Parameters for Fused Deposition Modelling // Materials Today: proceeding. 2018. V. 5. P. 12940–12955.
8. Maqsood N., Rimasauskas M. Delamination observation occurred during the flexural bending in additively manufactured PLA-short fiber filament reinforced with continuous carbon fiber composite // Results in Engineering. 2021. V. 11. P. 1–6.
9. NEMA17-AMT112S Series Datasheet – Stepper Servo Motors.
10. Gates PowerGrip® GT®2 Drive Design Manual. Denver, 2000. 179 p.