



DOI: <https://doi.org/10.15688/jvolsu1.2016.4.9>

УДК 621.9.06, 658.512.22

ББК 30.2

ПАРАЛЛЕЛЬНЫЙ FDM-ПРИНТЕР¹

Антон Владимирович Белоусов

Студент института математики и информационных технологий,
Волгоградский государственный университет
anton.belousov.v@mail.ru, math@volsu.ru
просп. Университетский, 100, 400062 г. Волгоград, Российская Федерация

Сергей Сергеевич Храпов

Кандидат физико-математических наук, доцент кафедры информационных систем
и компьютерного моделирования,
Волгоградский государственный университет
xss-ip@mail.ru, infomod@volsu.ru
просп. Университетский, 100, 400062 г. Волгоград, Российская Федерация

Анастасия Валерьевна Тен

Кандидат физико-математических наук, доцент кафедры информационных систем
и компьютерного моделирования,
Волгоградский государственный университет
pak.anastasia@gmail.com, infomod@volsu.ru
просп. Университетский, 100, 400062 г. Волгоград, Российская Федерация

Николай Вячеславович Садчиков

Студент института математики и информационных технологий,
Волгоградский государственный университет
angel.alex333@mail.ru, math@volsu.ru
просп. Университетский, 100, 400062 г. Волгоград, Российская Федерация

Юлия Александровна Болдырева

Студентка института математики и информационных технологий,
Волгоградский государственный университет
boldyreval11@mail.ru, math@volsu.ru
просп. Университетский, 100, 400062 г. Волгоград, Российская Федерация

Аннотация. Проведен краткий обзор FDM-технологии. Приведены основные этапы работы алгоритма параллельного FDM-принтера. Рассмотрены особенности новой технологии параллельной 3D-печати. Создана 3D-модель параллельного FDM-принтера. Изучены и проанализированы возможные проблемы, которые могут возникнуть в процессе работы 3D-принтера.

Ключевые слова: FDM, PFDM, 3D-принтер, параллельная 3D-печать, 3D-моделирование, прототипирование.

Введение

В настоящее время, еще довольно молодая 3D-печать, быстро набирает обороты, и по-видимому, имеет безграничный потенциал. С ее помощью изготавливаются объекты — от обычных деталей конструктора, сложных рельефов, до медицинских протезов — технология весьма многообещающая в образовании, науке, медицине, даже кулинарии и имеет устойчивое развитие. На данный момент можно выделить четыре базовых типа 3D-печати:

- Экструдирование — выдавливание расплавленного материала. Технологии — Fused Deposition Modeling, Fused Filament Fabrication, Drop-On-Demand-Jet, Solid Free-form Fabrication и др.
- Фотополимеризация — отверждение жидкого полимера УФ или лазерным излучением. Технологии — Stereolithography, Digital Light Processing, Multi Jet Modeling, PolyJet и др.
- Гранулирование — склеивание, сплавление или спекание частиц материала. Технологии — Electron Beam Melting, Selective Heat Sintering, Selective Laser Sintering, Full Color Printing и др.
- Ламинирование — склеивание (прессование) слоев материала с последующим вырезанием. Технологии — Laminated object manufacturing, Selective Deposition Lamination и др.

FDM (Fused deposition modeling) — одна из самых популярных технологий 3D-печати. Наряду с аббревиатурой FDM для обозначения данной технологии используется FFF (Fused Filament Fabrication). На сегодняшний день насчитывается несколько десятков различных компаний, предлагающих свою продукцию на основе данной технологии. Главная и определяющая причина популярности FDM-принтеров — это стоимость как самих принтеров, так и расходных материалов. На большую распространенность данной технологии влияет также широкий спектр материалов для печати и доступность комплектующих для сборки FDM-принтеров своими руками. Можно выделить три основные группы FDM-принтеров по возрастающей шкале цена — качество — надежность: домашние настольные (десятки тыс. руб.); профессиональные (сотни тыс. руб.); промышленные (млн руб.).

В данной работе рассмотрена возможность создания 3D-принтера, использующего технологию параллельной FDM-печати (PFDM — Parallel fused deposition modeling). В настоящий момент времени в открытом доступе не существует 3D-принтеров использующих подобную технологию. Основные принципы работы PFDM-технологии, анализ достоинств и недостатков данного подхода 3D-печати рассмотрены в пункте 2. В пункте 3 описана 3D-модель параллельного FDM-принтера.

1. FDM-технология

В FDM-технологии для формирования очередного слоя модели термопластичный материал нагревается в экструдере до состояния плавления и выдавливается через сопло с отверстием диаметра 0,15–1,5 мм. Выдавливаемый из сопла материал наплавляется на поверхность предыдущего слоя или рабочий стол, формируя при остывании цельный объект (рис. 1). Создание необходимых контуров слоя и их заполнение осуществляется перемещением сопла относительно платформы в горизонтальной плоскости. Переход к следующему слою осуществляется опусканием рабочего стола или поднятием экструдера на толщину одного слоя. Процесс повторяется до формирования готовой модели. Подробное описание FDM-технологии представлено в работах [11; 13].

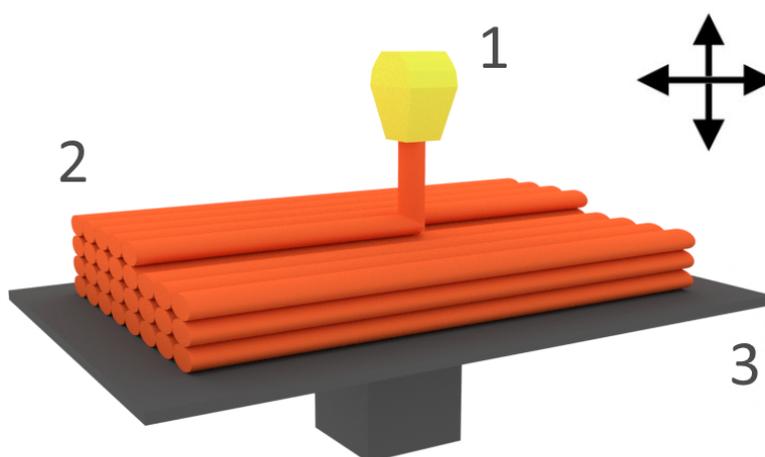


Рис. 1. Моделирование методом наплавления: 1 — управляемый подвижный экструдер, подающий через сопло расплавленный пластик; 2 — наплавляемый материал; 3 — управляемая подвижная платформа

В качестве расходных материалов для FDM-печати используются термопластичные материалы с температурой плавления от 50 до 300 °С. Наиболее распространенными материалами, применяемыми в FDM-принтерах, являются пластики, обладающие различными термическими и физическими свойствами: PLA — полилактид; ABS — акрилонитрилбутадиенстирол; HIPS — ударпрочный полистирол; PC — поликарбонат; нейлон; TPE — термопластичный эластомер; PET — полиэтилентерефталат. Помимо пластиков в качестве материалов для промышленной 3D-печати могут быть использованы легкоплавкие металлы, такие как олово. В пищевой промышленности в качестве материалов 3D-печати используются, например, шоколад, крем или тесто [6].

Основными недостатками FDM-технологии являются:

- Невысокая скорость печати 5–30 см³/ч, приводящая к большим временным затратам (более 10 ч) при печати объемных моделей.
- Небольшая разрешающая способность печати как по горизонтали (0,2–1 мм), так и по вертикали (0,05–0,4 мм), что приводит к видимой слоистости модели.
- Проблемы с фиксацией модели на рабочем столе.

- Для печати нависающих участков модели необходимо формирование сложных и затратных поддерживающих конструкций.

Таким образом, моделям, изготовленным по технологии FDM, в большинстве случаев требуется постобработка, которую достаточно сложно автоматизировать.

Отметим проблему, связанную с термоусадкой модели, которая приводит к изменению размеров или даже деформации модели после остывания. Параметры термоусадки зависят от используемого материала, например, для ABS-пластика она составляет 1 %, что усложняет процесс печати больших моделей [12].

Важным фактором развития FDM-технологии стало появление проекта RepRap (Replicating Rapid Prototyper) — это самовоспроизводящийся механизм быстрого прототипирования. Самовоспроизведение касается изготовления на уже сделанном принтере частей для другого принтера. Главной задачей стало создание максимально дешевых и доступных моделей принтеров, доступных даже частным энтузиастам. Положительной стороной появления сообщества RepRap является создание и совершенствование различного программного обеспечения (ПО) для работы с подобными принтерами, распространяемого свободно (Repetier-Host, Cura и др.). В этом заключается немаловажное отличие от фирменных принтеров, выпускаемых крупными производителями и работающих только с собственным ПО.

2. Параллельная FDM-печать

Параллельная FDM-печать — это одновременное использование нескольких независимо печатающих экструдеров. Данный подход позволит добиться высокой скорости печати, пропорциональной увеличению количества печатающих элементов. Перед созданием принтера, использующего технологию параллельной FDM-печати, необходимо разработать конструкцию принтера и алгоритм параллельной печати независимо перемещающихся экструдеров.

Сегодня в качестве стандарта FDM-печати используется только один экструдер в конкретный момент времени. Есть конструкции, которые имеют несколько экструдеров, перемещающихся вместе и печатающих по отдельности в разные моменты времени. Например, имеются принтеры с двумя экструдерами (MakerBot Replicator 2X, WANHAO Duplicator 4X и др.), у которых основной экструдер выращивает основную часть модели, а дополнительный печатает поддерживающие конструкции, используя растворимый пластик. Разные экструдеры могут печатать различными цветами пластика для получения разноцветных слоев модели, что значительно упрощает процедуру замены пластика, которая потребовалась бы при использовании одного экструдера.

При разработке конструкции FDM-принтера основополагающим фактором является выбор кинематической схемы движения экструдера и платформы. Можно выделить пять типов кинематики перемещения экструдера и платформы по осям XYZ , применяемой в современных FDM-принтерах:

- Перемещение экструдера по осям X и Z , платформы по оси Y (XZ — head, Y — bed). Используется в 3D-принтерах RepRap Prusa Mendel, PrintrBot и др.
- Перемещение экструдера по оси X , платформы по осям Y и Z (X — head, YZ — bed). Используется в 3D-принтерах PrintBox3D, Cube, UP! и др.
- Перемещение экструдера по осям X и Y , платформы по оси Z (XY — head, Z — bed). Используется в 3D-принтерах Ultimaker 2, Picaso 3D Designer, MakerBot

Replicator 2X, WANHAO Duplicator 4X и др.

- Перемещение экструдера по оси Z , платформы по осям X и Y (Z — head, XY — bed). Используется в 3D-принтерах Multirap L324, Multec GmbH 3D-Drucker и др.
- Дельта-робот — движение трех связанных через экструдер манипуляторов, расположенных по окружности (*Delta*). Используется в 3D-принтерах Delta Prism Pro, Delta Prism Mini, Delta Tower и др.

Проведенный нами анализ различных кинематических схем движения показал, что для параллельного FDM-принтера наиболее оптимальной является схема XY — head, Z — bed. Данный тип кинематики наиболее распространен и применяется в большинстве современных принтеров, а также имеет множество различных конструктивных реализаций. В работе [3] рассмотрены достоинства и недостатки кинематических схем перемещения, используемых в современных FDM-принтерах.

Предлагаемая конструкция параллельного FDM-принтера содержит четыре независимо перемещающихся экструдера, осуществляющих одновременную послойную печать модели. Каждый экструдер имеет собственную область печати, в результате получаем четыре основные зоны, представленные на рисунке 2. Наряду с основными зонами, имеются четыре смежные области, доступные двум соседним экструдерам, и одна общая область, находящаяся в центре платформы и доступная всем экструдерам.

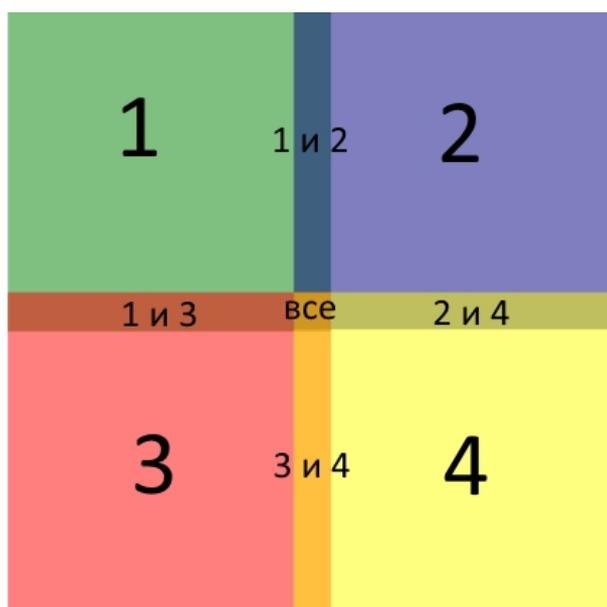


Рис. 2. Области печати при использовании параллельной FDM-технологии для четырех экструдеров

Плотная стыковка областей печати достигается благодаря специфической конструкции подачи пластика в сопло экструдера. Для перехода к следующему слою печати рабочий стол опускается на высоту слоя. Движение каждого экструдера по горизонтали осуществляется независимо друг от друга по направляющим рельсам. Основная сложность разработки программного обеспечения для параллельного FDM-принтера связана с формированием G-кода, отвечающего за управление параллельно печатающими экструдерами. G-код должен генерироваться таким образом, чтобы при движении экструдеры не сталкивались между собой.

Предполагаемые размеры области печати проектируемого PFDM-принтера составляют 1×1 м. Это приведет к значительному увеличению веса платформы. Поэтому необходимо снизить нагрузку на шаговые двигатели, перемещающие платформу в вертикальном направлении. Данная проблема может быть решена размещением внутри верхней части каждой из двух главных стоек подъемных блоков с противовесами, которые обеспечат плавное перемещение рабочего стола без особой нагрузки на шаговые двигатели. Плавность хода платформы и низкая нагрузка на шаговые двигатели позволят добиться высокой точности 3D-печати в вертикальном направлении 0,02–0,05 мм. Планируемое разрешение 3D-печати в плоскости будет составлять 0,02–1,5 мм в зависимости от типа печатаемого участка модели и диаметра выходного отверстия сопла. Таким образом, разрабатываемый параллельный FDM-принтер можно будет использовать как для печати больших моделей с размерами в несколько метров, которые на обычных принтерах будут создаваться намного дольше, так и для массовой печати одинаковых моделей малого размера, требующих высокой точности прототипирования.

Отметим возможность применения параллельного FDM-принтера с большой областью печати (более 1 м^2) при выполнении научно-исследовательских работ, связанных с гидродинамическим и геоинформационным моделированием динамики затопления территорий [1; 8; 17]. Используя разрабатываемый PFDM-принтер, можно с меньшими временными и экономическими затратами изготавливать лабораторные стенды, представляющие собой трехмерные модели рельефа заданных территорий, которые позволят проводить верификацию численных гидродинамических моделей затопления и осуществлять физическую визуализацию процесса затопления территорий в заданном масштабе. Один из примеров физической визуализации модельных задач на основе технологий 3D-печати приведен в работе [7].

Для получения максимальной эффективности и достижения высокой скорости 3D-печати необходимо, чтобы каждый экструдер был равномерно загружен. Модель необходимо разместить на рабочей платформе таким образом, чтобы она была разделена примерно на четыре равные части, по одной части на каждую область печати. Отметим, что при увеличении количества экструдеров, возрастает и риск неудачной печати, так как оператору необходимо следить за большим количеством различных элементов, и в случае неисправности каждого из них возможен брак всей модели. Разработка программы генерации G-кода для четырех независимо перемещающихся экструдеров требует нового подхода по сравнению с имеющимися алгоритмами. Для обеспечения прочности модели печатаемые различными экструдерами в смежных областях (см. рис. 2) слои должны перекрываться на одном или на разных Z-уровнях. Это накладывает ограничения на параметры траекторий движения экструдеров. В один и тот же момент времени траектории движения различных экструдеров не должны пересекать смежные зоны и общую центральную область (см. рис. 2). Кроме того, в процессе генерации G-кода необходимо отслеживать возникновения ошибок, которые могут привести к дефектам печати, таким как двойное наложение слоя или появление отверстий в модели (см. рис. 3).

Приведем основные этапы алгоритма генерации G-кода для параллельного FDM-принтера (см. рис. 4):

- 1) Выполнить позиционирование модели на рабочей области. Если необходимо произвести печать одинаковых моделей на каждой из четырех областей печати, то создать G-код, перейдя к пункту 3, и продублировать его необходимое количество раз для каждого из экструдеров.
- 2) Автоматически позиционировать модель на рабочей платформе для достижения

- равномерной загрузки экструдеров.
- 3) Произвести срез горизонтального слоя и разбиение его на сегменты, равные допустимой точности печати, например, на множество равномерных шестиугольников одинакового размера.
 - 4) Поочередно для каждой области печати произвести создание траектории движения экструдера по внешнему контуру модели. Очередь определяется циклично со смещением на одну позицию для каждого слоя. Например, на первом слое порядок создания траекторий для экструдеров 1–2–3–4, на втором 2–3–4–1, на третьем 3–4–1–2, на четвертом 4–1–2–3 и т. д. Циклическое смещение для всех последующих слоев позволит увеличить прочность модели за счет перекрытия слоев в общей и смежных областях печати.
 - 5) Произвести создание траектории движения экструдера для заполнения модели. Очередность определяется аналогично предыдущему пункту.
 - 6) Если возможно вычисление следующего слоя, то переходим к пункту 3 и повторяем процедуру для следующего слоя, иначе закончить алгоритм.

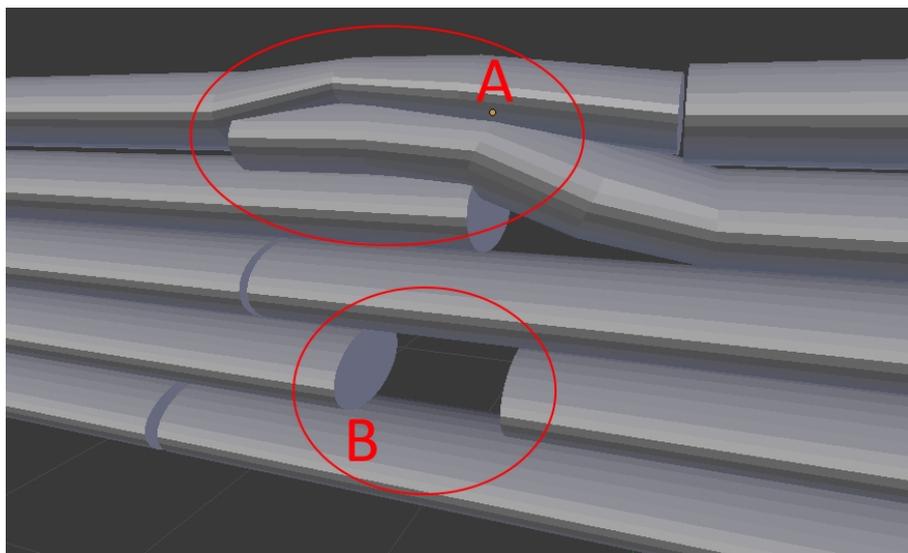


Рис. 3. Возможные ошибки при создании модели: *A* — наложение слоев; *B* — отверстие

При формировании G-кода для PFDM-принтера необходимо предусмотреть возможность отвода от модели экструдеров, закончивших печать очередного слоя раньше других. Если экструдер оставить на месте, то уже напечатанный слой начнет плавиться от высокой температуры сопла экструдера (200–250 °С).

3. 3D-модель принтера

Разработка 3D-модели параллельного FDM-принтера позволит детально изучать особенности конструкции и анализировать как конкретную деталь, так взаимодействие и взаимное расположение отдельных узлов проектируемого принтера. Для создания принтера потребуются уникальные детали, которые можно создать, используя разработанные 3D-модели. В качестве среды разработки конструкции принтера использовался свободный профессиональный пакет для создания трехмерной компьютерной графики Blender [10].

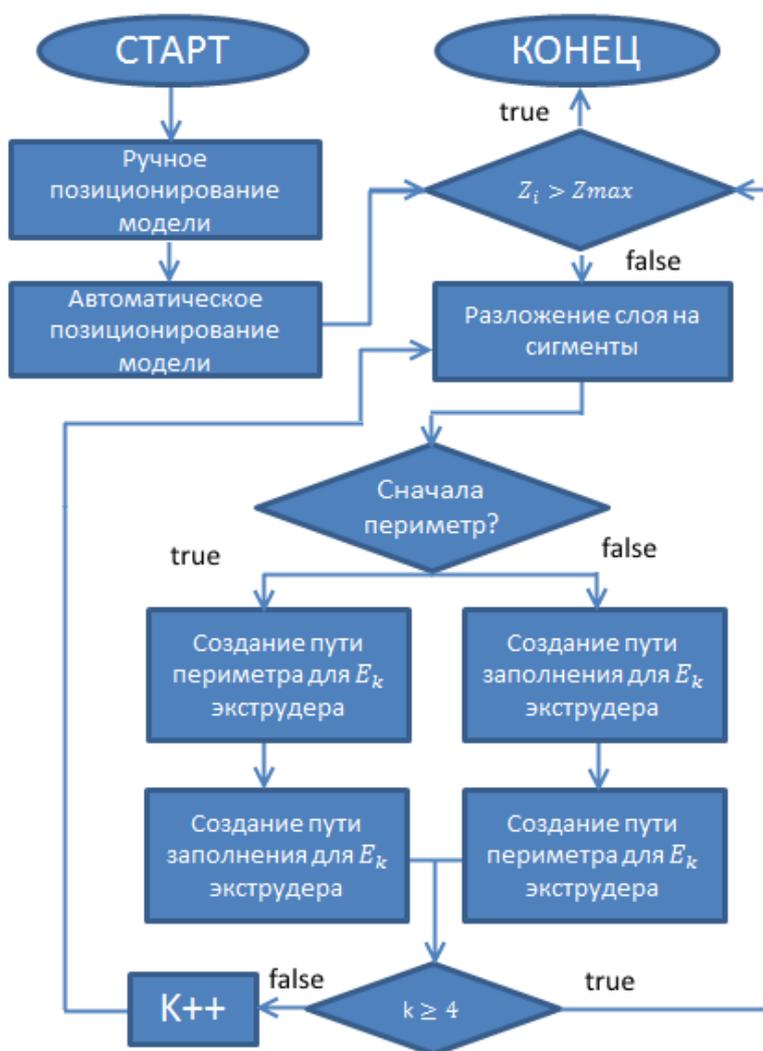


Рис. 4. Блок-схема основных этапов алгоритма при создании G-кода FDM-принтера

Главным элементом FDM-принтера является экструдер, в котором происходит плавление пластика и выдавливание его из сопла. Для правильной работы экструдера необходимо разогревать пластик до температуры плавления и поддерживать значение этой температуры в пределах $\pm 5^\circ\text{C}$. Нарушение температурного режима может привести к некорректной работе механизма подачи пластиковой нити, засорению сопла и как следствие остановке печати или в худшем случае поломке экструдера. Поэтому конструкция экструдера должна обеспечивать определенное значение (в допустимых пределах) и стабильность распределения температуры в различных его частях. На рисунках 5 и 6 представлена разработанная 3D-модель экструдера параллельного FDM-принтера. Отличительной особенностью данного экструдера является наличие изгиба (45°) между основным каналом подачи пластика и соплом, который необходим для обеспечения пересечения областей печати разных экструдеров. Подача пластика в сопло происходит через специальную фторопластовую трубку, обеспечивающую плотную стыковку сопла с конструкцией экструдера, так как расплавленный пластик способен просачиваться через малейшие зазоры конструкции. Данный подход реализован в 3D-принтерах семейства PrintBox3D [15] и доказал свою эффективность и практичность в процессе печати.

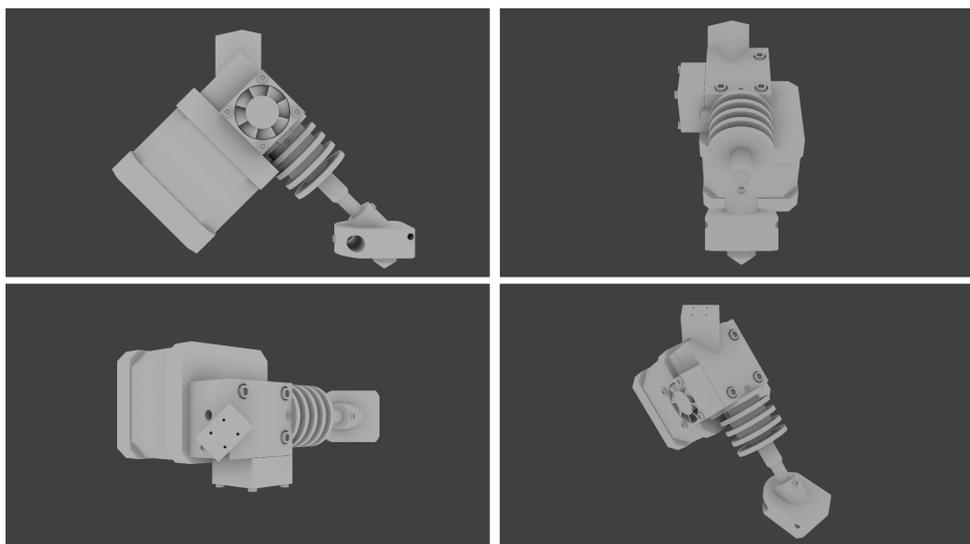


Рис. 5. Экструдер параллельного FDM-принтера

Для предотвращения расплавления пластика в механизме подачи необходимо наличие термобарьера и интенсивного охлаждения. Охлаждение может быть обеспечено вентилятором совместно с алюминиевым кожухом, насаженным на термобарьер. Термобарьер предотвращает передачу тепла от нагревателя, находящегося около сопла, к механизму и каналу подачи пластика.

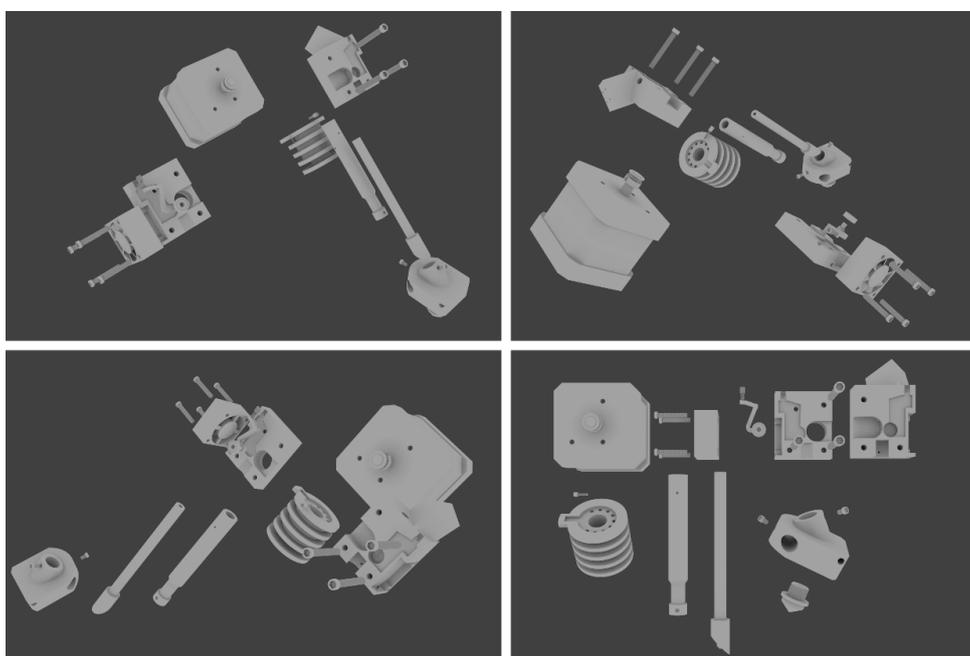


Рис. 6. Разобранный экструдер

Одной из особенностей конструкции экструдера является место перегиба пластика (см. рис. 7). Если в области перегиба пластик не будет достаточно нагрет, то произойдет засорение сопла и разрушение фторопластовой трубки за счет избыточного давления. Для определения кинематических и термодинамических характеристик расплавленно-

го пластика внутри экструдера необходимо проведение численного гидродинамического моделирования с учетом вязкости и теплопроводности для конкретного типа пластика. Применение численного моделирования для исследования характеристик экструдера является менее затратным и более универсальным по сравнению с прямыми экспериментальными методами. Для гидродинамического моделирования планируется использовать численные схемы, основанные на различных подходах: лагранжевом (SPH [14]); эйлеровом (MUSCL [4]); лагранжево-эйлеровом (CSPH-TVD, LES-ASG [2; 9]). Это позволит провести сравнение и более точную верификацию результатов моделирования.

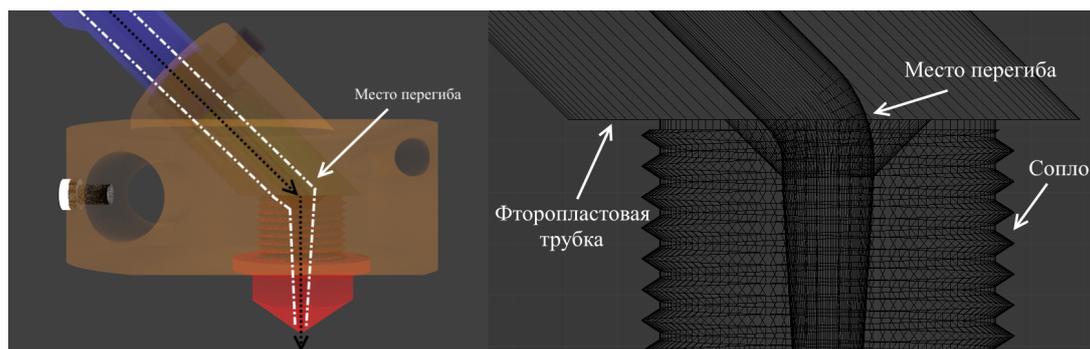


Рис. 7. Место перегиба пластика внутри экструдера

При проектировании FDM-принтера необходимо обеспечить надежное сцепление (адгезию) печатаемой модели с платформой. В современных 3D-принтерах это обеспечивается за счет подогрева платформы (особенно важно для ABS и HIPS-пластиков) и применения специальных покрытий, улучшающих адгезию пластика с платформой. Тип применяемых покрытий зависит от материала платформы. Для металлических платформ используют клей, бумагу, самоклеющиеся пленки или скотч, для стеклянных можно также использовать различные аэрозоли с полимерными смолами, например, лак для волос. Подогрев как металлических, так и стеклянных платформ повышает надежность сцепления пластиковых моделей поверхностью платформы. При этом важно, чтобы поверхность платформы нагревалась равномерно. Если основание пластиковой модели будет неравномерно нагрето, то при остывании в отдельных областях напечатанной модели будут возникать деформации в результате термоусадки материала. Это может привести не только к ухудшению качества печати при отлипанию от платформы отдельных участков модели, но и к полному отрыву модели, что сделает невозможным продолжение процесса печати. Проведенный нами анализ различных типов платформ показал, что для параллельного FDM-принтера наиболее оптимальной является стеклянная платформа с зеркальным покрытием снизу. Стеклянная платформа в меньшей степени, чем металлическая подвержена тепловым деформациям, а зеркальное покрытие обеспечивает хорошую теплоотдачу от нагревателя, расположенного снизу платформы, к поверхности соприкосновения с основанием модели. Все это улучшает свойства адгезии расплавленного пластика и обеспечивает стабильность 3D-печати. Данный подход реализован в 3D-принтерах Delta Prism Pro (Mini) [16] и доказал свою эффективность и практичность при длительном непрерывном (несколько десятков часов) процессе печати.

Созданная 3D-модель параллельного FDM-принтера с наложенными текстурами и подобранным освещением показана на рисунках 8, 9 и 10. Как видно из представленных рисунков, каждый из четырех экструдеров развернут в плоскости под углом 45° по направлению к центру платформы, и имеет собственную катушку с пластиком. Данный

угол поворота экструдеров наряду с изгибом в канале подачи расплавленного пластика обеспечивают перекрытие слоев, печатаемых разными экструдерами, необходимое для создания цельной и прочной модели. Наличие у экструдеров собственных катушек с пластиком позволит печатать специализированные цветные цельные модели, имеющие секторальное разделение по цветам, существенно быстрее, чем на принтерах с несколькими экструдерами, печатающими последовательно в одной области.

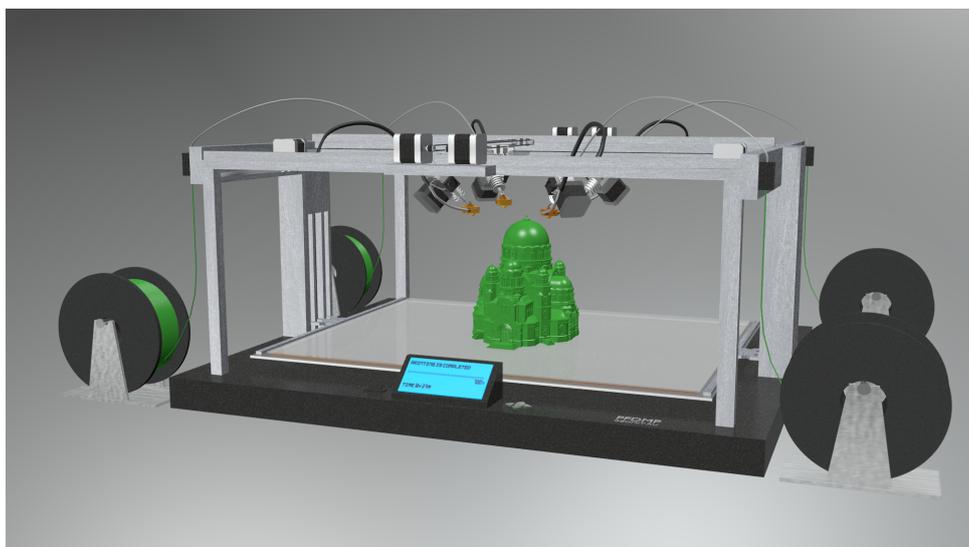


Рис. 8. 3D-модель PFDM-принтера (общий вид сбоку)

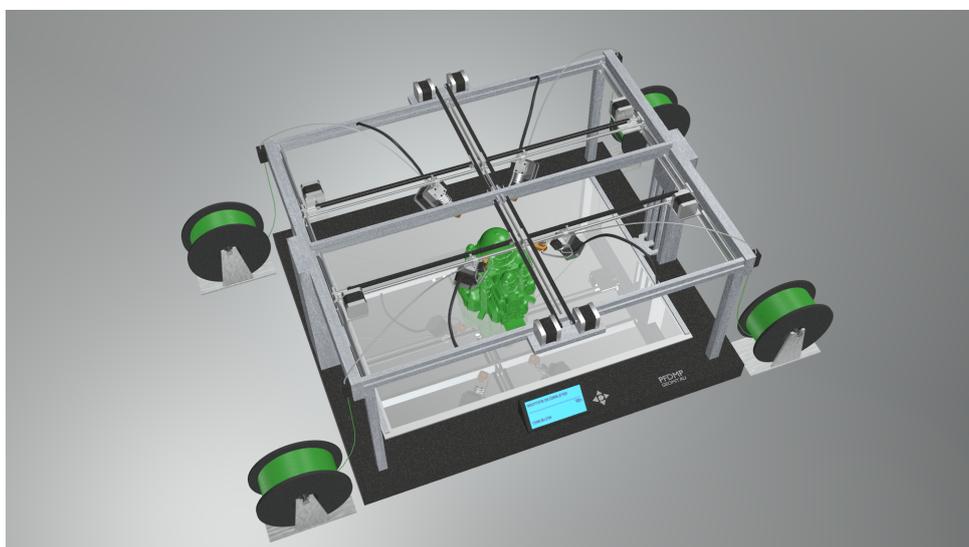


Рис. 9. 3D-модель PFDM-принтера (общий вид сверху)

На рисунках 8 и 9 также показаны элементы (USB-порт, карт-ридер и дисплей с элементами управления), являющиеся неотъемлемой частью современных 3D-принтеров. Управление работой PFDM-принтера будет осуществляться двумя способами: через специализированное программное обеспечение, установленное на компьютер, подключенный к принтеру USB-кабелем; посредством загрузки G-кода через карт-ридер и выбором соответствующих пунктов меню на дисплее с помощью элементов управления.

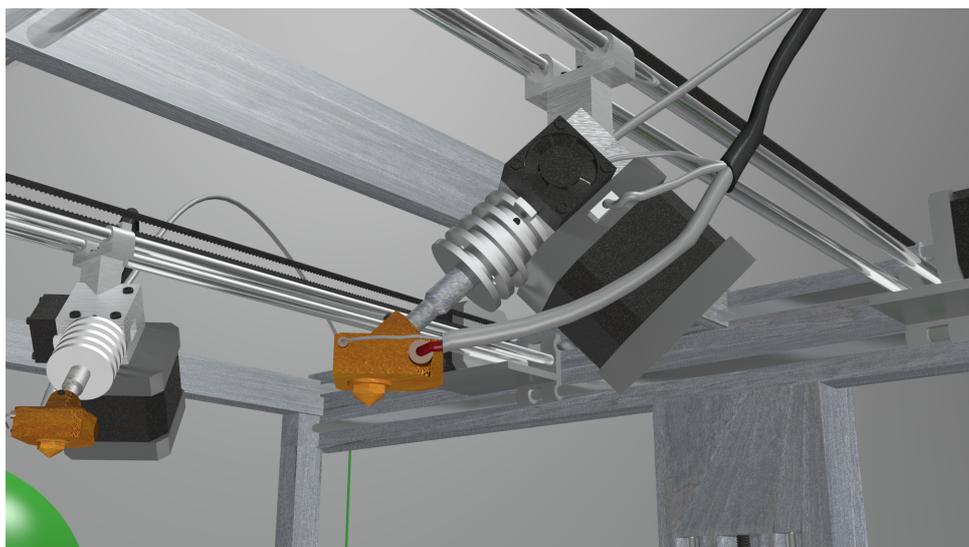


Рис. 10. 3D-модель PFDM-принтера (увеличенный вид экструдеров в сборе)

Следует отметить удобство использования технологий 3D-моделирования для создания модели прототипа PFDM-принтера. Применение технологии 3D-моделирования значительно ускоряет процесс разработки и совершенствования конструкции параллельного FDM-принтера. Созданную интерактивную 3D-модель принтера можно использовать в качестве презентационных материалов для ознакомления с принципами параллельной печати.

Заключение

Результатом исследования является разработка концепта 3D-модели принтера и описание основных этапов алгоритма при создании G-кода для параллельного FDM-принтера. Это новый 3D-принтер, предполагающий использование нескольких одновременно независимо перемещающихся экструдеров для создания цельной модели. Если технология будет успешно реализована, то это станет значительным вкладом в развитие как FDM, так и других методов печати.

В ходе выполнения работы была установлена необходимость проведения дополнительных исследований конструкции экструдера, связанных с определением на основе численного моделирования кинематических и термодинамических характеристик расплавленного пластика в области перегиба канала экструдера.

На основе технологий трехмерного моделирования была создана общая 3D-модель принтера и детально проработанная модель экструдера. Презентационные материалы, разработанные в рамках проекта, размещены на интернет-ресурсе проекта [5].

ПРИМЕЧАНИЕ

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Администрации Волгоградской области в рамках научных проектов № 15-47-02642 р_а и 16-07-01037.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агафонникова, Е. О. Проектирование системы гидрологической безопасности для горной местности в случае ливневого паводка на примере Крымского района Краснодарского края / Е. О. Агафонникова, А. В. Хоперсков, С. С. Храпов // Управление большими системами : материалы XII Всерос. шк.-конф. молодых ученых. — 2015. — С. 851–860.
2. Белоусов, А. В. Моделирование газодинамических течений на основе лагранжево-эйлеровой схемы LES-ASG / А. В. Белоусов, С. С. Храпов // Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 1, Математика. Физика. — 2015. — № 5 (30). — С. 36–51.
3. Богуцкий, Б. В. Анализ схем движения в современных FDM 3D-принтерах / Б. В. Богуцкий, С. М. Братан, В. Б. Богуцкий // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. — 2016. — № 1 (51). — С. 79–86.
4. Бочкарева, Е. В. Численное моделирование динамики звуковых волн в активных средах с использованием схемы MUSCL / Е. В. Бочкарева, С. С. Храпов // Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 1, Математика. Физика. — 2015. — № 1. — С. 13–22.
5. Интернет-ресурс проекта PFDM. — Электрон. текстовые дан. — Режим доступа: <http://pfdmp.geomit.ru>. — Загл. с экрана.
6. Новые технологии в индустрии питания — 3D-печать / А. С. Гришин, О. В. Брехина, А. С. Помоз, В. Г. Пономарев, О. Н. Красуля // Вестник ЮУрГУ. Серия «Пищевые и биотехнологии». — 2016. — Т. 4, № 2. — С. 36–44.
7. Пацко, В. С. Физическая визуализация множеств достижимости в задачах управления / В. С. Пацко, И. С. Стародубцев, А. А. Федотов // ГРАФИКОН'2015 : тр. Юбил. 25-й Междунар. науч. конф. — 2015. — С. 22–27.
8. Проектирование системы эколого-экономического управления территорией Волго-Ахтубинской поймы на основе гидродинамического и геоинформационного моделирования / А. А. Воронин, А. А. Васильченко, М. В. Писарева, А. В. Писарев, А. В. Хоперсков, С. С. Храпов, Ю. Е. Подщипкова // Управление большими системами : сб. тр. — 2015. — № 55. — С. 79–102.
9. Численная схема CSPH-TVD: исследование влияния ограничителей наклонов / Н. М. Кузьмин, А. В. Белоусов, Т. С. Шушкевич, С. С. Храпов // Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 1, Математика. Физика. — 2014. — № 1 (20). — С. 22–34.
10. Blender. — Electronic text data. — Mode of access: <https://www.blender.org>. — Title from screen.
11. Comb, J. W. FDM technology process improvements / J. W. Comb, W. R. Priedeman, P. W. Turley // Proceedings of Solid Freeform Fabrication Symposium. — 1994. — P. 42–49.
12. Defining the Conditions of 3D Printing Using Abs Plastic / M. I. Abdullin, A. A. Basyrov, S. N. Nikolaev, Y. A. Koksharova, N. V. Koltaev // European Reviews of Chemical Research. — 2014. — Vol. 1, № 1. — P. 4–9.
13. Gajdos, I. Influence of printing conditions on structure in FDM prototypes / I. Gajdos, J. Slota // Tehnicki vjesnik — Technical Gazette. — 2013. — № 2. — P. 231–236.
14. Monaghan, J. J. Smoothed particle hydrodynamics / J. J. Monaghan // Annual Review of Astronomy and Astrophysics. — 1992. — P. 543–574.
15. PrintBox3D. — Electronic text data. — Mode of access: <http://www.printbox3d.ru>. — Title from screen.
16. PrismPro. — Electronic text data. — Mode of access: <http://www.3dquality.ru>. — Title from screen.
17. The numerical simulation of shallow water: estimation of the roughness coefficient on the flood stage / S. S. Khrapov, A. V. Pisarev, I. A. Kobelev, A. G. Zhumaliev, E. O. Agafonnikova, A. G. Losev, A. V. Khoperskov // Advances in Mechanical Engineering. — 2013. — P. 1–11.

REFERENCES

1. Agafonnikova E.O., Khoperskov A.V., Khrapov S.S. Proektirovanie sistemy gidrologicheskoy bezopasnosti dlya gornoy mestnosti v sluchae livnovegogo pavodka na primere Krymskogo rayona Krasnodarskogo kraya [Hydrological Designing Security for a Mountainous Area in the Event of Flash Floods on the Example of the Crimean Region of Krasnodar Territory]. *Upravlenie bolshimi sistemami : materialy XII Vseros. shk.-konf. molodykh uchenykh*, 2015, pp. 851-860.
2. Belousov A.V., Khrapov S.S. Modelirovanie gazodinamicheskikh techeniy na osnove lagranzhevo-eylerovoy skhemy LES-ASG [Modeling of Gas Dynamic Flows on the Basis of the Euler – Lagrange Scheme LES-ASG]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 1, Matematika. Fizika* [Science Journal of Volgograd State University. Mathematics. Physics], 2015, no. 5 (30), pp. 36-51.
3. Bogutskiy B.V., Bratan S.M., Bogutskiy V.B. Analiz skhem dvizheniya v sovremennykh FDM 3D-printerakh [An Analysis of Traffic Patterns in Modern FDM 3D-Printers]. *Uchenye zapiski Krymskogo inzhenerno-pedagogicheskogo universiteta*, 2016, no. 1 (51), pp. 79-86.
4. Bochkareva E.V., Khrapov S.S. Chislennoe modelirovanie dinamiki zvukovykh voln v aktivnykh sredakh s ispolzovaniem skhemy MUSCL [Numerical Simulation of the Dynamics of the Sound Waves in Active Media with MUSCL Scheme]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 1, Matematika. Fizika* [Science Journal of Volgograd State University. Mathematics. Physics], 2015, no. 1, pp. 13-22.
5. *Internet-resurs proekta PFDM* [Internet Resource of PFDM Project]. Available at: <http://pfdmp.geomit.ru>.
6. Grishin A.S., Bredikhina O.V., Pomoz A.S., Ponomarev V.G., Krasulya O.N. Novye tekhnologii v industrii pitaniya – 3D-pechat [New Technologies in Food Industry – 3D Printing]. *Vestnik YuUrGU. Seriya «Pishchevye i biotekhnologii»*, 2016, vol. 4, no. 2, pp. 36-44.
7. Patsko V.S., Starodubtsev I.S., Fedotov A.A. Fizicheskaya vizualizatsiya mnozhestv dostizhimosti v zadachakh upravleniya [Physical Visualization of Reachable Sets in Control Problems]. *GRAFIKON'2015 : tr. Yubil. 25-y Mezhdunar. nauch. konf.*, 2015, pp. 22-27.
8. Voronin A.A., Vasilchenko A.A., Pisareva M.V., Pisarev A.V., Khoperskov A.V., Khrapov S.S., Podshchipkova Yu.E. Proektirovanie sistemy ekologo-ekonomicheskogo upravleniya territoriy Volgo-Akhtubinskoy poymy na osnove gidrodinamicheskogo i geoinformatsionnogo modelirovaniya [Designing a System for Ecological-Economical Management of the Volga-Akhtuba Floodplain on Basis of Hydrodynamic and Geoinformational Simulation]. *Upravlenie bolshimi sistemami : sb. tr.*, 2015, no. 55, pp. 79-102.
9. Kuzmin N.M., Belousov A.V., Shushkevich T.S., Khrapov S.S. Chislennaya skhema CSPH-TVD: issledovanie vliyaniya ogranichiteley naklonov [Numerical Scheme CSPH-TVD: Investigation of Influence Slope Limiters]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 1, Matematika. Fizika* [Science Journal of Volgograd State University. Mathematics. Physics], 2014, no. 1 (20), pp. 22-34.
10. *Blender*. Available at: <https://www.blender.org>.
11. Comb J.W., Priedeman W.R., Turley P.W. FDM Technology Process Improvements. *Proceedings of Solid Freeform Fabrication Symposium*, 1994, pp. 42-49.
12. Abdullin M.I., Basyrov A.A., Nikolaev S.N., Koksharova Y.A., Koltaev N.V. Defining the Conditions of 3D Printing Using Abs Plastic. *European Reviews of Chemical Research*, 2014, vol. 1, no. 1, pp. 4-9.
13. Gajdos I., Slota J. Influence of Printing Conditions on Structure in FDM Prototypes. *Tehnicky vjesnik – Technical Gazette*, 2013, no. 2, pp. 231-236.
14. Monaghan J.J. Smoothed Particle Hydrodynamics. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 1992, pp. 543-574.
15. *PrintBox3D*. Available at: <http://www.printbox3d.ru>.
16. *PrismPro*. Available at: <http://www.3dquality.ru>.
17. Khrapov S.S., Pisarev A.V., Kobelev I.A., Zhumaliev A.G., Agafonnikova E.O., Losev A.G., Khoperskov A.V. The Numerical Simulation of Shallow Water: Estimation of the Roughness Coefficient on the Flood Stage. *Advances in Mechanical Engineering*, 2013, pp. 1-11.

PARALLEL FDM PRINTER

Anton Vladimirovich Belousov

Student, Institute of Mathematics and IT,
Volgograd State University
anton.belousov.v@mail.ru, math@volsu.ru
Prosp. Universitetsky, 100, 400062 Volgograd, Russian Federation

Sergey Sergeevich Khrapov

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor,
Department of Information Systems and Computer Simulation,
Volgograd State University
xss-ip@mail.ru, infomod@volsu.ru
Prosp. Universitetsky, 100, 400062 Volgograd, Russian Federation

Anastasiya Valeryevna Ten

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor,
Department of Information Systems and Computer Simulation,
Volgograd State University
pak.anastasia@gmail.com, infomod@volsu.ru
Prosp. Universitetsky, 100, 400062 Volgograd, Russian Federation

Nikolay Vyacheslavovich Sadchikov

Student, Institute of Mathematics and IT,
Volgograd State University
angel.alex333@mail.ru, math@volsu.ru
Prosp. Universitetsky, 100, 400062 Volgograd, Russian Federation

Yuliya Aleksandrovna Boldyreva

Student, Institute of Mathematics and IT,
Volgograd State University
boldyreva11@mail.ru, math@volsu.ru
Prosp. Universitetsky, 100, 400062 Volgograd, Russian Federation

Abstract. We consider the FDM 3D-printing technology in this article. All accomplishments and limitations of this technology were studied. After analyzing the 3D-printing market and examining different designs of printers working for FDM technology, we decided to upgrade 3D FDM technology. We have developed a unique design that allows it to use 4 extruders during the print.

Today only one nozzle is used at any time by the FDM printing standard. There are designs that have two or more nozzles, but they print separately at different times and each of them performs certain operations. For example, printer has two nozzles and one nozzle prints primary part of the model, and the second nozzle prints supporting structures by using soluble plastic.

Under parallel FDM printing (or PFDM printing) means the simultaneous use of a few extruders. This approach will ensure high printing speed proportionally to the number of working extruders.

Our design uses four extruders, which must carry out simultaneous print layer. Each print area has its own extruder, but it can use an adjacent area in a small amount to achieve a smooth dense printing.

In this article, we describe an algorithm, recommended for the PFDM printer G-code creation. We have created a 3D-model of the PFDM printers proposed design, which is also present in this work.

If PFDM technology is successfully implemented, it will be a significant contribution to the development of both FDM and other printing methods.

Key words: FDM, PFDM, 3D-printer, 3D parallel printing, 3D-modeling, prototyping.