

# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

<sup>1</sup>Рыбак Л.А., д-р техн. наук, проф.,

<sup>2</sup>Мамаев Ю.А., гл. инженер,

<sup>1</sup>Мальшиев Д.И., аспирант,

<sup>1</sup>Вирабян Л.Г., магистрант

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

ООО «Карботек», г. Белгород

## ПРОГРАММНЫЙ МОДУЛЬ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ЗАДАННОЙ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ ВЫХОДНОГО ЗВЕНА РОБОТА-ГЕКСАПОДА ДЛЯ 3D-ПЕЧАТИ ИЗДЕЛИЙ\*

rl\_bgtu@intbel.ru

*В статье рассматриваются проблемы построения алгоритмов управления движением робота-гексапода при 3D-печати различных изделий. Алгоритм основан на принципах построения программы циклового управления и использования внутренних регистров контроллера робота. Получение покрытий с использованием робота-гексапода, в том числе мульти-слоя, осуществляется с помощью постпроцессора и имеет высокую сложность написания постпроцессоров данных. Разработанный программный модуль на основе данного алгоритма более простой, а также универсальный, что позволяет применять его ко всей серии роботов с подобным контроллером. В статье приведены основные принципы работы с разработанным программным модулем и идет ознакомление с программным интерфейсом. Рассматриваются основные настройки 3D-печати через разработанный программный модуль и описывается оптимальный выбор данных настроек для достижения необходимого качества получаемых моделей изделий.*

**Ключевые слова:** алгоритм, робот-гексапод, моделирование, 3D-печать, контроллер, программный модуль, экструдер, блок управления.

**Введение.** Технологии создания роботизированных комплексов для систем быстрого прототипирования появились в Японии и США в конце 1980-х – начале 1990-х годов. Быстрое прототипирование определяется как аддитивный процесс изготовления трехмерного объекта с помощью последовательного нанесения слоев материала. Многие системы быстрого прототипирования называют 3D-принтерами, которые используют различные типы материалов и аддитивных технологий, в частности полномасштабные строительные технологии для «печати» зданий и строительных блоков [2]. В настоящее время активно исследуется изготовление строительных конструкций с применением технологий 3D-печати для создания баз на Луне и иных космических объектах [3]. Например, использование реголита, распространенного на Луне, рассмотрено в статьях [4, 5]. В этих работах исследуется изготовление конструкций сложной формы из специальных строительных материалов с помощью неподвижной порталной конструкции. Похожую конструкцию и метод работы имеет российская разработка компании ЗАО «Спецавиа» [6]. Эта компания с 2015 года се-

рийно выпускает строительные 3D-принтеры различных модификаций. Например, принтер S-1160 с рабочей зоной 10×11×2,7 м может печатать строительные конструкции и сооружения стандартными составами на основе цемента марки 500, т.е. тем, что есть в свободной продаже на любом строительном рынке. Имеется возможность применять смеси с минеральными добавками и фиброволокном. Размер печатаемого слоя составляет 10 x 30 мм, скорость печати 9 м/мин. Основным недостатком предложенных решений является ограниченная высота конструкций до 2,7 м для самого большого из принтеров, а также то, что точность представлена для перемещения механизмов, а не конечного рабочего органа.

Важное значение имеет разработка программного обеспечения для функционирования роботизированных комплексов [1]. Известно программное обеспечение для управления роботизированного комплекса, обеспечивающее импорт BIM-модели строительной конструкции, генерацию команд управления подготовкой и подачей материалов сырьевой смеси, степенью

открытия сопла и движением механической руки робота (рис. 1).

Результаты работы программы по планированию траектории движения сопла роботизированного комплекса показаны на рис. 2.

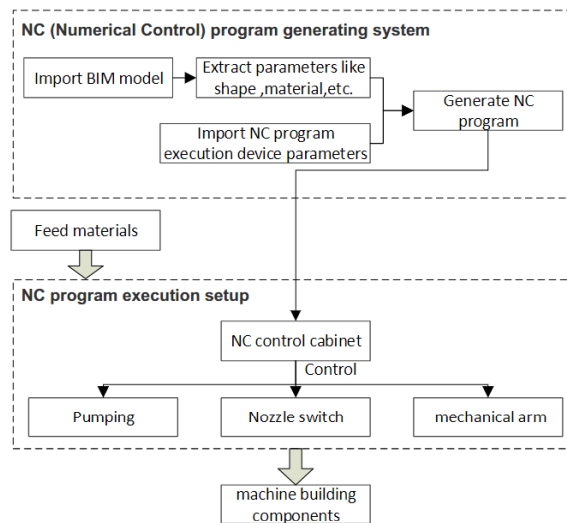


Рис. 1. Структура программного обеспечения для управления роботизированным комплексом

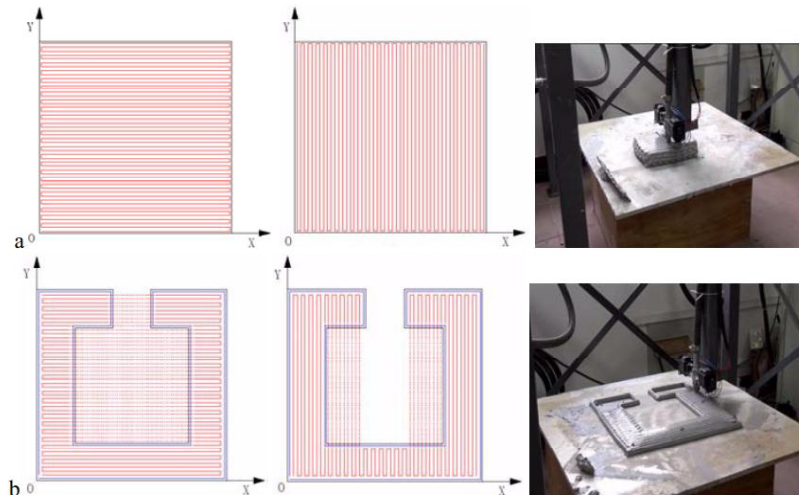


Рис. 2. Результаты работы роботизированного комплекса по изготовлению элементов строительных конструкций

В России разработан ряд программного обеспечения для управления портальными устройствами печати трехмерных изделий, в том числе, в строительстве.

Известна программа для ЭВМ 2013616795 «Программное обеспечение для управления автоматизированным и роботизированным оборудованием» [7]. Программа предназначена к использованию в составе программного обеспечения роботизированного комплекса. Программа обеспечивает решение управления автоматизированным и роботизированным оборудованием, средствами программного модуля в ее составе. Например, модуль отложенной печати при возникновении ошибок в работе с автоматизированным и роботизированным оборудованием позволяет продолжить с последней контрольной точки.

Программа для ЭВМ 2014613261 описывает интерфейсную программу управления работой устройства быстрого трехмерного прототипирования [8]. Программа разработана на языке C++, работает под управлением операционной системы Windows и предназначена для просмотра 3D моделей в формате STL, конвертирования их в G-код, оптимизированный для использования в 3D принтере, работающего по технологии FDM, с установкой параметров печати и отправкой сгенерированного G-кода непосредственно на исполнительное устройство. Программа обеспечивает выполнение следующих функций: вращение, клонирование, масштабирование 3D моделей STL в импровизированной рабочей области 3D принтера; генерация G-кода с заданными параметрами; передача сгенерированного G-кода на исполнительное устройство;

инициализация, завершение и контроль над работой 3D принтера.

Система управления роботизированным краном параллельной архитектуры (рис.3) исследуется в работе [9]. Управляющий контроллер системы содержит два модуля:

- модуль верхнего уровня (ASCTController), обеспечивающий интерфейс пользователя, пла-

нирование движения и обработку информации с датчиков, и

- модуль нижнего уровня (RoboCraneController), обеспечивающий непосредственное автоматизированное управление серводвигателями роботизированного крана с помощью ПИД-регуляторов, интерфейс ручного управления, и планирование траектории перемещения узлов.

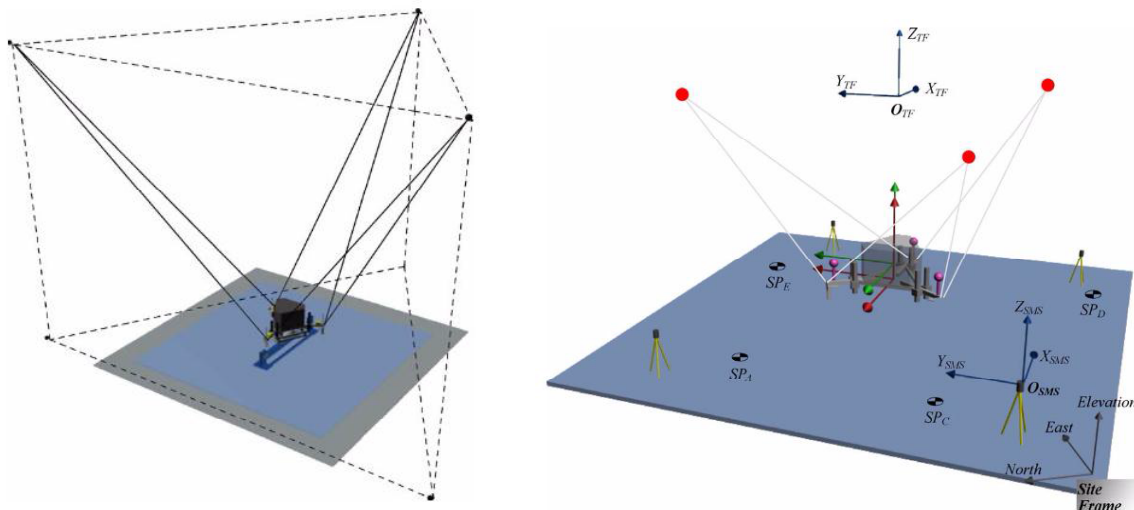


Рис. 3. Модель роботизированного крана

Реализация роботизированного комплекса такой конструкции была осуществлена в Италии в рамках проекта WASP, начатого в 2012 году, в рамках которого в 2014 году был разработан роботизированный комплекс BigDelta (рис.4), который имеет диаметр каркаса шесть метров, высота его достигает двенадцати метров [10]. Для создания объектов может использоваться обычная глина с присадками или обычный бетон на основе цемента. The BigDelta способен печатать небольшие дома целиком из подручных материалов, однако для перемещения его на но-

вое место требуется демонтаж и монтаж конструкции, что занимает около 4 часов времени трех человек и что делает невозможным изготовление строительных конструкций длиной более 6 метров. В числе достоинств комплекса следует отметить низкий расход энергии при данной конструкции, так как по трем вертикальным осям движется только экструдер, нагрузка на каждую ось составляет около 70 кг и требует установки приводов линейных перемещений мощностью около 300 Вт.



Рис. 4. Строительный роботизированный комплекс The BigDelta

Другим подходом к строительству сооружений является циркулярный строительный 3D-принтер ApisCor, разрабатываемый инженером Чен-Юн-Тай [11]. Данное устройство отличается от предыдущих моделей оригинальной кон-

струкцией. Данный 3D-принтер не является классическим трехосевым роботом, он базируется на вращающейся основе и имеет манипулятор в форме крана (см. рис.5)

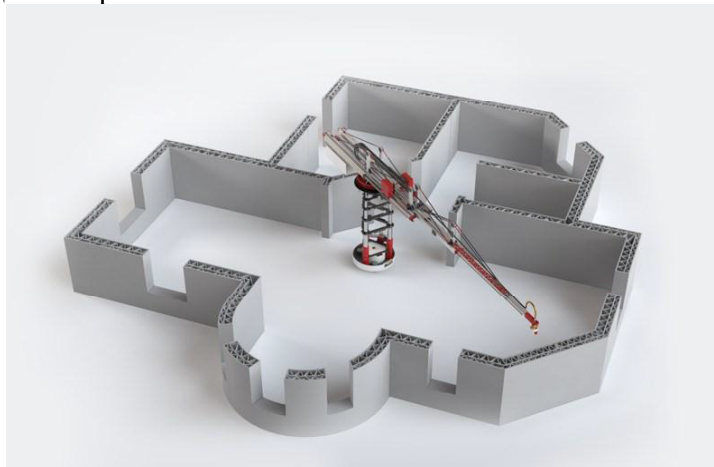


Рис. 5. Строительство зданий с помощью циркулярного 3D-принтер ApisCor

Данный принтер устанавливается в центре строительного объекта, и фактически, строительство происходит не снаружи, а изнутри, что по мнению разработчиков позволяет экономить до 70 % на цене строительства объектов. Управляющая программа данного строительного принтера имеет графический интерфейс. Она использует стандартный G-код: .cnc , .nc , .tap, .txt (стандарт текстовых файлов ISO 6983-1:2009). После загрузки G-кода в программу, она автоматически преобразует его в цилиндрические координаты, которые определяют траекторию движения экструдера. Сервер передачи данных базируется на контроллере RaspberryPi, который реализует базовые процедуры передачи управляющих команд и G-кода в цифровой сигнальный процессор, необходимый для расчета перемещений всех узлов принтера.

Программа работает в операционной системе Windows и использует TCP-протокол обмена данных. Программа использует стандартный набор управляющих модулей: загрузка кода, выбор области печати, вычисление цилиндрических координат, привязка к выбранной области печати, контроль скорости и ускорения.

Существенным недостатком роботизированного комплексов ApisCor является сложность задачи стабилизации положения экструдера в реальных условиях эксплуатации, поскольку при большой длине вылета руки печатающего механизма будут возникать колебания, связанные с динамикой движения экструдера или внешними воздействиями (например, ветер). Эти факторы существенно влияют на точность работы такого роботизированного комплекса.

В связи с этим поставлена задача создания алгоритмов, позволяющих универсализировать каждую из управляющих программ для выполнения сходных технологических задач, с возможностью удобной переналадки в зависимости от исходных данных и необходимых траекторий движения выходного звена.

Программный модуль создавался на базе лаборатории мехатроники и робототехники в центре высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова. Исследования проводились на робототехническом комплексе (рис. 6).



Рис. 6. Робототехнический комплекс для 3D-печати изделий

В состав комплекса входят следующие компоненты:

- робот-гексапод,

- блок управления подачей печатающего материала

- печатающая головка

Робот-гексапод имеет шесть степеней свободы выходного звена, высокую точность позиционирования  $\pm 0,1$  мм, грузоподъемность до 190 кг. Данная шестистержневая конструкция с параллельной кинематикой обеспечивает роботу необходимую жесткость при выполнении различных операций, требующих приложения силы, а также достаточно большую рабочую зону в пределах 1040 мм.

Блок управления подачей печатающего материала (рис. 7) состоит из следующих основных компонентов: 1 – корпус блока управления

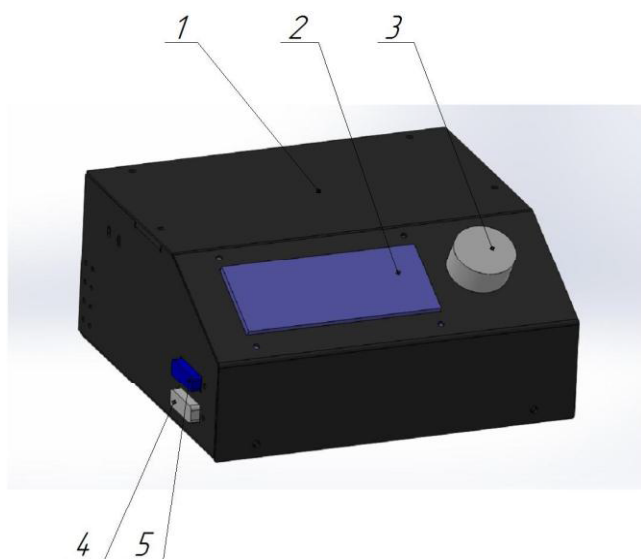


Рис. 7. Блок управления подачей печатающего материала

Блок управления подачей печатающего материала и робот-гексапод взаимодействуют следующим образом. В ходе работы посредством дискретных входов/выходов между блоком управления и контроллером робота происходит обмен информацией. Для каждого сигнала существует гальваническая развязка в виде оптопар РС817 для обеспечения безопасной работы и быстродействия.

На рисунке 9 приведен алгоритм управления движением робота-гексапода и подачи материала в печатающую головку при 3D-печати строительных изделий. Сигнал с контроллера Arduino MEGA 2560 1, платформа которого содержит 54 цифровых входов/выходов, поступает на плату расширения 2. Плата расширения Ramps 1.4 полностью совместима с контроллером Arduino MEGA 2560 и позволяет собрать полноценный контроллер 3D-принтера. На плате так же имеются входы обратной связи от конечных выключателей, ограничивающих перемещение по осям и вход термометра экструдера.

подачей пластика; 2 – экран; 3 – ручка управления; 4 – разъем RJ1; 5 – разъем RJ2.

Печатающая головка (рис. 8) крепится к выходной платформе робота-гексапода и в зависимости от конфигурации строительного изделия, а также требований, предъявляемых к нему, может быть оснащена соплами различного диаметра, что позволяет повысить скорость печати за счет толщины печатаемого слоя. В состав печатающей головки входят: 1 – корпус печатающей головки; 2 – вентилятор  $40 \times 40 \times 10$ ; 3 – двигатель подачи печатающего материала; 4 – блок нагрева печатающего материала; 5 – сопло  $0,8$  мм; 6 – механизм подачи печатающего материала; 7 – радиатор; 8 – вентилятор  $40 \times 40 \times 20$ .

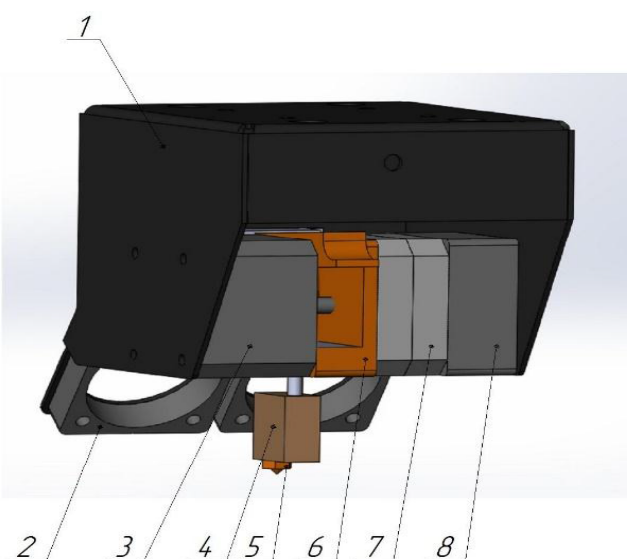


Рис. 8. Печатающая головка

На плате дополнительно установлены разъемы для подключения карты памяти типа SD и дисплея. На плату расширения устанавливается драйвер двигателя Polulu A4988 3, который управляет шаговым двигателем 4. В качестве шагового двигателя используется двигатель модели Nema 17, это самый оптимальный вариант по мощности и стоимости, а также данный шаговый двигатель широко зарекомендовал себя при конструировании 3D-принтеров. Также, с платы расширения подается напряжение 12В на нагреватель 5, а с учетом того, что контроллер поддерживает широтно-импульсную модуляцию (ШИМ), то появляется возможность управления скоростью вентилятора. Вентилятор на 3D-принтере может быть постоянно включенным на маленькой скорости, начиная со второго слоя, потом увеличивается скорость обдува при печати маленьких слоев. Нагреватель производит нагрев печатающего материала до необходимой температуры. В качестве объекта управления в нашем случае используется сопло 6, которое

может иметь различный диаметр. Для измерения температуры экструдера и платформы в конструкции используется термодатчик Т3650 7 номиналом 100 кОм. Термодатчик связан с кон-

троллером и является очень важной частью конструкции, так как разные виды материала требуют определённых температур и их нужно постоянно контролировать.

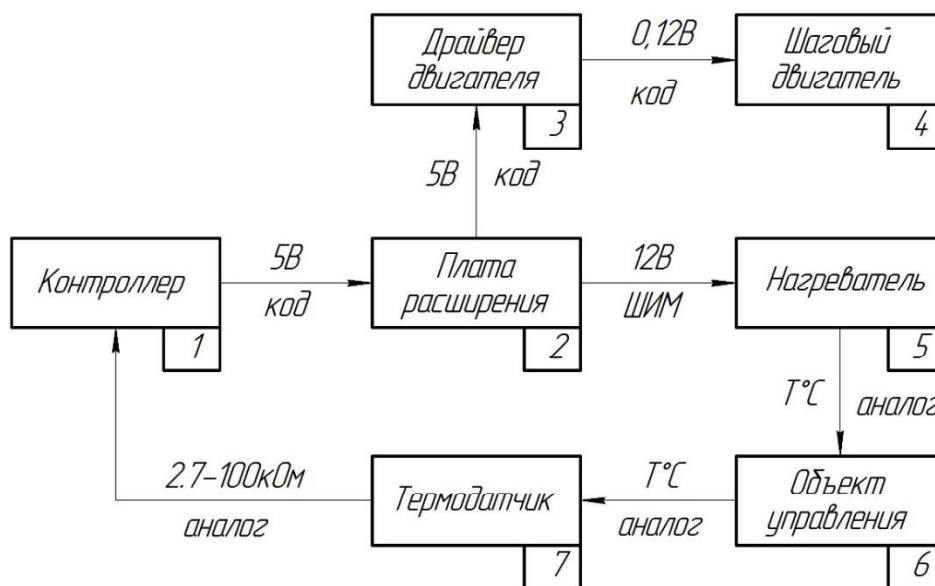


Рис. 9. Алгоритм управления движением робота-гексапода и подачи материала в печатающую головку при 3D-печати изделий

При взаимодействии блока управления подачей печатающего материала и контроллером робота-гексапода возникают следующие сигналы:

- 1) RO1 – выход с робота 1 (вход в блок управления) – разрешение на нагрев печатающего материала.
  - а) ON – нагрев разрешен
  - б) OFF – нагрев запрещен
- 2) RO2 – выход с робота 2 (вход в блок управления) – откат печатающего материала
  - а) ON – откат печатающего материала назад
  - б) OFF – откат печатающего материала вперед
- 3) RO3, RO4, RO5 – выход с робота-гексапода 3, 4, 5 (вход в блок управления) – двоичный код толщины слоя печати. Толщина слоя зависит от диаметра сопла.
- 4) RO6, RO7, RO8 – выход с робота 6, 7, 8 (вход в блок управления) – двоичный код скорости печати на определенной толщине слоя. Скорость печати регулируется в пределах от 0 до 57 мм/сек

Необходимо понимать, что для каждого определенного слоя печати существуют свои скорости печати. Так, например, при маленьких толщинах, скорость печати может осуществляться быстро, при больших толщинах – медленно.

Чтобы начать 3D-печать изделий на робототехническом комплексе необходима 3D-модель в формате .stl, которую нужно преобразовать в G-код. В нашем случае для создания 3D-моделей использовался программный комплекс

Solidworks, в котором проектировались 3D-модели строительных изделий различной сложности. Программное обеспечение, которое отвечает за преобразование объемной модели в G-код, называется «слайсером». Он позволяет перед печатью посмотреть, как размещена модель на столе, надо ли поддержки и выбрать все нужные параметры, в том числе скорость печати, толщину слоя, процент заполнения и т.д. Экспериментируя с настройками слайсера, можно добиться отличного качества для печати разного типа моделей. Модель режется (слайсится) по слоям. Каждый слой состоит из периметра и/или заливки. Модель может иметь разный процент заполнения заливкой, также заливки может и не быть (пустотелая модель). На каждом слое происходят перемещения по осям XY с нанесением расплава печатающего материала. После печати одного слоя происходит перемещение по оси Z на слой выше, печатается следующий слой и так далее.

На рисунках 10 и 11 показаны рабочее поле программы “Slicer”, куда добавлена пробная 3D-модель, и панель настроек печати (“Print Settings”). Одним из самых важных параметров, влияющих на качество печати является высота слоя (Layer height). При установке высоты слоя необходимо опираться на геометрию печатаемой модели и за какое время ее необходимо напечатать. При меньших параметрах печать будет осуществляться гораздо дольше. Главное правило при выставлении этого параметра: он не может превышать толщину используемого соп-

ла. Также, необходимо выбрать высоту первого слоя. Она, как правило, задается немного больше параметра *Layer height* для лучшего закрепления модели на столе. Поле *Perimeters* устанавливает количество слоев контура модели (или количество слоев стенки модели). Чем

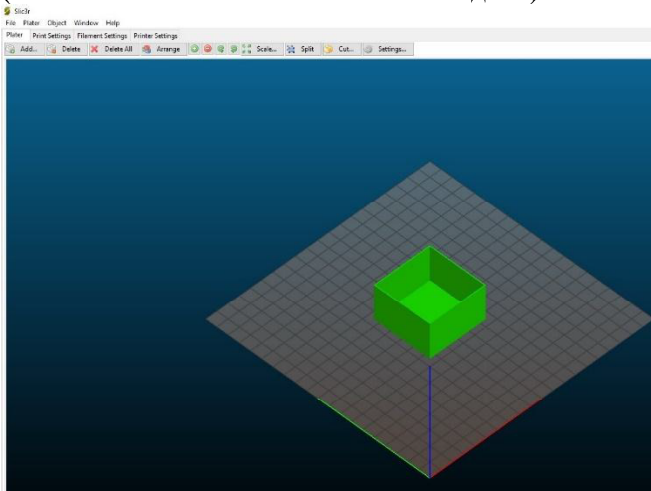


Рис. 10. Рабочее поле программы Slicer

Вторым важным параметром настроек печати является вкладка заполнение (“Infill”). Заполнение – это заливка пустого пространства внутри модели. Чем выше процент заполнения, тем крепче получается модель, но печатается

меньше число, тем меньше толщина стенки модели, а значит, модель будет более хрупкая. Минимально – 1, оптимально – 3–4 шт. В поле *Solid layers* необходимо добавить количество слоев с верхней (top) и нижней (bottom) закрывающих плоскостей модели (оптимально по 3–4).

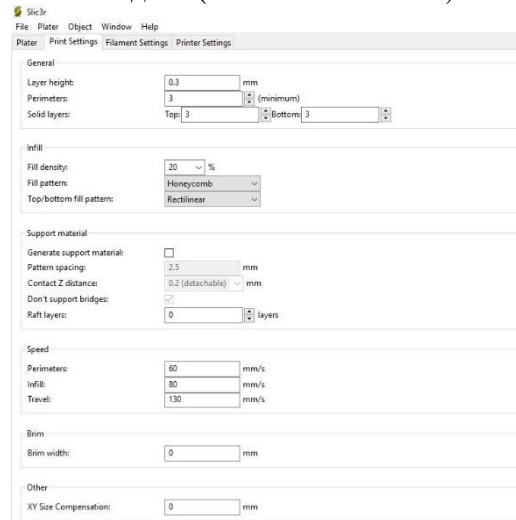


Рис. 11. Панель настроек печати в программе Slicer

при этом гораздо дольше, поэтому значение поля зависит от требований, предъявляемых к строительным изделиям. В программе можно выбрать различные виды заполнения модели печатающим материалом (рис. 12)

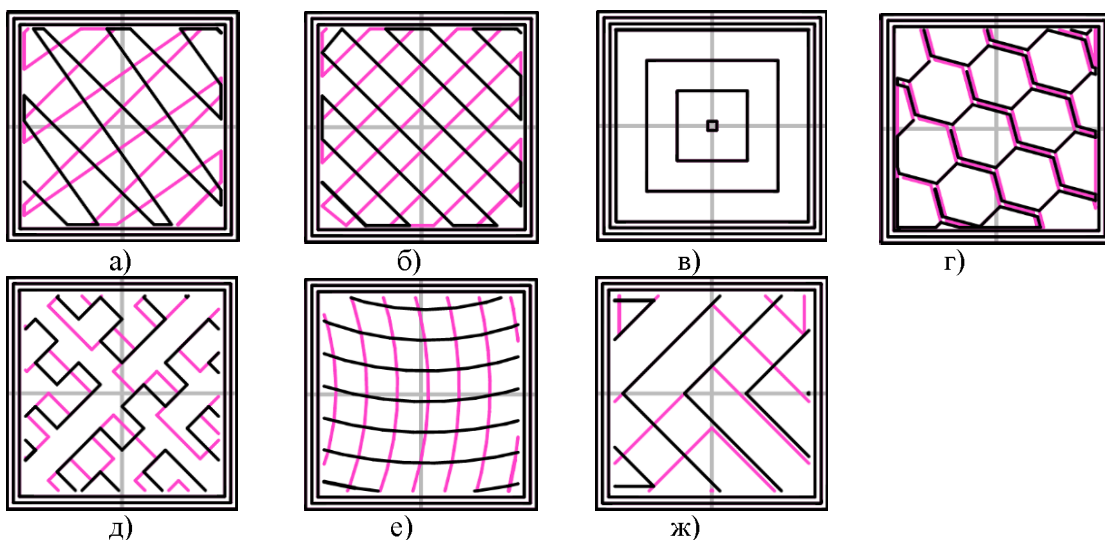


Рис. 12. Виды заполнения модели печатающим материалом:

- а) Линейное (Line); б) Прямолинейное (Rectilinear); в) Концентрическое (Concentric);  
 г) «Медовые соты» (Honeycomb); д) Кривая Гильберта (Hilbert Curve);  
 е) Хорды Архимеда (Archimedean Chords); ж) Спиральная октаграмма (Octagram Spiral)

Для каждого вида заполнения модели печатающим материалом можно выбрать процент заполнения в поле *Fill density*. Значения, вводимые в поле должны быть в пределах от 0 (без заполнения) до 0,99 (полное заполнение). Самым оптимальным из видов заполнения модели печатающим материалом считается honeycomb («медовые соты»). 3D-модели, полученные дан-

ным видом заполнения имеют небольшой вес и оптимальную прочность. Для верхних и нижних слоев печатаемой модели можно выбрать свой вид заполнения в поле *Top /bottom fill pattern*. На рисунке 13 показано изменение некоторых видов заполнения с ростом плотности (процента заполнения).

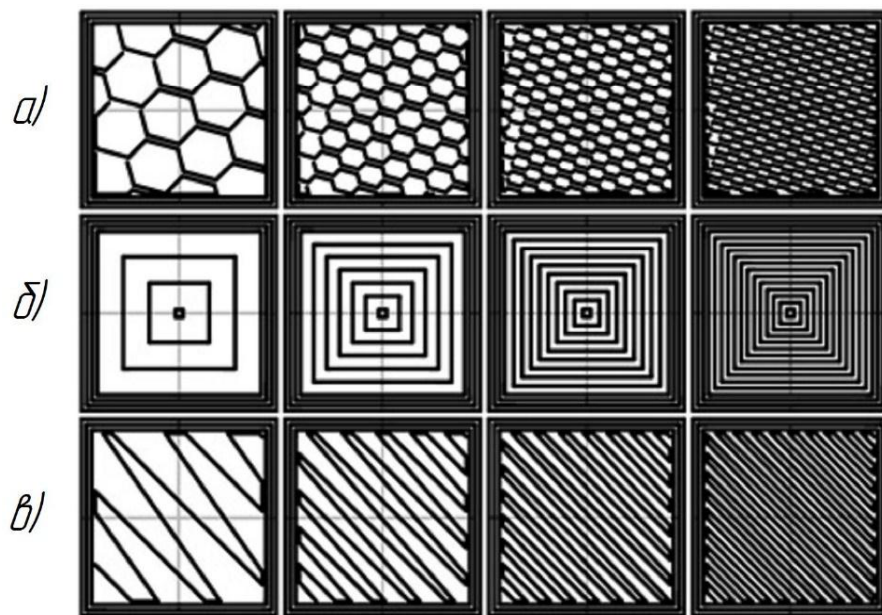


Рис. 13. Изменение видов заполнения с ростом процента заполнения:  
а) «Медовые соты» (Honeycomb); б) Концентрическое (Concentric); в) Линейное (Line)

Еще одним важным параметром настроек являются поддержки (“Support material”). Печать поддержек необходима для моделей с сильно выступающими или висящими в воздухе элементами. Печать поддержек можно включить в поле Generate support material. В настройках печати можно выбрать на каком количестве слоев

будет печататься поддержка, а также установить угол свеса модели, свыше которого и будут использоваться поддержки. Поддержки бывают всего трех видов: прямолинейная (Rectilinear); прямолинейная сетка (Rectilinear Grid); «медовые соты» (Honeycomb) (рис.14). Вид поддержки выбирается в поле Pattern.

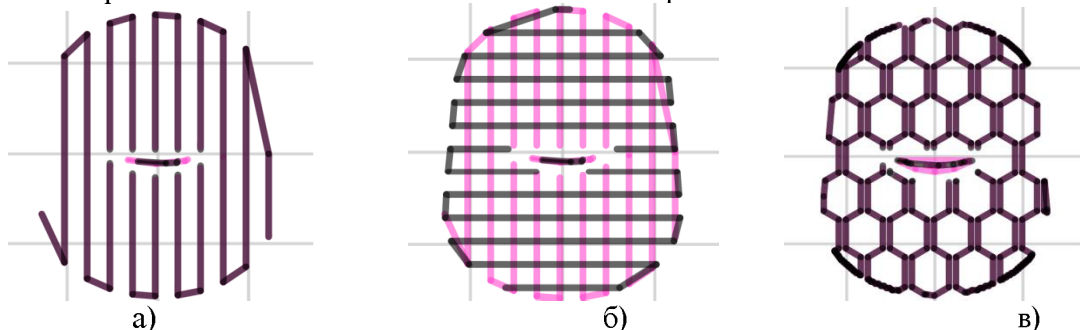


Рис. 14. Виды поддержек:  
а) прямолинейная (Rectilinear); б) прямолинейная сетка (Rectilinear Grid); в) «Медовые соты» (Honeycomb)

Вместе с поддержками при печати 3D-модели можно выбрать и печать плота в поле (Raft layers). По сути плот – те же поддержки, только используется он, начиная с первого слоя, в основном для подъема модели на определенную высоту, а также для закрепления печатающего материала на основании в том случае, если у основания есть какие-то механические дефекты.

Очень важным параметром при 3D-печати является скорость. В программе Slicer скорость печати выбираем в поле “Speed”. Для каждого печатаемого изделия необходимо выбирать оптимальную скорость печати, так как при увеличении скорости печати ухудшается качество модели. Отдельно можно выбрать скорость печати

контура модели в поле Perimeters, скорость печати выбранного вида заполнения в поле Infill, а также скорость перемещения печатающей головки при переходе с одного слоя на другой в поле Travel.

В результате выполнения поставленной задачи были разработаны и реализованы алгоритмы в составе управляющих программ, позволяющие универсализировать их для выполнения 3D-печати изделий. Программа управления на основе данного алгоритма более простая, а также универсальная, что позволяет применять ее ко всей серии роботов с подобным контроллером. В результате разработан робототехнический комплекс для 3D-печати изделий различных размеров при помощи выходного сопла,



которое производит распыление рабочего вещества, а также приводятся основные настройки 3D-печати, с правильным выбором которых можно достичь необходимого качества получаемых моделей изделий.

*\*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, Соглашение № 16-19-00148.*

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Магергут В.З. Подходы к построению дискретных моделей непрерывных технологических процессов для синтеза управляющих автоматов / Магергут В.З., Игнатенко В.А., Бажанов А.Г., Шаптала В.Г. // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2013. № 2. С. 100-102.
2. Gardiner J., 2009, Sustainability and Construction Scale Rapid Manufacturing: a Future for Architecture and the Building Industry, Royal Melbourne Institute of Technology (RMIT) - 14th May Conference at Rapid 2009 Exhibition, Chicago – Illinois.
3. Exploration colonization resource extraction and utilization of Moon and Mars (ECROMM), in: Proceedings of the 62nd International Astronautical Congress IAC, Cape Town. Raval . 2011. 7845-51.
4. Cesaretti, Giovanni, Enrico Dini, Xavier de Kestelier, Valentina Colla, Laurent Pambaguian (January 2014). Building components for an outpost on the Lunar soil by means of a novel 3D printing technology. Acta Astronautica 93:430-450. doi:10.1016/j.actaastro.2013.07.034;
5. Ceccanti F., Dini E., De Kestelier X., Colla V., Pambaguian L.. 3D printing technology for a moon outpost exploiting lunar soil. 61st International Astronautical Congress, Prague, 2010, 9 p. и Goulas A., Friel R. J. 3d Printing with Moondust. Rapid Prototyping Journal. 09/2016; 22(5)
6. Строительные 3D принтеры. URL: <http://specavia.pro/catalog/stroitelnye-3d-printery/>
7. Свидетельство о регистрации Программы ЭВМ 2013616795. Программное обеспечение разработано на языке PureBasic и может функционировать под управлением операционных систем Windows и Linux. Оно предназначено для управления автоматизированным и роботизированным оборудованием. Номер регистрации (свидетельства): 2013616795, Дата регистрации: 22.07.2013, Номер и дата поступления заявки: 2013614653 06.06.2013, Дата публикации: 20.09.2013. Автор: Мотин В.М. Правообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Владивостокский государственный университет экономики и сервиса» (ВГУЭС) (RU).
8. Свидетельство о регистрации Программы ЭВМ 2014613261. Интерфейсная программа управления работой устройства быстрого трехмерного прототипирования. Дата регистрации: 21.03.2014. Номер и дата поступления заявки: 2013660571 18.11.2013. Дата публикации: 20.04.2014. Правообладатель: Общество с ограниченной ответственностью «Научно-Производственное Предприятие Интеллектуальные Информационные Системы».
9. Alan M. Lytle, Kamel S. Saidi, Roger Bostelman, William C. Stone, Nicholas A. Scott. Adapting a teleoperated device for autonomous control using three-dimensional positioning sensors: Experiences with the NIST RoboCrane // Automation in construction 13(1):101-118 · JANUARY 2004 DOI: 10.1016/j.autcon.2003.08.009.
10. BigDelta WASP 12 meters. URL: <http://www.wasproject.it/w/en/bigdelta-the-history/>.
11. New standards of construction technology. URL: <http://apis-cor.com/>.

**Rybak L.A., Mamaev Y.A., Malyshev D.I., Virabyan L.G.**

### SOFTWARE MODULE OF HEXAPOD ROBOT SPECIFIED MOVEMENT TRAJECTORY OF OUTPUT UNIT FOR 3D-PRINTING OF PRODUCTS

*The article deals with the problems of building the robot hexapod motion control algorithms with 3D-printing of products. The algorithm is based on the principles of building the cycle control programs and using of inside robot controller registers. Preparation of coatings with using of hexapod robot including a multi-layer, forming a by using the postprocessor has high complexity post-processor writing data. The control program on the basis of this algorithm is more simple, as well as universal, applicable to the entire series of robots with a similar controller. The paper presents the basic principles of working with the developed software module and is familiarization with the software interface. The basic configuration through 3D-printing developed software module and describes the optimal choice of these settings to achieve the desired quality of the product models.*

**Key words:** algorithm, hexapod robot, modeling, 3D-printing, the controller, software module, extruder, control block.

**Рыбак Лариса Александровна** доктор, технических наук, профессор, кафедры технологии машиностроения.  
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.  
Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.  
E-mail: rl\_bgtu@intbel.ru

**Мамаев Юрий Александрович**, главный инженер, ООО «Карботек»  
Адрес: Россия, 308023, Белгород, ул. Студенческая, к. 28, пом. 307.  
E-mail: rl\_bgtu@intbel.ru

**Мальшев Дмитрий Иванович**, аспирант кафедры технологии машиностроения.  
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.  
Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.  
E-mail: rl\_bgtu@intbel.ru

**Вирабян Лусине Гарниковна**, магистрант кафедры технологии машиностроения.  
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.  
Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.  
E-mail: rl\_bgtu@intbel.ru