

**Ключевые слова:**

аддитивные технологии, 3D-печать, микрошнековый экструдер, тепловые потери

ПРИМЕНЕНИЕ ПОТОКОВОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НЕДОСТАТКОВ КОНСТРУКЦИИ МИКРОШНЕКОВОГО ЭКСТРУДЕРА ДЛЯ 3D-ПЕЧАТИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫМИ ПОЛИМЕРАМИ

Екатерина БОГОДУХОВА, Павел ПЕТРОВ

На базе виртуального эксперимента с использованием программы T-FLEX Анализ определены основные направления развития конструкции микрошнекового экструдера для 3D-печати высокотемпературными полимерами. Выявлены тепловые потери, возникающие в существующей конструкции и приводящие к снижению производительности.

Актуальным направлением развития аддитивных технологий является 3D-печать высокотемпературными полимерными материалами, которая позволяет изготавливать функциональные изделия, работающие при температуре выше 350 °С. Развитие данной отрасли промышленности имеет высокий потенциал и активно внедряется в производственную практику, позволяя сократить цикл изготовления деталей более чем в два раза и уменьшить количество элементов в собранной конструкции.

В данной работе основное внимание уделено анализу эффективности работы микрошнекового экструдера. Анализ выполнен на основе аналитического инструмента ТРИЗ – потокового анализа. Результаты, которые могут быть получены на его основе, позволяют определить вектор возможного развития технической системы (ТС) (в данном случае микрошнекового экструдера), в том числе определить основные узлы для модификации. Данный подход позволяет устранить уязвимые места ТС на этапе ее разработки и повы-

сить производительность объекта при последующей эксплуатации. Это оказывается возможным на основе оценки факторов, негативно влияющих на рациональное распространение через техническую систему потоков вещества, энергии и информации [1].

В случае микрошнекового экструдера в качестве потока вещества рассматривается поток расплавленного пластика РЕЕК, который формируется под действием силы, создаваемой шнеком. При этом расплавленный пластик перемещается внутри корпуса шнека из холодной в горячую зону. За счет наличия градиента температуры обеспечивается экструзия материала из горячей зоны через отверстие в сопле (рис. 1 и 2). Эффективность данного процесса тем выше, чем меньше тепловых потерь в системе. Применение потокового анализа направлено на анализ возможных тепловых потерь. Отметим также, что в данной работе на некоторых этапах реализации потокового анализа проводился вычислительный эксперимент с применением программы T-FLEX Анализ.

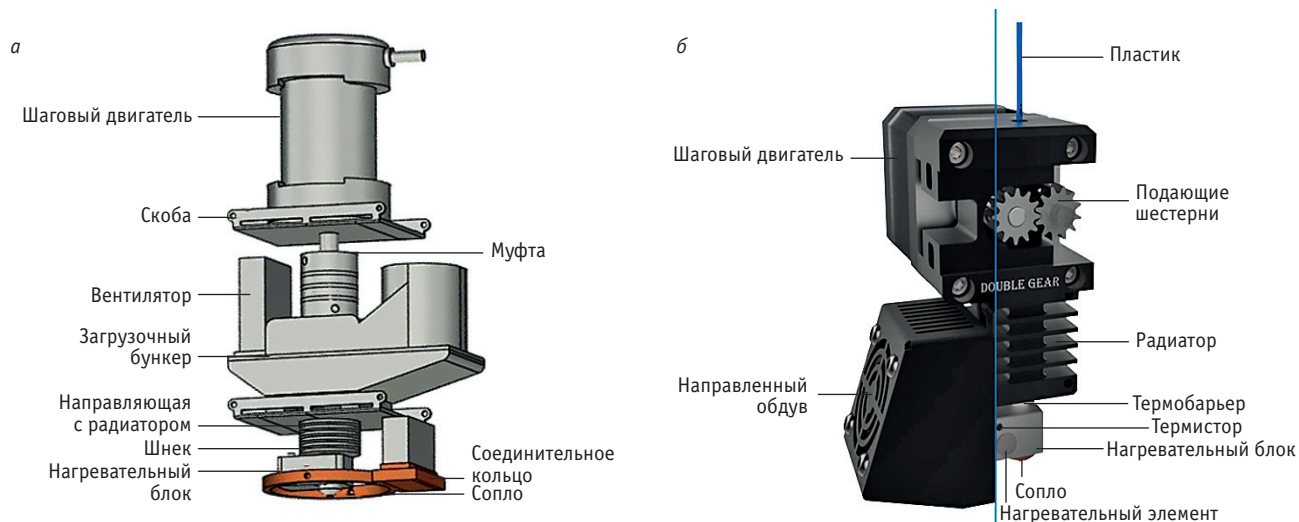


Рис. 1. Конструкция 3D-печатающей головки: а – микрошнековый экструдер; б – классический экструдер

Конструкция микрошнекового экструдера для 3D-печати гранулами полимера (рис. 1а) [2] представляет собой оптимизированную конструкцию классической 3D-печатающей головки, совмещенной с микрошнеком (рис. 1б) [3], реализующую технологию FDM/FFF, где экструзионный процесс осуществляется с помощью шнека, обеспечивающего принудительную подачу расплавленного материала в сопло, а материал в виде гранул подается в загрузочный бункер.

Основными компонентами микрошнекового экструдера являются: шаговый двигатель, фрикционная муфта, шнек и направляющая с радиатором, изготовленные из закаленной стали, алюминиевый термоблок, термопара, вентиляторы, нагревательный элемент, медное сопло и загрузочный бункер. Материалы компонентов подбираются в зависимости от условий их эксплуатации: закаленная сталь

сохраняет высокую твердость и износостойкость при температуре печати до 500 °С, медь и алюминий обладают высокой теплопроводностью [2]. Сравнительный анализ печатающих головок для обработки высокотемпературных пластиков, представленный в табл. 1, показывает, что сам экструдер должен обеспечивать нагрев материала в диапазоне от 275 до 540 °С [3].

Микрошнековый экструдер для 3D-печати гранулированным пластиком применяется в сферах, где необходимо изготовление функциональных деталей из температуростойких пластиков с улучшенными прочностными и тепловыми свойствами, а также высокими эксплуатационными характеристиками. Кроме того, он применяется при работе с пластиком, обладающим повышенной стойкостью к химически агрессивным средам, для использования в медицинской (имплантология),

Таблица 1. Характеристики высокотемпературных 3D-принтеров

| 3D-принтеры/печатающая головка | Температура экструдера, °С | Температура стола, °С | Температура камеры, °С | Кол-во экструдеров, сопел |
|--------------------------------|----------------------------|-----------------------|------------------------|---------------------------|
| 3DGENCE INDUSTRY F340 | 275–500 | 140–160 | 85 | 1(2) |
| RobozeOne +400 | 400 | 150 | 50 | 2(2) |
| Roboze Argo 500 | 550 | – | 180 | 1(1) |
| VSHAPER PRO | 430 | 150 | 70 | 1(1) |
| Intamsys FUNMAT PRO HT | 400 | 160 | 90 | 1(1) |
| Apium P220 | 540 | 160 | 300 | 1(1) |
| Mass Portal D400 DD | 475 | 120 | 50 | 2(2) |
| DynamicalTools DT600 | 500 | 150 | 70 | 2(2) |
| CreatBot F430 | 420 | 100 | 70 | 2(2) |
| E3D Titan Aqua | 285–400 | 140–150 | | 1(1) |
| Micron E.M.E Cobra | 400 | 150 | | 1(1) |
| I3D Innovation | 480 | 120 | | 1(1) |

аэрокосмической (детали РКТ), химической (емкости для вредных химических веществ, как для лаборатории, так и химических заводов), машиностроительной (детали для промышленных машин) отраслях. Таким образом, область применения разработанной 3D-печатающей головки охватывает все основные сферы производства [2].

В качестве материала для 3D-печати рассматривается полиэфирэфиркетон (ПЕЕК). Полукристаллический полимер с высокотемпературной устойчивостью обладает интересным сочетанием механических, химических и электротехнических эксплуатационных характеристик, которые сохраняются при рабочих температурах нагрева изделия из ПЕЕК до 310 °С. Он стоек к воздействию высокоэнергетических лучей (в том числе ультрафиолетовых лучей), к действию водяного пара [2, 11]. Характеризуется очень высокой стабильностью размеров. Поэтому, данный материал находит применение в сферах, где необходимы устойчивость к высоким температурам или к химически агрессивным средам: в медицинской, аэрокосмической, химической и ядерных областях [10, 11].

Основные характеристики:

- плотность – 1,32 г/см³;
- воспламеняемость – НВ/НВ 3 мм/6 мм;
- водопоглощение – 0,20%.

Для печати высокотемпературным пластиком ПЕЕК 3D-печатающая головка должна соответствовать следующим требованиям:

- диапазон максимальной температуры нагрева от 260 до 420 °С [11];
- наличие стального сопла или термостойкого покрытия в конструкции 3D-печатающей головки;
- обеспечение интенсивного и стабильного течения высокотемпературного полимерного материала из сопла.

Алгоритм применения потокового анализа в данной работе:

1. Оценка тепловых потерь на основе постановки и проведения вычислительного эксперимента.

2. Построение потоковой модели микрошнекового экструдера на основе результатов вычислительного эксперимента.
3. Выявление узких мест конструкции микрошнекового экструдера.

Для определения распределения температуры внутри микрошнекового экструдера, что необходимо для интенсивного и стабильного течения полимерного материала, с помощью программы T-FLEX Анализ, интегрированной в программный комплекс T-FLEX CAD [8], проведен вычислительный эксперимент, направленный на расчет тепловой задачи. Программа T-FLEX Анализ основана на численном методе решения задач – методе конечных элементов.

На первом этапе вычислительного эксперимента создается специальный объект «Задача», при этом определяется ее тип – «Тепловой анализ», и выбираются тела трехмерной модели экструдера, осуществляющие экструзию полимерного материала: направляющая с радиатором из закаленной стали, алюминиевый нагревательный блок и медное сопло (рис. 2), которые будут участвовать в расчете [9].

После создания задачи автоматически вызывается команда построения конечно-элементной сетки из тетраэдральных элементов. Тетраэдры аппроксимируют геометрию модели и используются для построения математической модели исходной конструкции. При создании сетки для каждой детали определяются такие параметры, как степень дискретизации, гладкость, локальные сгущения сетки и т.д. Точность оптимального размера сетки для направляющей с радиатором и сопла равна 0,04 мм, а для нагревательного блока – 0,1 мм. Прогиб кривой – 0,15 мм, плавность сгущения сетки – 1 мм по умолчанию для всех элементов. Что касается локальных сгущений, то они назначаются вручную в зонах наибольшего взаимодействия с температурами: основные отверстия зоны течения материала и соединительные отверстия для включения в систему других нагревательных элементов (рис. 3) [8, 9].

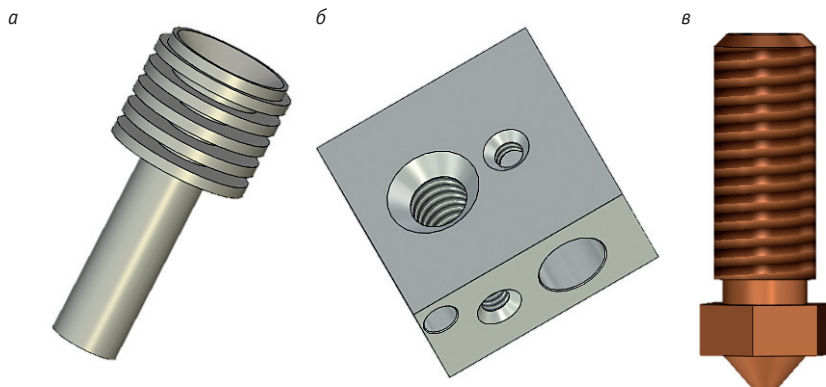


Рис. 2. 3D-модели деталей для экструзии материала:
 а – направляющая с радиатором; б – нагревательный блок; в – сопло

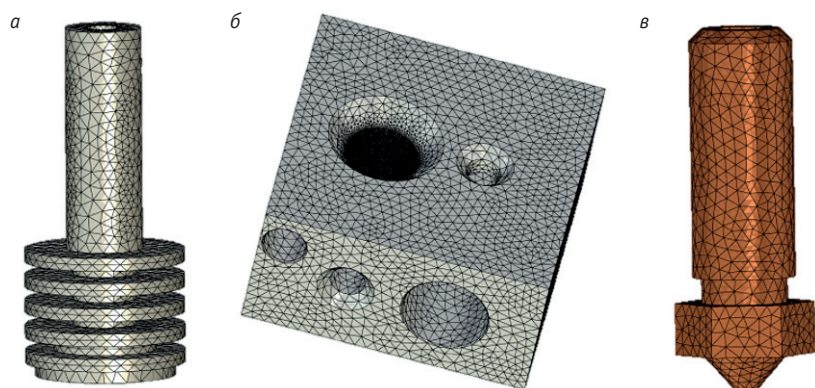


Рис. 3. Построение конечно-элементной сетки: а – направляющая с радиатором; б – нагревательный блок; в – сопло

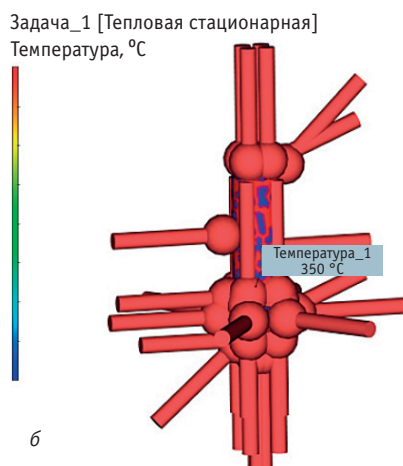
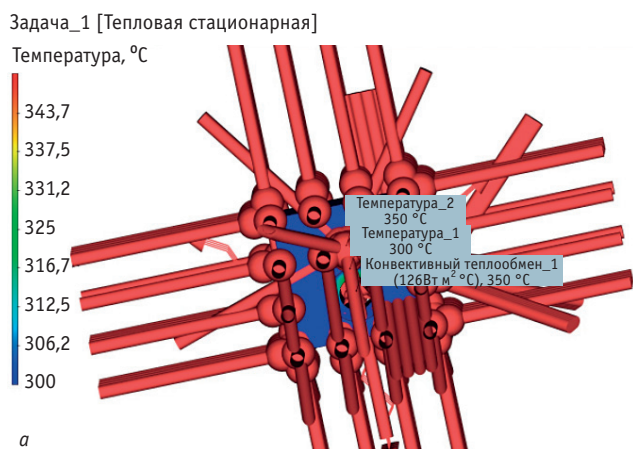
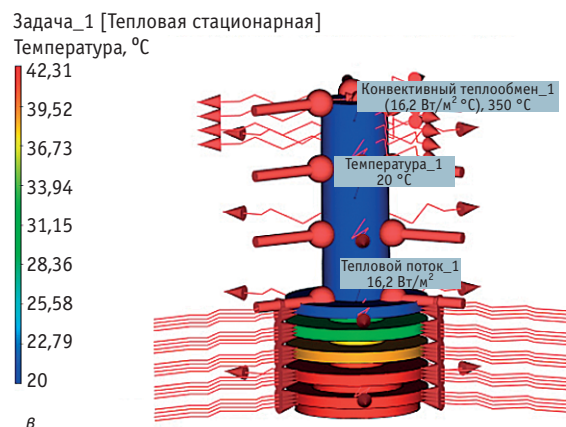


Рис. 4. Конечно-элементная модель элементов конструкции микрошнекового экструдера: а – нагревательный блок; б – сопло; в – направляющая с радиатором

Для успешного анализа и решения задачи теплопроводности, помимо создания конечно-элементной сетки, необходимо корректно определить тепловые нагрузки, являющиеся в данном случае граничными условиями. Для задания тепловых нагрузок в T-FLEX Анализе предусмотрен набор специализированных команд: «Температура», «Тепловой поток», «Конвективный теплообмен», «Тепловая мощность», «Излучение». Для конструкции микрошнекового экструдера задаются тепловые нагружения: для каждого элемента назначается начальная «Температура» (рис. 4), к нагреваемой расплавленным материалом внутренней поверхности направляющей с радиатором прикладывается «Тепловой поток» (рис. 4в), а на внешних теплоотводящих поверхностях направляющей с радиатором и нагревательного блока определяется граничное условие «Конвективный теплообмен» с температурой конвекции 350 °С, зависящей от температуры окружающей среды 20 °С. За счет включения в систему нагревательного элемента с температурой 350 °С наблюдается различие начальных температур термоблока (рис. 4а) [9].

Рассматриваемая в данной статье задача является задачей стационарной теплопроводности: тепловые нагрузки действуют неопределенно долгое время, система пришла в равновесное состояние и темпе-



ратурные поля не изменяются во времени – в каждой точке системы температура имеет свое установившееся значение [9].

По результатам теплового расчета конструкция микрошнекового экструдера характеризуется значительными потерями тепловой энергии, которые снижают ее производительность до минимальной. На следующем этапе анализа, учитывая полученные результаты вычислительного эксперимента, выполним потоковый анализ рассматриваемой ТС.

Потоки в технической системе являются специфическими компонентами. Главная особенность

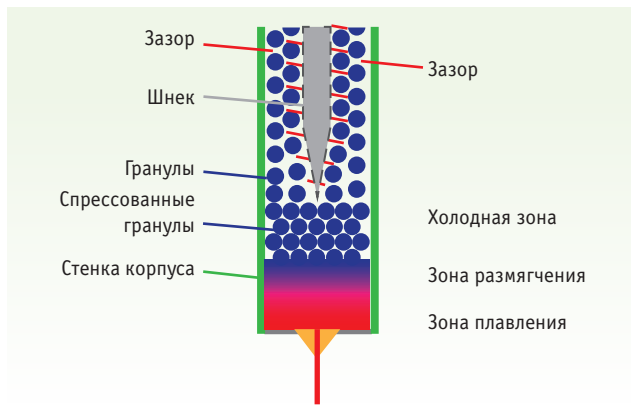


Рис. 5. Схема распределения температуры микрошнекового экструдера

потока как компонента – распределенные параметры (в пространстве и времени) [13].

Применение потокового анализа актуально для модификации узлов как новых, так и устоявшихся систем, так как потребности рынка постоянно возрастают. Каждая система имеет несколько потоков энергии, одни протекают



Рис. 6. Потоковый анализ микрошнекового экструдера

«параллельно» друг другу, другие «пересекаются», что приводит к неизбежной потере энергии. Конструкция микрошнекового экструдера имеет два основных потока: тепловой – теряется энергия электрического поля; поток материала – гранулы застревают внутри цилиндра (в расплавленном слое формируется пробка) (рис. 5) [12], от толщины которой зависит эффективность процесса экструдирования материала через сопло малого диаметра.

Таким образом, на основе проведенного теплового анализа, схемы распределения температуры микрошнекового экструдера и выявленных потоков энергии строится модель потокового анализа для определения потерь внутри системы (рис. 6). Вся система в целом в стационарном состоянии – сохранение энергии 100%. При включении в сеть: фрикционная муфта передает крутящий момент с шагового двигателя на шнек, в процессе чего появляются первые потери, связанные с несоосностью валов и компенсацией пускового момента на шаговом двигателе, далее энергия разделяется на два потока, отвечающих за перемещение и плавление материала. При течении расплавленного материала в сопло теряется 7% энергии: на трение (меняется в зависимости от толщины пробки) и на теплообмен (что связано с неэффективностью системы «термистор – нагревательный блок»). При изменении физического состояния материала теряется больше половины энергии данного потока: потери при нагреве – 10%, потери при выходе на заданную температуру [5].

На основании проведенного потокового анализа выделяются дальнейшие направления развития ТС: подбор материалов с подходящей теплопроводностью для элементов микрошнекового экструдера, взаимодействующих с энергетическими потоками ТС; увеличение КПД системы за счет уменьшения количества компонентов, потери которых составляют более 50%, и передача их функций другим элементам ТС; изменение формы шнека или принципа действия системы.

Проверить правильность определения потоков и потерь энергии можно с помощью системного функционального анализа [13], включающего в себя три этапа: структурный анализ, компонентный анализ и построение функциональной модели ТС для оптимального соотношения полезности функций. Компонентная модель системы описывает элементы ТС, обеспечивающие реализацию функций (табл. 2). Структурная модель микрошнековой 3D-печатающей головки (табл. 3) включает в себя: компоненты ТС, подсистемы (ПС) и надсистемы (НС), представленные в табл. 2 (ПС1-ПС13, К1-К5), а также взаимодействия между этими компонен-

Таблица 2. Компонентная модель микрошнекового экструдера

| ТС | ПС | Компоненты НС | | |
|-------------------------|-----------------------------|--------------------------------|-------------------|----------|
| Микрошнековый экструдер | ПС1. Шаговый двигатель | К1. Драйвер шагового двигателя | К5. Рама принтера | |
| | ПС2. Шнек | К2. Материал | | |
| | ПС3. Бункер загрузки гранул | | | |
| | ПС4. Радиатор | | | |
| | ПС5. Сопло | К2. Материал | | К3. Стол |
| | ПС6. Нагревательный блок | | | |
| | ПС7. Нагревательный элемент | | | |
| | ПС8. Вентилятор | К4. Отвертка | | |
| | ПС9. Скоба | | | |
| | ПС10. Соединительное кольцо | | | |
| | ПС11. Корпус | | | |
| | ПС12. Соединительная муфта | | | |
| | ПС13. Винт потайной | | | |
| | ПС14. Термистор | | | |

тами, где «+» означает взаимодействие, а «-» – его отсутствие [7].

Получившаяся матрица (см. табл. 3) позволяет установить связи для основных узлов модификации [6] конструкции микрошнекового экс-

трудера (рис. 7). После выявления главных функций этих узлов строится графическая функциональная модель системы с указанием всех элементов и функций, их названий, силы (недостаточная – пунктирная линия, достаточная –

Таблица 3. Структурная модель микрошнекового экструдера

| Элементы ТС и НС | ПС (элементы ТС) | | | | | | | | | | | | |
|------------------|------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|
| | ПС1 | ПС2 | ПС3 | ПС4 | ПС5 | ПС6 | ПС7 | ПС8 | ПС9 | ПС10 | ПС11 | ПС12 | ПС13 |
| ПС1 | | + | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| ПС2 | + | | + | + | + | - | - | - | - | - | - | + | - |
| ПС3 | - | + | | + | - | - | - | - | + | - | - | - | - |
| ПС4 | - | - | + | | + | + | - | - | + | - | - | - | - |
| ПС5 | - | - | - | + | | - | - | - | - | - | - | - | - |
| ПС6 | - | - | - | + | + | | + | - | - | - | - | - | - |
| ПС7 | - | - | - | - | - | + | | - | - | - | - | - | - |
| ПС8 | - | - | - | - | - | - | - | | - | - | + | - | + |
| ПС9 | + | - | + | + | - | - | - | - | | - | + | - | + |
| ПС10 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | + | - | + |
| ПС11 | - | - | - | - | - | - | - | + | + | + | | - | + |
| ПС12 | + | + | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | - |
| ПС13 | - | - | - | - | - | - | - | + | + | + | + | - | |
| К1 | + | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| К2 | - | + | + | + | + | - | - | - | - | - | - | - | - |
| К3 | - | - | - | - | + | - | - | - | - | - | - | - | - |
| К4 | - | - | - | - | - | - | - | + | + | + | + | + | + |
| К5 | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + |

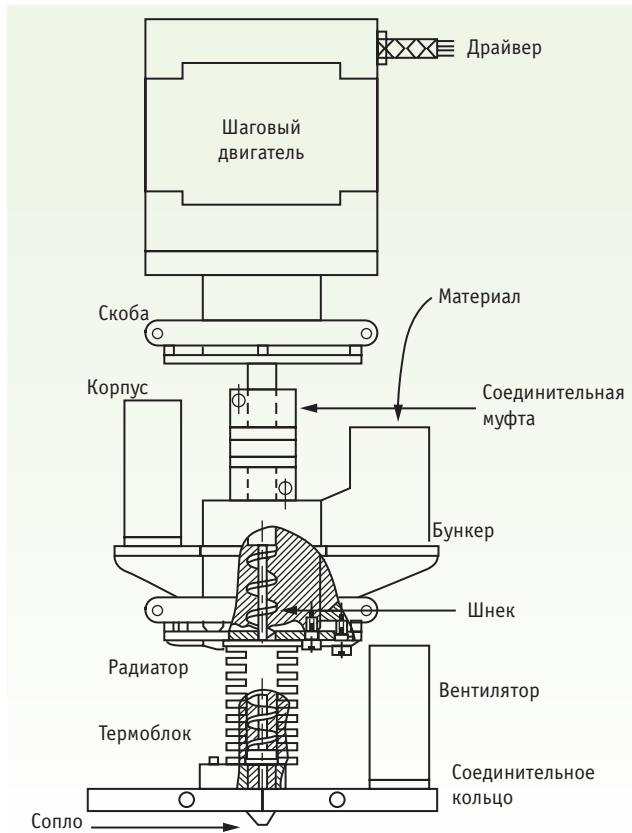


Рис. 7. Общая схема функционального моделирования конструкции микрошнекового экструдера

тонкая, а избыточная – жирная) и качества (вред – красный цвет, полезность – черный) с помощью использования графических символов. Блоки, определяющие компоненты системы, также имеют различия по цвету: желтый – элемент надсистемы (НС), коричневый – элемент подсистемы (ПС), и зеленый – обрабатываемый объект (рис. 8).

Уровень выполнения полезной функции определяется разницей между «требуемым значением» и «фактическим значением» параметра: избыточной – если фактическое значение параметра больше, чем требуемое; недостаточной – если фактическое значение меньше, чем требуемое. Избыточный и недостаточный уровни выполнения функций являются недостатками ТС, как и ее вредность, определяемая внешними факторами той среды, в которой она применяется [7].

Функциональная модель (рис. 8) позволяет выявить основные узлы модификации: материал – заполнение бункера загрузки (сила – Н), сопло – потери тепла (вредность функции) и шнек – скорость вращения (сила – Н), удерживание материала (вредность функции), которые требуется доработать для устранения нежелательных эффектов.

Проводя аналогию между потоковым и функциональным анализом, можно сделать вывод, что наиболее уязвимым местом микрошнекового экструдера является формирование пробки из расплавленного слоя на границе холодной и горячей

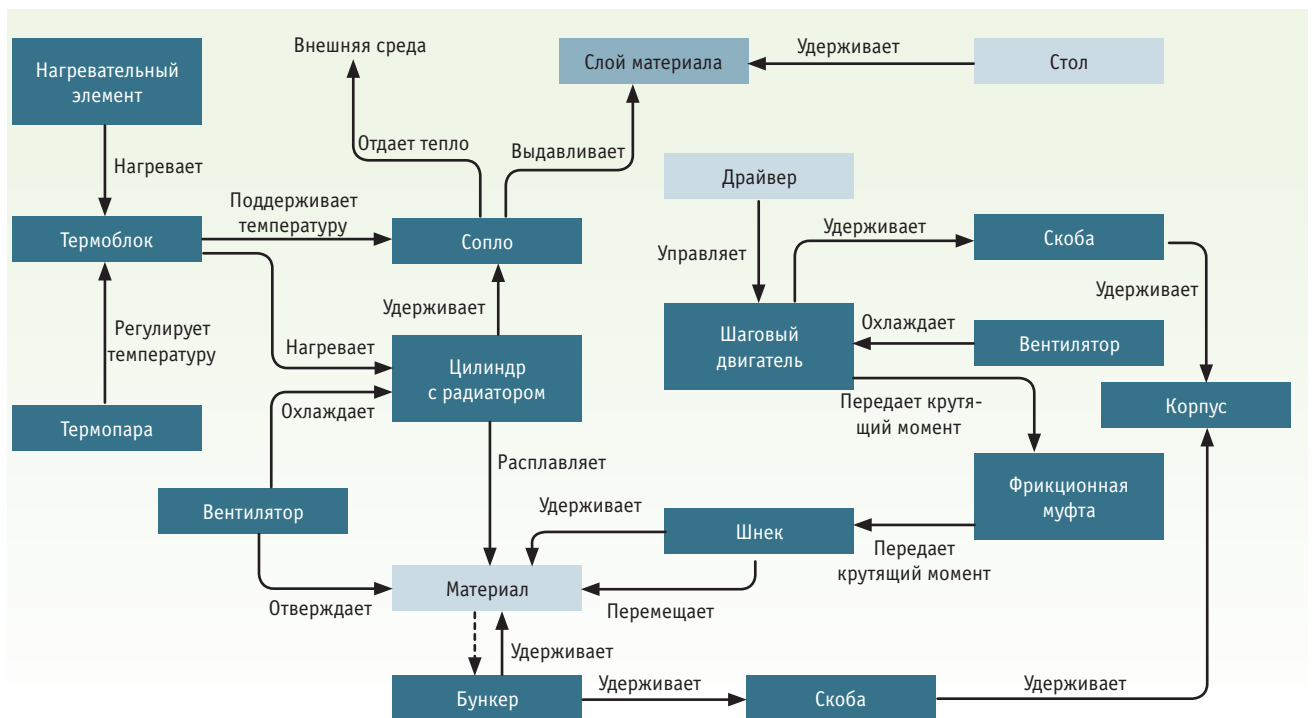


Рис. 8. Графическая функциональная модель микрошнекового экструдера

зоны экструдера: при перемещении материала потери на трение зависят от толщины пробки (см. рис. 6), функция шнека – вредная (см. рис. 7). Таким образом, у технической системы появляются противоречия, для разрешения которых формулируется задача, и данные либо заносятся в программный комплекс Comripo-TRIZ [6], который автоматически формирует решения на основе таблицы Г.С. Альтшулера [4], либо вручную – с применением мозгового штурма или других приемов ТРИЗ.

ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

С помощью программы T-FLEX Анализ определены тепловые нагрузки технической системы (см. рис. 4) и поставлен виртуальный эксперимент по решению задачи теплопроводности. На основе полученных результатов выявлены тепловые потери, приводящие к снижению производительности и требующие внесения технических изменений в конструкцию микрошнекового экструдера.

Выполненные потоковый и функциональный анализы показали основные направления развития ТС. Построенные компонентная, структурная и графическая функциональная модели определили функциональное взаимодействие между компонентами системы и указали на ключевые уязвимые места системы, а появление противоречий подтвердило наличие дальнейшего развития ТС, при разрешении которых возможно получить новые технические решения по конструкции.

Полученные результаты подтвердили значимость проведения подобных научно-исследовательских работ на примере микрошнекового экструдера для 3D-печати высокотемпературными полимерами для последующего исследования режимов работы конструкции, что является предметом будущих публикаций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Любомирский А.Л. Закон повышения эффективности использования потоков вещества, энергии и информации // Доклад, ТРИЗ-Саммит-2006. <http://www.metodolog.ru/00816/00816.html>
2. Богодухова Е.С., Петров П.А. Разработка концепции микрошнековой 3D-печатающей головки для печати пластиком РЕЕК. М.: Сборник СНК-2020: материалы Юбилейной LXX открытой международной студенческой научной конференции Московского Политеха, 2020. С. 99–102.
3. Богодухова Е.С., Петров П.А. Обзор конструкции печатающих головок для высокотемпературных и инженерных пластиков // Машиностроение и инженерное образование. 2020. № 3 (в печати).
4. Альтшуллер Г.С. Основные приемы устранения технических противоречий при решении изобретательских задач. Баку: Гянджлик, 1971. 52 с.
5. Хотимлянский Ю. Энергетический анализ технических систем. Баку, 1974. 18 с. (рукопись).
6. Альтшуллер Г.С. Алгоритм решения изобретательских задач (АРИЗ-85В). Метод. разраб. для слушателей семинара «Методы решения науч.-техн. задач». Л.: Ленингр. металлч. з-д., 1985. 123 с.
7. Альтшуллер Г.С., Злотин Б.Л., Зусман А.В., Филатов В.И. Поиск новых идей: от озарения к технологии (теория и практика решения изобретательских задач). Кишинев: Картя Молдовеняска, 1989. 381 с.
8. Свидетельство № 2011618726 о государственной регистрации программы для ЭВМ. T-FLEX Анализ – система конечно-элементного анализа изделий. Правообладатель: ЗАО «Топ Системы». Зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 09.11.2011.
9. Справка по конечно-элементному и тепловому анализу в системе T-FLEX. М.: ЗАО «Топ Системы».
10. Обзор высокотемпературных FDM-пластиков для 3D-печати [Электронный ресурс]. Сайт о высокотемпературных материалах. URL: <https://3dtoday.ru/blogs/top3dshop/overview-of-high-temperature-fdm-plastics-for-industrial-3d-printing/> (дата обращения 27.12.2020)
11. Высокотехнологичные инженерные пластики [Электронный ресурс]. Сайт о пластике РЕЕК. URL: <https://plastimet.ru/plastiki/poliefirfirketon-peek-peek-t-260s.html> (дата обращения 27.12.2020)
12. Распределение температуры внутри экструдера [Электронный ресурс]. Сайт об экструдерах для 3D-принтеров. URL: <https://3d-diy.ru/wiki/3d-printery/kakoy-ekstruder-vybrat-dlya-3d-printera/> (дата обращения 29.12.2020)
13. Лебедев Ю.В. Потоковый анализ // В сб. докладов IX международной конференции «ТРИЗ. Практика применения и развитие методических инструментов». Москва 10–11 ноября 2017 года. Т. 1 «Инструменты постклассической ТРИЗ». С. 36–69.

БОГОДУХОВА Екатерина Сергеевна – студентка 4-го курса Московского политехнического университета

ПЕТРОВ Павел Александрович – кандидат технических наук, заведующий кафедрой Московского политехнического университета