

УДК 004.89:678.027.3

СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПО УПРАВЛЕНИЮ КАЧЕСТВОМ МНОГОАССОРТИМЕНТНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ ПЛЕНОК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВИРТУАЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ АППАРАТНО ГИБКИХ ЭКСТРУДЕРОВ

Т.Б. Чистякова

Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)
Россия, 190013, Санкт-Петербург, Московский пр-кт, 26
E-mail: chistb@mail.ru

А.Н. Полосин

Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)
Россия, 190013, Санкт-Петербург, Московский пр-кт, 26
E-mail: polosin-1976@mail.ru

Ключевые слова: поддержка принятия решений, управление качеством, математические модели, 3D модели, программный комплекс, экструдеры с перенастраиваемой конфигурацией, многоассортиментные полимерные пленки.

Аннотация: Предложена система поддержки принятия решений (СППР), которая позволяет на базе виртуальных моделей (ВМ), описывающих структуру элементов аппаратно гибких экструдеров и физические процессы, протекающие в них, решать задачу поиска конфигурации и управляющих воздействий на экструдер, обеспечивающих требуемые показатели качества полимерной пленки (ПП) при выполнении ограничений на производительность и энергопотребление процесса. Ядром СППР является библиотека ВМ, включающая геометрические модели элементов шнеков экструдеров различных типов и математические модели (ММ) процессов нагрева, плавления, перемешивания полимеров, движущихся в каналах этих элементов. СППР настраивается на метод производства ПП, тип пленкообразующего полимера, требования к производительности, энергопотреблению процесса и качеству ПП. Тестирование СППР, выполненное по данным экструзионно-каландровых и экструзионных производств многоассортиментных ПП на заводах в России и Германии, подтвердило ее работоспособность и показало, что ее применение позволяет обеспечить требуемое качество ПП, уменьшить энергоемкость процесса, снизить время перенастройки производственной линии на новое задание.

1. Введение

Основными особенностями современных производств ПП являются реализация различных методов изготовления ПП (каландрование, плоскошелевая и раздувная экструзия), крупнотоннажный характер, широкий ассортимент продукции (ПП отличаются типами полимеров, толщиной, шириной, требованиями к качеству), большое число па-

раметров сырья, оборудования, технологического режима, качества ПП и множество взаимосвязей между ними, многообразие типов и аппаратная гибкость экструдеров. В зависимости от метода изготовления ПП экструдеры являются основным (формующим ПП) или вспомогательным (подготавливающим экструдат, из которого формуется ПП) элементом производственной системы. Но в любом случае качество ПП (прежде всего потребительские характеристики – внешний вид, цвет) в значительной степени зависит от характеристик процесса экструзии. Аппаратная гибкость экструдера, связанная с возможностью изменения конфигурации его модульного шнека, набираемого из элементов различных типов, позволяет перенастраивать производственную линию на различные типы ПП путем изменения не только режима функционирования (параметрический синтез), но и конфигурации оборудования (структурный синтез). Однако сложность процесса экструзии, неполнота информации о прямых показателях качества экструдированного полимерного материала (ПМ), наличие рециклов (подача в экструдер возвратных отходов – раздробленных кромок произведенной ПП) для обеспечения ресурсосбережения в производстве существенно усложняют решение задачи управления потребительскими характеристиками ПП. Вследствие ошибок, допускаемых операторами при принятии управленческих решений, до 30% дефектов ПП, наименее приемлемыми из которых для заказчиков являются включения нерасплавленного полимера, неравномерность окраски, гелики, черные точки и деструкционные полосы, возникает именно на стадии экструзии. Наиболее эффективным способом решения проблемы управления качеством продукции при перенастройке гибких многоассортиментных промышленных производств является разработка компьютерных систем, базирующихся на многовариантных, настраиваемых на характеристики объекта моделях его описания. Такие системы помогают управленческому производственному персоналу осуществить как структурный синтез объекта (с использованием геометрических моделей элементов оборудования и правил их размещения и компоновки), так и параметрический синтез (на основе ММ процессов превращения сырья в продукцию, применяемых для поверочного расчета) [1]. В связи с этим актуальна разработка СППР, помогающей операторам осуществлять структурный и параметрический синтез экструдеров по критериям качества экструдированного ПМ, производительности и энергопотребления процесса при перенастройке производственных линий на новые задания.

Поэтому целью настоящей работы является создание СППР, которая позволяет для заданного типа ПП, метода ее производства, требований к производительности и энергопотреблению выбрать марку экструдера, сформировать конфигурацию его шнека и определить значения управляющих воздействий, обеспечивающие получение экструдированного ПМ требуемого качества, гарантирующего соблюдение регламентных ограничений на число дефектов ПП. СППР является эффективным инструментом для решения задачи ресурсо- и энергосберегающего управления экструдерами с перенастраиваемой конфигурацией в условиях производства многоассортиментных ПП.

2. Постановка задачи управления. Структура СППР

В результате анализа типов и конструктивно-технологических параметров аппаратно гибких экструдеров, применяемых в производствах плоских и рукавных ПП, свойств пленкообразующих полимеров и характеристик экструдированных ПМ предложено информационное описание процесса экструзии как объекта управления в виде совокупности векторов входных X , варьируемых V и выходных Y параметров: $Y = F(X, V)$, $Y = \{G, E, L_{melt}, Q_e\}$, $Q_e = \{\bar{v}, I_d\}$, $X = \{M_{ext}, H_p\}$, $M_{ext} = \{T_{ext}, D, L, T_{die}\}$,

$H_p = \{T_p, P_p\}$, $V = \{C_{scr}, U\}$, $C_{scr} = \{T_{el}^j, j = \overline{1, N_{el}}\}$, $U = \{N_h, N, T_{bk}, k = \overline{1, n_T}\}$. Здесь G – производительность, кг/с; E – удельное энергопотребление, Дж/кг; L_{melt} – длина зоны плавления (ДЗП), м; Q_e – показатели качества экструдированного ПМ: $\bar{\gamma}$ – средняя степень смешения, характеризующая материальную однородность ПМ; I_d – индекс термодеструкции, отражающий степень необратимых изменений в ПМ при температурно-временном воздействии в экструдере, %; M_{ext} – марка экструдера; H_p – характеристики полимера; T_{ext} – тип экструдера (одношнековый, осциллирующий, двухшнековый с односторонним и встречным вращением шнеков); D, L – диаметр и длина шнека, м; T_{die} – тип экструзионной головки (фильера, плоскощелевая, кольцевая); T_p, P_p – тип и параметры свойств твердой фазы и расплава пленкообразующего полимера; C_{scr} – конфигурация шнека; U – управляющие воздействия; T_{el}^j – тип j -го элемента шнека (транспортный, смесительный и др.); N_{el} – число элементов в шнеке; N_h, N – частоты вращения шнеков загрузочного устройства и экструдера, об/с; T_{bk} – температура корпуса в k -й тепловой зоне, °С; n_T – число тепловых зон корпуса.

На основе информационного описания процесса сформулирована задача управления качеством экструдированного ПМ при перенастройке линии на новое задание, которая заключается в следующем. При перенастройке линии, реализующей метод производства M_{prod} , на задание $Y_0 = \{T_{film}, G_0, E^{max}\}$:

- выбрать марку экструдера M_{ext} и сформировать для нее регламентные диапазоны управляющих воздействий $[U^{min}; U^{max}]$ для получения из полимера типа T_p экструдированного ПМ с производительностью $G \geq G_0$ и энергопотреблением $E \leq E^{max}$;
- сформировать конфигурацию модульного шнека C_{scr} и определить допустимые значения управляющих воздействий $U^* \in [U^{min}; U^{max}]$, которые обеспечивают выполнение требований к качеству экструдированного ПМ $\gamma \geq \gamma^{min}$, $I_d \leq I_d^{max}$ и ДЗП $L_{melt} \leq L_{melt}^{max}$, гарантирующих соблюдение ограничений на число дефектов ПП.

Здесь T_{film} – тип ПП, определяемый ее составом, в том числе типом пленкообразующего полимера T_p , и предельно допустимыми значениями числа дефектов различных типов на 10 м² полотна ПП: геликов n_{gel}^{max} , черных точек n_{black}^{max} , нерасплавленных частиц n_{unmelt}^{max} (зависят от назначения ПП); G_0, E^{max} – предельные значения производительности и энергопотребления; γ^{min}, I_d^{max} – предельные значения показателей качества, зависящие от ограничений на число дефектов соответствующих типов – геликов и черных точек; L_{melt}^{max} – предельная ДЗП, превышение которой свидетельствует о наличии в экструдированном ПМ, а значит, и в ПП нерасплавленных частиц полимера.

Разработанная для решения поставленной задачи СППР включает подсистемы структурного и параметрического синтеза экструдера, информационное обеспечение (позволяющее настраивать СППР на новое задание), интерфейс оператора экструдера. Ядром СППР является библиотека ВМ, которая включает:

- геометрические модели элементов модульных шнеков экструдеров различных ти-

пов, используемые для сборки 3D моделей шнеков и расчета геометрических параметров каналов элементов и секций шнеков сформированных конфигураций;

- ММ процессов нагрева, плавления, перемешивания полимеров в каналах элементов шнеков, используемые для комплексной оценки качества экструдированного ПМ, ДЗП, производительности и энергопотребления экструдера.

Информационное обеспечение СППР содержит базу данных (БД) геометрических параметров экструдеров, элементов шнеков и головок, БД параметров свойств полимеров, БД регламентных диапазонов управляющих воздействий, БД требований к качеству экструдированных ПМ, БД результатов синтеза, а также базу правил (БПр) выбора марок экструдеров и БПр размещения и компоновки 3D моделей элементов шнеков.

Подсистема структурного синтеза включает модуль выбора марки экструдера и конструктор 3D модели шнека экструдера. Модуль выбора марки экструдера формирует из БД экструдеров на основе правил выбора множество марок экструдеров, каждая из которых является допустимой при изготовлении заданного типа ПП выбранным методом производства с требуемой производительностью и энергопотреблением. Правила выбора формируются разработчиком (администратором) СППР путем извлечения и обработки знаний экспертов (технологов производств ПП) и с помощью соответствующего интерфейса заносятся в БПр. Они строятся по схеме продукций типа «ЕСЛИ условие, ТО следствие». Для выбранной оператором из сформированного множества марки экструдера в конструкторе осуществляется сборка 3D модели шнека. Для этого разработаны язык проектирования и правила размещения и компоновки. Элементами языка являются фотореалистичные 3D модели элементов шнеков, а операциями, выполняемыми над ними, – выбор, размещение, перемещение, удаление. Автоматически создается 3D сцена с расположенной в ней 3D моделью сердечника шнека. Процесс сборки 3D модели шнека аналогичен процессу сборки реального шнека. Оператор выбирает 3D модель элемента требуемого типа и размещает ее на 3D модели сердечника, компоуя с 3D моделью предыдущего элемента. Если при этом правила размещения и компоновки не выполняются, то 3D модель элемента окрашивается красным цветом, что свидетельствует о невозможности выполнения операции (рис. 1).

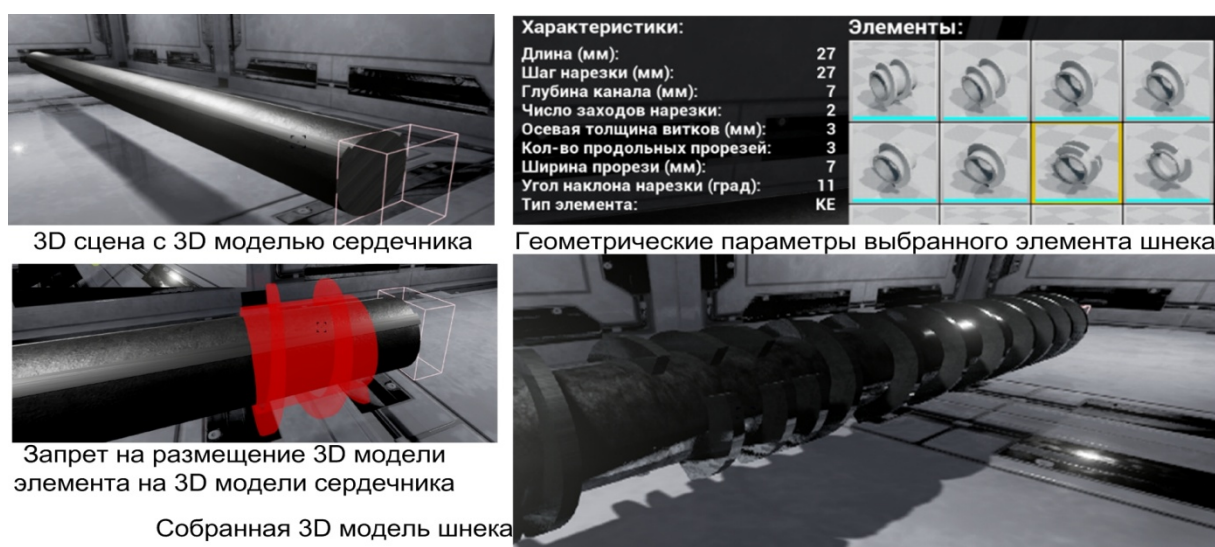


Рис. 1. Примеры интерфейсов конструктора 3D моделей шнеков экструдеров.

Поверочный расчет экструдера со шнеком собранной конфигурации осуществляется в подсистеме параметрического синтеза, которая реализует комбинированный метод моделирования процесса. Он заключается в синтезе статической ММ, используемой

для расчета параметров состояния фаз полимера, ДЗП, производительности, энергопотребления экструдера, показателей качества экструдированного ПМ, и динамической ММ для оценки среднего времени пребывания (СВП), от которого зависят показатели качества. Синтез статической ММ осуществляется путем компоновки базовых ММ, описывающих движение, плавление и перемешивание полимера в каналах элементов шнека, и ММ течения расплава полимера в экструзионной головке [2]. Базовые ММ представляют собой системы уравнений, построенных на основе законов сохранения и реологии и позволяющих рассчитать распределения параметров состояния твердой фазы и расплава полимера по каналу элемента (рис. 2). Расчет по статической ММ позволяет найти рабочую точку экструдера, определяющую его производительность (рис. 2).

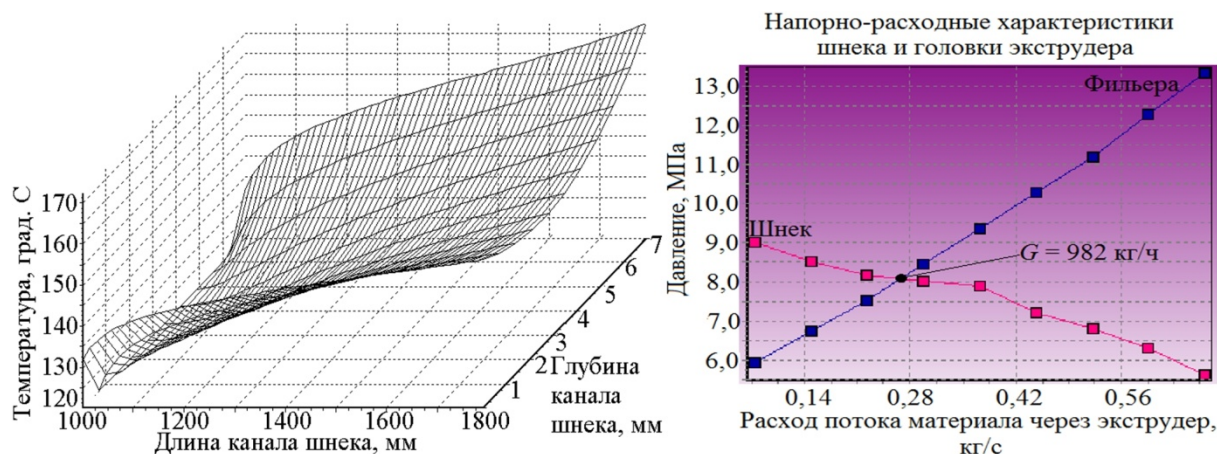


Рис. 2. Примеры результатов расчета: поле температуры расплава; производительность.

Для оценки СВП синтезируется динамическая ММ, состоящая из типовых гидродинамических моделей, охваченных рециклами, учитывающими утечки и осцилляцию [3]. При рассчитанных параметрах состояния и СВП вычисляются и строятся в виде 3D графиков зависимости показателей качества от управляющих воздействий, варьируемых в регламентных диапазонах. Обработка этих зависимостей позволяет определить значения управляющих воздействий, обеспечивающие требуемое качество экструдата.

3. Заключение

Результаты тестирования СППР, выполненного по данным производств многоассортиментных плоских и рукавных ПП на заводах в России и Германии, подтвердили ее работоспособность и возможность использования для управления качеством ПМ, подготавливаемых в аппаратно гибких экструдерах различных типов.

Список литературы

1. Чистякова Т.Б., Фураев Д.Н., Защирицкий С.В. Программный комплекс для проектирования виртуальных моделей инновационных промышленных объектов // Автоматизация в промышленности. 2018. № 11. С. 28-32.
2. Чистякова Т.Б., Полосин А.Н. Методы и технологии синтеза математических моделей процессов экструзии в гибких производствах полимерных материалов // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2011. Т. 4, № 4. С. 170-180.
3. Monchatre B., Raveyre C., Carrot C. Residence time distributions in a co-kneader: a chemical engineering approach // Polymer Engineering and Science. 2015. Vol. 55, No. 6. DOI: 10.1002/pen.24061.