

УДК: 004.942:678.027.36

Система моделирования процессов экструзии и формообразования полимерных материалов для управления качеством рукавных пленок

А. Н. Полосин^а, Т. Б. Чистякова

Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет),
Россия, 190013, г. Санкт-Петербург, Московский пр-кт, д. 26

E-mail: ^аpolosin@rbcmail.ru

Получено 7 декабря 2013 г.

Разработана гибкая программная система моделирования процесса получения рукавных полимерных пленок методом экструзии с раздувом, включающая библиотеку математических моделей процессов экструзии и формообразования пленочного рукава, подсистемы перенастройки на новый тип пленки и исследования процессов экструзии и формообразования для управления качеством пленки в режиме ее изготовления. Подсистема перенастройки позволяет выбрать оборудование экструзионной линии по технико-экономическим показателям, синтезировать 3D-модель линии и сформировать регламентные диапазоны управляющих воздействий для заданного типа пленки. Подсистема исследования позволяет рассчитать температурные профили нагрева и охлаждения материала, геометрические и оптические характеристики пленки в зависимости от управляющих воздействий на стадиях экструзии и формообразования и выбрать значения управляющих воздействий, обеспечивающие заданное качество пленки.

Ключевые слова: математические модели, программный комплекс, управление качеством, раздувная экструзия, полимерные пленки

Modeling system of extrusion and forming polymeric materials for blown film quality control

A. N. Polosin, T. B. Chistyakova

Saint-Petersburg State Institute of Technology (Technical University), 26 Moskovsky prospect, Saint-Petersburg, 190013, Russia

Abstract. — Flexible software for modeling polymeric film production by use of blown extrusion has been developed. It consists of library of mathematical models for extrusion and forming blown film, sub-system for changeover to new type of film and sub-system for investigation of extrusion and forming for film quality control under film production. The sub-system for changeover allows to choose the equipment of extrusion line on technical and economic indices, to synthesize 3D model of the line and to generate regulation ranges of regime parameters for given type of film. The sub-system for investigation allows to calculate temperature profiles of heating and cooling material, geometrical and optical characteristics of film depending on regime parameters for stages of extrusion and forming and to evaluate regime parameters ensuring given quality of polymeric film.

Keywords: mathematical models, program complex, control of quality, blown extrusion, polymeric films

Citation: *Computer Research and Modeling*, 2014, vol. 6, no. 1, pp. 137–158 (Russian).

Введение

Один из основных сегментов международного рынка изделий из полимерных материалов занимают пленки (например, объем производства полимерных пленок в Западной Европе составляет 11,6 млн тонн в год). По объему выпуска первое место занимают полиолефиновые (полиэтиленовые, полипропиленовые) пленки (42 %), второе — поливинилхлоридные (21 %).

Основным методом производства высокотехнологичных пленок, использующихся для упаковки продуктов питания, фармацевтических препаратов и косметических средств, а также в качестве компонентов средств личной гигиены, является раздувная экструзия. Экструзионно-раздувной метод выгодно отличается гибкостью и компактностью технологической схемы, экономичностью при производстве широкого ассортимента пленок шириной 0,05–24 м и толщиной $(0,005–0,5) \cdot 10^{-3}$ м из различных полимеров. Ключевыми стадиями процесса получения полимерной пленки методом раздувной экструзии, от которых зависит ее качество (толщина, ширина, прозрачность, глянецитость, число макродефектов — включений нерасплавленного полимера, черных точек — на 10 м^2 полотна и др.), являются подготовка расплава полимера и формование его в трубчатую заготовку в экструдере, двухосное деформирование полученной заготовки до заданных геометрических параметров пленки, фиксирование структуры рукава (пузыря пленки) охлаждением. Экструзия, растяжение и охлаждение пленочного рукава определяют скорость и направление процессов формирования надмолекулярных структур в пленке. Указанные стадии характеризуются множеством разнородных физических процессов (нагрев и перемешивание материала в канале шнека экструдера, формование расплава в кольцевой головке экструдера, ее разбухание на выходе из головки, растяжение в продольном и поперечном направлениях, охлаждение и затвердевание), конфигураций оборудования (экструзионных шнеков и головок, охлаждающих колец), необходимого для выполнения широкого спектра заказов.

Многоассортиментный крупнотоннажный характер производства рукавных полимерных пленок, сложная картина течения материала в условиях сдвига (в экструдере) и растяжения (в системе формообразования), неизотермический характер процесса, отсутствие автоматического контроля ряда параметров процесса, от которых зависит качество продукции, обуславливают сложность поиска конструктивно-технологических решений, обеспечивающих изготовление качественной пленки заданного типа с требуемой производительностью. Эффективное решение этой важной производственной задачи невозможно без использования методов математического моделирования и компьютерных технологий. Поэтому в рамках автоматизации производства рукавных пленок актуальна разработка компьютерной системы моделирования, которая настраивается на тип пленки, аппаратно-технологическое оформление и производительность процесса, позволяет синтезировать экструзионную линию, исследовать ключевые стадии производства (экструзию, формообразование) и выбирать значения управляющих воздействий на процесс, обеспечивающие заданные показатели качества (геометрические, оптические) пленки.

В связи с этим целью работы является создание гибкой программной системы моделирования процесса получения полимерных пленок методом раздувной экструзии, позволяющей на основе библиотеки математических моделей (ММ) ключевых стадий процесса и ММ для оценки качества экструдата и пленки решать задачи перенастройки экструзионной линии на новые характеристики производства и управления качеством пленки.

Характеристика процесса получения рукавных пленок как объекта управления

Анализ процесса получения рукавных полимерных пленок как объекта управления показал, что он характеризуется:

выпуском пленок различных типов, $F = \{T_{polymer}, \delta_f^0, \Delta\delta^{\max}, w_f^0, \Delta w^{\max}, Q_f^0\}$, определяемых типом пленкообразующего полимера $T_{polymer}$, заданной толщиной δ_f^0 и шириной w_f^0 полотна,

предельными отклонениями толщины Δ_{δ}^{\max} и ширины Δ_w^{\max} от заданных значений, требованиями к основным потребительским характеристикам (оптическим свойствам — мутности M_f^{\max} , глянецности L_f^{\min} , числу дефектов поверхности — включений нерасплавленного полимера n_{umelt}^{\max} , черных точек n_{destr}^{\max} — на 10 м² полотна) пленки $Q_f^0 = \{M_f^{\max}, L_f^{\min}, n_{umelt}^{\max}, n_{destr}^{\max}\}$, зависящими от ее назначения;

многообразием типов экструдеров, которые характеризуются геометрическими параметрами $\Gamma_{extrud} = \{\Gamma_{scr}, \Gamma_{die}\}$, включающими параметры модульных шнеков $\Gamma_{scr} = \{D, L^j, B^j, H_{in}^j, H_{out}^j, z_f^j, e^j, j = 1, \dots, N_e\}$, набираемых из N_e элементов различных типов T_e (транспортных, пластицирующих, диспергирующих, смесительных), и параметры кольцевых формующих головок различной конфигурации $\Gamma_{die} = \{d, \delta_0, l\}$, где D — диаметр шнека экструдера, м; $L^j, B^j, H_{in}^j, H_{out}^j, e^j$ — длина, шаг нарезки, глубина канала на входе и выходе, толщина витков нарезки j -го элемента шнека, м; z_f^j — число заходов нарезки; d, δ_0, l — наружный диаметр, толщина и длина формующей щели головки, м;

жесткими требованиями к качеству экструдата $Q_{ext}^0 = \{\gamma^{\min}, I_d^{\max}\}$, основными показателями которого являются степень смешения (среднемассовая деформация сдвига) γ , определяющая отсутствие нерасплавленных включений, равномерность окрашивания пленки, и индекс термической деструкции I_d , приводящей к пожелтению, уменьшению молекулярной массы, увеличению ползучести экструдата и, как следствие, к появлению на пленке деструкционных полос и черных точек.

Ключевыми стадиями процесса получения рукавных пленок являются:

экструзия ($i = 1$), в ходе которой сыпучий полимерный материал нагревается, плавится, перемешивается в канале шнека экструдера и выдавливается через кольцевую формующую головку, которая в зависимости от метода отвода экструдата M_b может быть угловой (при вертикальном приеме) или прямооточной (при горизонтальном приеме);

формообразование ($i = 2$), при котором выходящая из головки трубчатая заготовка раздувается по диаметру (поперечная вытяжка) до необходимых размеров сжатым воздухом, подаваемым через канал дорна головки, растягивается по длине (продольная вытяжка) тянущими валками, охлаждается снаружи поступающим из выходной щели охлаждающего кольца воздухом и внутри сжатым воздухом, что придает ей формоустойчивость.

Формализованное описание процесса получения рукавных пленок как объекта управления представляется в виде совокупности векторов входных параметров X_i , управляющих воздействий U_i и выходных параметров Y_i (см. рис. 1).

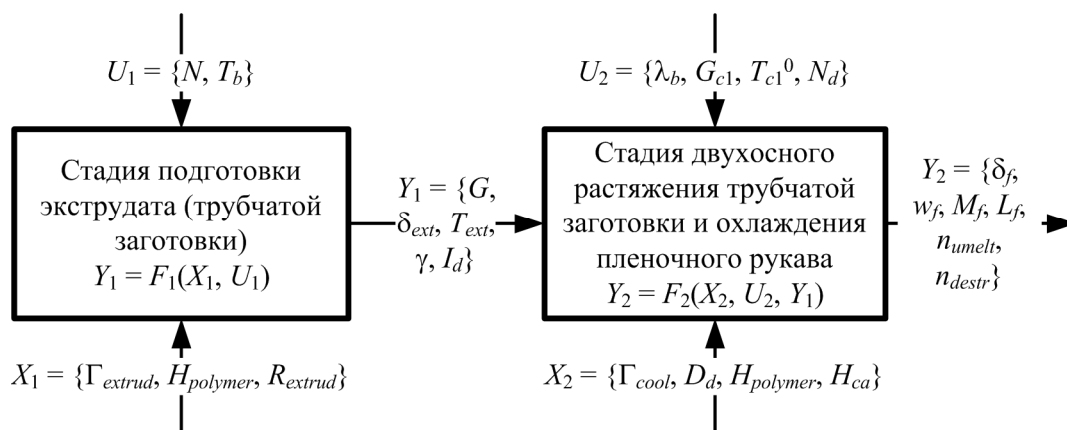


Рис. 1. Формализованное описание процесса получения рукавных пленок

Входными параметрами стадии экструзии являются геометрические параметры экструдера Γ_{extrud} , характеристики полимерного материала $H_{polymer} = \{T_{melt}, \rho, c_p, \varepsilon, \mu_0, b, T_r, n, \lambda_s, T_d, \tau_d, E_d\}$, значения которых зависят от типа пленкообразующего полимера $T_{polymer}$, и технологические параметры процесса экструзии $R_{extrud} = \{T_{scr}, \alpha_b, \alpha_{scr}\}$, где $T_{melt}, \rho, c_p, \varepsilon, \mu_0, b, T_r, n$ — температура

плавления ($^{\circ}\text{C}$), плотность ($\text{кг}/\text{м}^3$), средняя удельная теплоемкость [$\text{Дж}/(\text{кг}\cdot^{\circ}\text{C})$], степень черноты, коэффициент консистенции расплава ($\text{Па}\cdot\text{с}^n$), температурный коэффициент вязкости ($1/^{\circ}\text{C}$), температура приведения ($^{\circ}\text{C}$), индекс течения (псевдопластичности) полимера; λ_s — степень разбухания экструдированного материала по толщине на выходе из головки, %; T_d , τ_d — температура ($^{\circ}\text{C}$) и время (с) начала изменения цвета материала, вызванного его деструкцией в изотермических условиях (например, пожелтения поливинилхлорида вследствие того, что свободные двойные связи в макромолекуле, образующиеся при отщеплении хлороводорода, способны абсорбировать синий цвет); E_d — энергия активации процесса деструкции, $\text{Дж}/\text{моль}$; T_{scr} — температура шнека экструдера, $^{\circ}\text{C}$; α_b , α_{scr} — коэффициенты теплоотдачи от обогреваемого корпуса экструдера к расплаву полимера и от расплава к шнеку (если шнек является термонейтральным, то $\alpha_{scr} = 0$), $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot^{\circ}\text{C})$.

Управляющими воздействиями на стадии являются частота вращения шнека экструдера N (об/с) и температура корпуса экструдера T_b ($^{\circ}\text{C}$). К выходным параметрам относятся производительность экструдера G ($\text{кг}/\text{с}$), определяющая производительность линии, толщина δ_{ext} (м), температура T_{ext} ($^{\circ}\text{C}$) и показатели качества γ (ед. сдвига), I_d (%) экструдата.

Входными параметрами стадии формообразования являются геометрические параметры охлаждающего кольца $\Gamma_{cool} = \{R_{cr}, b_{cr}\}$, диаметр тянущих пленку валков D_d (м), характеристики полимерного материала $H_{polymer}$ и хладагентов для рукава $H_{ca} = \{\rho_{cj}, \eta_{cj}, c_{Pcj}, \lambda_{cj}, j = 1, 2\}$, где R_{cr} , b_{cr} — радиус и ширина выходной щели охлаждающего кольца, м; ρ_{cj} , η_{cj} , c_{Pcj} , λ_{cj} — плотности ($\text{кг}/\text{м}^3$), динамические вязкости ($\text{Па}\cdot\text{с}$), средние удельные теплоемкости [$\text{Дж}/(\text{кг}\cdot^{\circ}\text{C})$], теплопроводности [$\text{Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{C})$] наружного ($j = 1$) и внутреннего ($j = 2$) хладагентов (внутренним хладагентом служит сжатый воздух, раздувающий рукав).

Управляющими воздействиями на стадии являются степень раздува рукава λ_b , расход G_{c1} ($\text{кг}/\text{с}$) и начальная температура T_{c1}^0 ($^{\circ}\text{C}$) наружного хладагента, а также частота вращения тянущих валков N_d (об/с). К выходным параметрам относятся толщина δ_f (м) и ширина w_f (м) полотна, а также потребительские характеристики M_f (%), L_f (ед.), n_{umelt} , n_{destr} изготовленной пленки.

От режима работы экструдера, определяющего производительность линии и температуру экструдата, и интенсивности охлаждения пленочного рукава, определяющей характер распределения температуры вдоль оси рукава, в значительной степени зависят основные потребительские характеристики пленки [Рауендааль, 2008]. При увеличении температуры экструдата (за счет уменьшения частоты вращения шнека, приводящего к увеличению времени пребывания материала в экструдере, или увеличения температуры корпуса экструдера) уменьшаются дефекты типа «рыбий глаз», «гелики», нерасплавленные включения, что ведет к снижению мутности и повышению глянцеваемости пленки. С другой стороны, возрастает опасность перегрева и термической деструкции полимерного материала. Увеличение частоты вращения шнека экструдера способствует росту времени затвердевания, формированию более крупных надмолекулярных образований, приводящих к возрастанию структурной неоднородности пленки и тем самым к повышению ее мутности. Увеличение интенсивности охлаждения рукава приводит к улучшению оптических свойств пленки, однако при этом возрастает усадка.

Анализ характеристик процесса получения рукавных пленок позволил сформулировать задачу перенастройки процесса на новый тип пленки, производительность линии и задачу исследования процесса для управления качеством пленки в режиме изготовления, решаемые с использованием ММ ключевых стадий процесса и ММ для оценки качества экструдата и пленки.

Задача перенастройки на новые характеристики производства заключается в следующем.

Для заданного типа рукавной полимерной пленки F , метода ее изготовления (метода отвода экструдата M_b) и производительности процесса G_0 :

синтезировать раздувную экструзионную линию путем выбора и компоновки основного технологического оборудования (модульного шнека и головки экструдера, охлаждающего кольца) в соответствии с правилами перенастройки, обеспечив выполнение ограничений на стоимость, $C \leq C^{\max}$, производительность, $G \geq G_0$, и энергопотребление, $E \leq E^{\max}$, линии;

сформировать регламентные диапазоны управляющих воздействий на стадиях $[U_i^{\min}; U_i^{\max}]$, $i = 1, 2$, с использованием базы данных (БД) технологических регламентов;

определить с использованием ММ допустимые значения управляющих воздействий на экструдер, $[(U_1^0)^{\min}; (U_1^0)^{\max}] \subset [U_1^{\min}; U_1^{\max}]$, которые обеспечивают получение экструдата заданного качества, $\gamma \geq \gamma^{\min}$, $I_d \leq I_d^{\max}$, гарантирующего соблюдение ограничений на число дефектов поверхности пленки, $n_{umelt} \leq n_{umelt}^{\max}$, $n_{destr} \leq n_{destr}^{\max}$, с заданной производительностью, $G \geq G_0$.

Задача исследования процесса заключается в следующем.

Для синтезированной экструзионной линии с геометрическими характеристиками $\Gamma_{line} = \{\Gamma_{extrud}, \Gamma_{cool}, D_d\}$, позволяющей изготавливать рукавную пленку типа F методом M_b , определить с использованием ММ значения управляющих воздействий на стадиях экструзии, $U_1 \in [(U_1^0)^{\min}; (U_1^0)^{\max}]$, и формообразования, $U_2 \in [U_2^{\min}; U_2^{\max}]$, которые обеспечивают выполнение требований к геометрическим и оптическим характеристикам пленки:

$$(1 - \Delta_\delta^{\max}/100) \cdot \delta_f^0 \leq \delta_f \leq (1 + \Delta_\delta^{\max}/100) \cdot \delta_f^0, (1 - \Delta_w^{\max}/100) \cdot w_f^0 \leq w_f \leq (1 + \Delta_w^{\max}/100) \cdot w_f^0, \\ M_f \leq M_f^{\max}, L_f \geq L_f^{\min}.$$

Функциональная структура программной системы моделирования

Для решения поставленных задач разработана программная система моделирования процессов экструзии и формообразования в производстве рукавных полимерных пленок, функциональная структура которой представлена на рисунке 2. Система моделирования включает:

подсистему перенастройки на новый тип пленки и производительность, позволяющую сформировать 3D-модель экструзионной линии и регламентные диапазоны управляющих воздействий на стадиях процесса для изготовления пленки заданного типа данным методом с требуемой производительностью и определить диапазоны допустимых значений частоты вращения шнека и температуры корпуса экструдера, обеспечивающие заданное качество экструдата;

подсистему исследования, позволяющую рассчитать показатели качества (толщину, ширину, мутность, глянецовитость) пленки заданного типа, изготавливаемой на синтезированной экструзионной линии, в зависимости от управляющих воздействий, варьируемых в сформированных при перенастройке диапазонах, и построить 3D-графики зависимостей показателей качества от управляющих воздействий, анализируя которые исследователь определяет технологический режим процесса, обеспечивающий требуемое качество пленки;

библиотеки ММ, позволяющих рассчитать производительность и параметры состояния процессов экструзии и формообразования, показатели качества экструдата и пленки в зависимости от управляющих воздействий на стадиях производства для различных типов полимерных материалов и оборудования экструзионных линий (экструдеров, охлаждающих колец);

информационную подсистему, предназначенную для настройки системы моделирования на тип пленки и оборудования экструзионной линии и сохранения результатов исследований — сформированных решений задач перенастройки и исследования качества пленки (3D-модели и геометрических характеристик экструзионной линии, допустимых значений управляющих воздействий на стадиях, 3D-графиков зависимостей показателей качества экструдата и пленки от управляющих воздействий);

пользовательский интерфейс, включающий интерфейс исследователя для ввода задания на исследование Y_0 и визуализации результатов в виде 3D-модели синтезированной экструзионной линии, таблиц и графиков зависимостей показателей качества экструдата и пленки от управляющих воздействий на стадиях процесса; интерфейс администратора для редактирования баз данных (БД) характеристик производства, базы правил перенастройки, библиотек ММ.

Используя интерфейс системы моделирования, исследователь формирует задание Y_0 , которое включает тип пленки F , выбираемый из БД пленок, метод ее изготовления M_b , предельные значения технико-экономических показателей (ТЭП) производства (максимальную стоимость

линии C^{\max} , требуемую производительность G_0 , максимальное энергопотребление E^{\max}). Сформированное задание поступает в подсистему перенастройки на новые характеристики производства, одним из основных компонентов которой является модуль выбора и компоновки оборудования в экструзионную линию и проверки ограничений на ТЭП синтезированной линии.

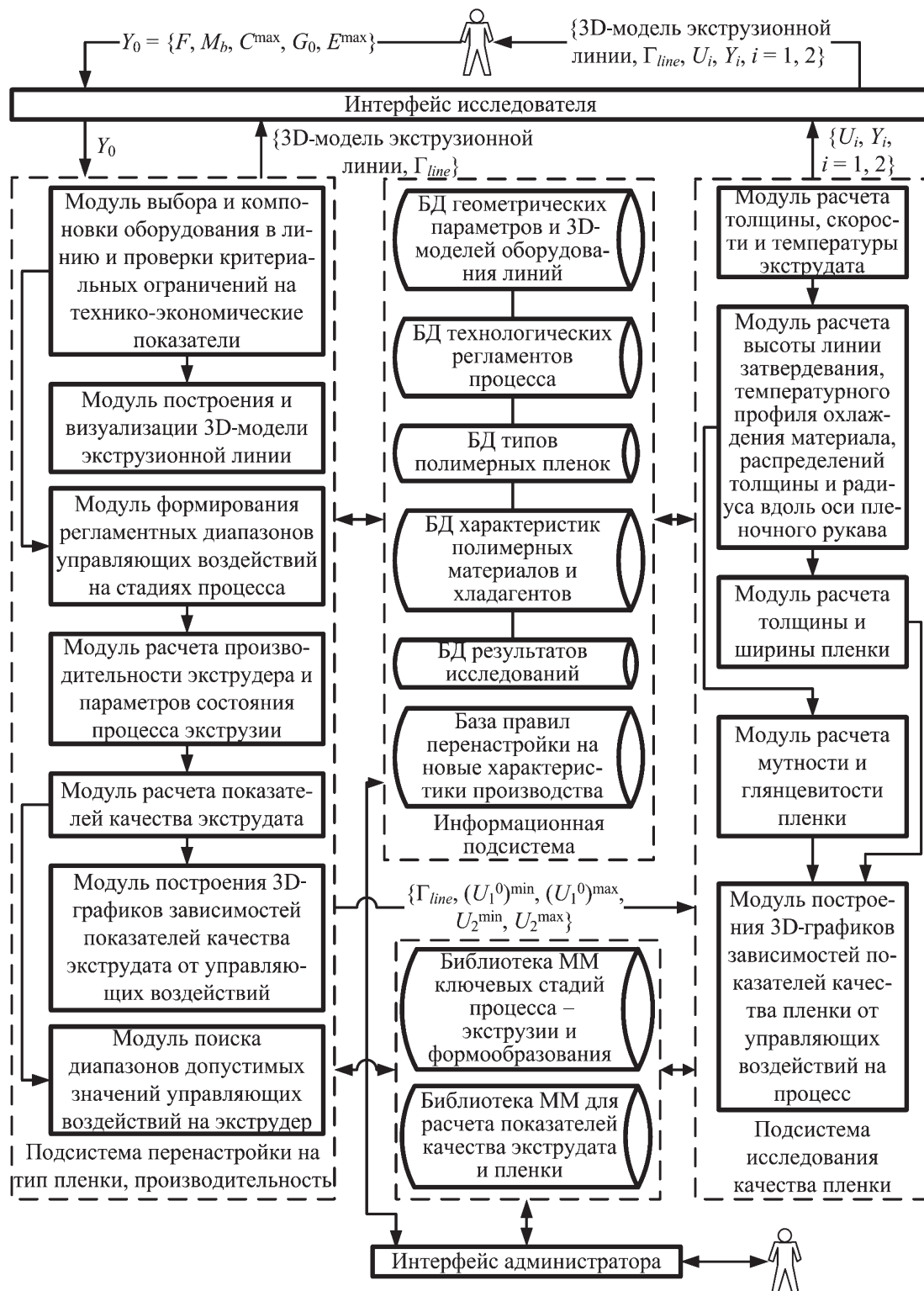


Рис. 2. Функциональная структура системы моделирования

Модуль выбора и компоновки взаимодействует с БД основного технологического оборудования и БД полимерных пленок информационной подсистемы, из которой формируется список допустимых для изготовления данного типа пленки F заданным методом M_b элементов экструзионной линии (модульных шнеков и головок экструдеров, охлаждающих колец) [Чистякова, Полосин, Блинов, 2012].

Информационная подсистема системы моделирования включает следующие построенные на основе реляционной модели описания данных БД:

БД оборудования, которая содержит типы, геометрические параметры элементов шнеков Γ_{scr} , конфигурации шнеков $C_{scr} = \{T_e^j, j = 1, \dots, N_e\}$ для переработки различных типов полимерных материалов с разной производительностью и энергопотреблением, геометрические параметры формирующих щелей угловых и прямооточных экструзионных головок Γ_{die} и выходных щелей охлаждающих колец Γ_{cool} , 3D-модели, ТЭП экструдеров, охлаждающих колец;

БД технологических регламентов процесса, которая содержит регламентные пороговые значения режимных параметров процессов экструзии и формообразования $[U_i^{\min}; U_i^{\max}]$, $i = 1, 2$ (частоты вращения шнека и температуры корпуса экструдера, расходов и начальных температур наружного и внутреннего хладагентов, частоты вращения тянущих валков), зависящие от типов пленок и оборудования;

БД полимерных пленок, которая содержит характеристики пленки каждого типа F (тип пленкообразующего полимера, толщина и ширина полотна, предельные отклонения толщины и ширины, требования к основным потребительским характеристикам — оптическим свойствам, числу дефектов поверхности, определяемые назначением пленки и указанные в стандартах качества, технических условиях);

БД характеристик полимеров и хладагентов, которая содержит параметры теплофизических и реологических свойств пленкообразующих полимеров $H_{polymer}$ и хладагентов H_{ca} , определяемые типами соответствующих материалов.

В БД хранятся данные о 20 марках экструзионных агрегатов и 10 типах пленок.

Выбранные исследователем из списка элементы оборудования каждой категории komponуются в экструзионную линию в соответствии с правилами, хранящимися в базе правил перенастройки. Примеры правил компоновки приведены в таблице 1.

Таблица 1. Правила компоновки

	ЕСЛИ	ТО
1	конфигурация шнека экструдера позволяет перерабатывать полимерный материал заданного типа	шнек экструдера можно компоновать в линию
2	конструкция головки позволяет реализовать заданный метод отвода пленочного рукава	головку можно компоновать в линию
3	экструдер имеет в списке допущенных к подключению головок головку данного типа	головку можно подключать к экструдеру

Проверка критериальных ограничений на ТЭП скомпонованной экструзионной линии заключается в расчете ее стоимости (суммарной стоимости конструктивных элементов линии), производительности (производительности экструдера) и энергопотребления (энергопотребления экструдера) и сравнении рассчитанных и заданных значений критериальных показателей. Если критериальные ограничения выполняются, осуществляется построение и визуализация 3D-модели линии, состоящей из последовательно подключенных 3D-модели экструдера (включающей 3D-модель головки) и 3D-модели охлаждающего кольца. В противном случае исследователю предлагается выбрать агрегаты других типов.

Для синтезированной экструзионной линии с геометрическими характеристиками Γ_{line} и заданного типа изготавливаемой пленки F из БД технологических регламентов процесса получения рукавных пленок осуществляется формирование регламентных диапазонов управляющих воздействий на ключевых стадиях процесса $[U_i^{\min}; U_i^{\max}]$, $i = 1, 2$.

Сформированные в результате выбора и компоновки оборудования для заданного типа и метода изготовления пленки, производительности геометрические характеристики линии

и регламентные пороговые значения режимных параметров ключевых стадий процесса раздувной экструзии являются исходными данными для поиска управляющих воздействий, обеспечивающих заданное качество экструдата и пленки. Решение этих задач осуществляется на базе ММ процессов экструзии и формообразования и ММ для оценки качества экструдата и пленки.

Математическое обеспечение системы моделирования

Математическое обеспечение системы моделирования включает библиотеку ММ для расчета характеристик ключевых стадий процесса раздувной экструзии полимерных материалов и библиотеку ММ для расчета показателей качества экструдата и пленки. Библиотека ММ ключевых стадий содержит ММ процессов экструзии трубчатой заготовки и формообразования пленочного рукава в потоке воздуха [Полосин, Чистякова, Блинов, 2012].

Математическая модель подготовки расплава в экструдерах с модульными шнеками

При построении ММ процесса одношнековой экструзии приняты допущения, строго обоснованные в литературе по моделированию экструзионных процессов [Тадмор, Гогос, 1984]. Основные допущения: обращенное движение корпуса и шнека, малость кривизны канала шнека, установившиеся по длине канала и времени течение и теплообмен, постоянство теплофизических свойств полимера, несжимаемость расплава, отсутствие утечек и проскальзывания расплава, малость инерционных и массовых сил, преобладание конвективного переноса теплоты вдоль оси канала и переноса теплоты теплопроводностью в радиальном направлении. Основной особенностью течения расплавленных полимеров является их способность к одновременному развитию обратимой (упругой и высокоэластической) и необратимой (пластической) деформаций. Однако, поскольку среднее время пребывания в экструдере $\bar{\tau}$ (время деформационного воздействия на материал) значительно превосходит среднее время релаксации $\theta = 0,001\text{--}0,08$ с, то есть справедливо неравенство $\bar{\tau} \gg 2 \cdot n \cdot \theta$, обратимой составляющей работы, затрачиваемой на деформацию материала, можно пренебречь и считать, что вся работа деформации превращается в теплоту (диссипирует) [Лукач, Петухов, Сенатос, 1981]. Применение этих упрощений к законам сохранения физических субстанций и реологии при сдвиге позволило сформировать систему уравнений, описывающих течение и теплообмен расплавленного полимера в канале j -го элемента шнека в зоне транспортировки расплава, режим работы которой определяет производительность экструдера, температуру и качество экструдата [Полосин, Чистякова, 2009]:

уравнения материального баланса по циркуляционному и поступательному потокам —

$$\int_0^{H^j} v_x^j dy = 0, \quad W^j \cdot \int_0^{H^j} v_z^j dy = Q^j; \quad (1)$$

уравнения баланса сил давления и вязкого трения в потоках ($0 < y < H^j, z^{j-1} < z \leq z^{j-1} + Z^j$)

$$\frac{\partial P^j}{\partial x} = \frac{\partial \tau_{xy}^j}{\partial y}, \quad \frac{\partial P^j}{\partial z} = \frac{\partial \tau_{zy}^j}{\partial y}; \quad (2)$$

реологическая модель расплава ($0 < y < H^j$)

$$\tau_{xy}^j = \eta^j \cdot \frac{\partial v_x^j}{\partial y}, \quad \tau_{zy}^j = \eta^j \cdot \frac{\partial v_z^j}{\partial y}, \quad (3)$$

$$\eta^j = \mu^j \cdot \left[\left(\frac{\partial v_x^j}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_z^j}{\partial y} \right)^2 \right]^{\frac{n-1}{2}}, \quad \mu^j = \mu_0 \cdot \exp[-b \cdot (T_1^j - T_r)]; \quad (4)$$

уравнение теплового баланса ($0 < y < H^j, z^{j-1} < z \leq z^{j-1} + Z^j$)

$$\rho \cdot c_p \cdot v_z^j \cdot \frac{\partial T_1^j}{\partial z} = \lambda \cdot \frac{\partial^2 T_1^j}{\partial y^2} + \tau_{xy}^j \cdot \frac{\partial v_x^j}{\partial y} + \tau_{zy}^j \cdot \frac{\partial v_z^j}{\partial y}; \quad (5)$$

условия на входе в канал первого элемента —

$$z = z^0 = 0: P^{j,0} = P_0, T_1^{j,0} = T_{melt}, j = 1; \quad (6)$$

кинематические и температурные граничные условия —

$$y = 0: v_x^{j,scr} = v_z^{j,scr} = 0, y = H^j: v_x^{j,b} = -U_x = -\pi \cdot D \cdot N \cdot \sin \varphi^j, v_z^{j,b} = U_z = \pi \cdot D \cdot N \cdot \cos \varphi^j, \quad (7)$$

$$y = 0: -\lambda \cdot \left(\frac{\partial T_1^j}{\partial y} \right)^{scr} = \alpha_{scr} \cdot (T_1^{j,scr} - T_{scr}), y = H^j: -\lambda \cdot \left(\frac{\partial T_1^j}{\partial y} \right)^b = \alpha_b \cdot (T_b - T_1^{j,b}), \quad (8)$$

где $H^j = f_1(H_{in}^j, H_{out}^j, Z^j, z)$, $z^{j-1} < z \leq z^{j-1} + Z^j$ — глубина канала элемента шнека, м; v_x^j, v_z^j — скорости циркуляционного и поступательного потоков расплава, м/с; x, y, z — координаты по ширине $W^j = f_2(B^j, e^j, z^j, \varphi^j)$, глубине H^j и длине $Z^j = f_3(L^j, \varphi^j)$ канала элемента, м; Q^j — расход поступательного потока через канал элемента, м³/с; z^{j-1} — координата входного сечения канала j -го элемента, м; P_0, P^j — давление расплава на входе в канал шнека и в канале элемента шнека, Па; τ_{xy}^j, τ_{zy}^j — напряжения трения в циркуляционном и поступательном потоках, Па; η^j — эффективная (соответствующая данному состоянию сдвига) вязкость расплава, Па·с; μ^j — коэффициент консистенции, Па·с^{*n*}; T_1^j — температура, °С; λ — теплопроводность, Вт/(м·°С); $P^{j,0}, T_1^{j,0}$ — давление и температура на входе в канал элемента; $v_x^{j,scr}, v_z^{j,scr}, v_x^{j,b}, v_z^{j,b}$ — скорости потоков на дне канала (поверхность шнека) и на верхней подвижной крышке канала (внутренняя поверхность корпуса); U_x, U_z — компоненты линейной скорости шнека, вызывающие циркуляционный и поступательный потоки, м/с; $\varphi^j = f_4(D, B^j)$ — угол наклона витков нарезки элемента, рад; $T_1^{j,scr}, (\partial T_1^j / \partial y)^{scr}, T_1^{j,b}, (\partial T_1^j / \partial y)^b$ — температуры и градиенты температур в слоях расплава у дна и крышки канала.

Условия сопряжения элементов, позволяющие рассчитать характеристики течения и теплообмена расплава полимера в канале модульного шнека экструдера, имеют вид [Чистякова, Полосин, 2011]

$$z = z^{j-1}: P^{j,0} = P^{j-1,K}, T_1^{j,0} = T_1^{j-1,K}, j = \overline{2, N_e}, \quad (9)$$

где $P^{j-1,K}, T_1^{j-1,K}$ — давление и температура расплава на выходе из канала $(j-1)$ -го элемента.

Анализ течения в экструдере выполнен на базе теории плоских несимметричных потоков [Торнер, 1977]: установившееся неизоэнтальпическое двумерное течение расплава представлено в виде суммы большого числа последовательно расположенных участков (длиной $\Delta z \leq 0,1 \cdot D$) изотермического двумерного течения, причем при переходе от одного участка к другому температура скачкообразно изменяется по сечению. Это допущение позволяет разделить решения гидродинамической группы уравнений (1)–(4) и уравнения теплового баланса (5), что обосновано различной степенью взаимного влияния температурного и кинематических полей течения. Аналитическое интегрирование уравнений (2) по координате y , учет того, что в циркуляционном и поступательном потоках существуют сечения нулевых напряжений y_{0x}^j и y_{0z}^j [Торнер, 1972] и переход к безразмерным координатам $\xi_{0x}^j = y_{0x}^j / H^j, \xi_{0z}^j = y_{0z}^j / H^j$, позволяют получить формулы для расчета напряжений внутреннего трения в потоках. Результатом подстановки в эти формулы формул (3) с учетом (4) являются выражения для расчета градиентов скоростей потоков (определяющих скорости деформаций сдвига в соответствующих направлениях):

$$\frac{\partial v_x^j}{\partial \xi} = \frac{(H^j)^{1+1/n}}{(\mu^j)^{1/n}} \cdot \left(\frac{\partial P^j}{\partial z} \right)^{1/n} \cdot \frac{\xi - \xi_{0x}^j}{v^j} \cdot \left[\left(\frac{\xi - \xi_{0x}^j}{v^j} \right)^2 + (\xi - \xi_{0z}^j)^2 \right]^{\frac{1/n-1}{2}}, \quad (10a)$$

$$\frac{\partial v_z^j}{\partial \xi} = \frac{(H^j)^{1+1/n}}{(\mu^j)^{1/n}} \cdot \left(\frac{\partial P^j}{\partial z} \right)^{1/n} \cdot (\xi - \xi_{0z}^j) \cdot \left[\left(\frac{\xi - \xi_{0x}^j}{v^j} \right)^2 + (\xi - \xi_{0z}^j)^2 \right]^{\frac{1/n-1}{2}}, \quad (10б)$$

где $\xi = y/H^j$, $0 \leq \xi \leq 1$ — безразмерная координата в радиальном направлении; $v^j = f_5(H^j, n, U_x, U_z, \xi_{0x}^j, \xi_{0z}^j)$ — отношение градиента давления в поступательном потоке к градиенту давления в циркуляционном потоке.

Аналитическое интегрирование формул (10) по координате ξ с учетом кинематических граничных условий (7) позволяет построить формулы для расчета распределений скоростей потоков по глубине канала элемента [Полосин, 2007]. Формула для скорости поступательного потока, записанная при $\xi = 1$, позволяет получить выражение для расчета нормирующего градиента давления в поступательном потоке $(\partial P^j / \partial z)_N$, при котором $\xi_{0x}^j = \xi_{0z}^j = 0$. Наличие в экструдере интенсивного циркуляционного потока, способствующего перемешиванию расплава, позволяет предположить, что в каждом поперечном сечении канала распределение температуры близко к равномерному. Правомочность этого допущения подтверждается результатами опытов по измерению температуры расплава в сечении канала шнека, из которых следует, что, например, примерно для 80 % ширины канала $T_1^j \approx \text{const}$ [Басов, Казанков, 1984]. Это позволяет преобразовать уравнение теплового баланса. Интегрирование уравнения (5) по координате y от 0 до H^j с использованием правила Лейбница и уравнения баланса по поступательному потоку (для интегрирования конвективного члена), условий (8) (для интегрирования диффузионного члена), формулы интегрирования по частям, уравнений (1), (2) и условий (7) (для интегрирования функции диссипации) позволяет получить осредненное уравнение энергии. В итоге получена система формул и уравнений, позволяющих совместно с граничными условиями (6), (9) рассчитать распределения напряжений трения, давления и температуры расплава по длине канала каждого элемента шнека:

$$\tau_{xy}^j = H^j \cdot \frac{1}{v^j} \cdot \frac{\partial P^j}{\partial z} \cdot (\xi - \xi_{0x}^j), \quad \tau_{zy}^j = H^j \cdot \frac{\partial P^j}{\partial z} \cdot (\xi - \xi_{0z}^j), \quad 0 \leq \xi \leq 1; \quad (11)$$

$$P^j = P^{j,0} + (z - z^{j-1}) \cdot \frac{\partial P^j}{\partial z}, \quad z^{j-1} \leq z \leq z^{j-1} + Z^j, \quad (12)$$

где

$$\frac{\partial P^j}{\partial z} = B_z^j \cdot \left(\frac{\partial P^j}{\partial z} \right)_N \cdot \Pi^j, \quad \left(\frac{\partial P^j}{\partial z} \right)_N = \left(1 + \frac{1}{n} \right)^n \cdot \frac{U_z^n}{(H^j)^{1+n}} \cdot \mu^j, \quad \Pi^j = \frac{F_d^j - Q^j / Q_d^j}{F_P^j \cdot (1 - Q^j / Q_d^j)}; \quad (13)$$

$$\rho \cdot c_p \cdot Q^j \cdot \frac{d\bar{T}_1^j}{dz} = W^j \cdot [\alpha_b \cdot (T_b - \bar{T}_1^j) - \alpha_{scr} \cdot (\bar{T}_1^j - T_{scr})] + W^j \cdot (v_x^{j,b} \cdot \tau_x^{j,b} + v_z^{j,b} \cdot \tau_z^{j,b}) - Q^j \cdot \frac{\partial P^j}{\partial z}. \quad (14)$$

Здесь использованы следующие обозначения: $\xi_{0x}^j = f_6(n)$, $\xi_{0z}^j = f_7(H^j, W^j, n, U_z, Q^j)$ — безразмерные координаты сечений нулевых напряжений трения в потоках; $B_z^j = f_8(H^j, n, \xi_{0x}^j, \xi_{0z}^j, v^j)$ — безразмерный градиент давления в поступательном потоке; Π^j — поправка, учитывающая П-эффект (уменьшение скорости поступательного потока вследствие сопротивления боковых стенок канала течению) [Воскресенский, Ищенко, 2008]; $F_d^j = f_9(H^j, W^j)$, $F_P^j = f_{10}(H^j, W^j)$ — коэффициенты влияния боковых стенок канала на вынужденный поток и поток под давлением; $Q_d^j = f_{11}(H^j, W^j, U_z)$ — расход вынужденного потока через канал элемента, м³/с; \bar{T}_1^j — средняя по глубине канала элемента температура расплава, °С; $\tau_x^{j,b} = \tau_{xy}^j|_{\xi=1}$, $\tau_z^{j,b} = \tau_{zy}^j|_{\xi=1}$ — напряжения трения в потоках у крышки канала (поверхности корпуса), Па.

Поиск расхода поступательного потока через экструдер Q , определяющего производительность экструдера G , осуществляется методом последовательных приближений при варьировании расхода в диапазоне $0 \leq Q \leq z_f^{\min} \cdot Q_d^{\min}$, где $Q_d^{\min} = \min_{j=1, N_e} Q_d^j$, $z_f^{\min} = z_f^j|_{Q_d^j=Q_d^{\min}}$. При каждом новом значении расхода рассчитываются распределения температуры и давления расплава по длине канала шнека. Ядром этой процедуры является расчет профилей температуры и давления в канале отдельного элемента шнека, который заключается в следующем. При текущем значении расхода $Q^j = Q/z_f^j$ в каждом сечении канала j -го элемента с координатой z^j вычисляются кинематические характеристики плоского потока расплава $\xi_{0x}^{j,i}$, $\xi_{0z}^{j,i}$, $v^{j,i}$, $B_z^{j,i}$ путем решения системы нелинейных определяющих уравнений. Эти уравнения получаются аналитическим интегрированием формул для скоростей потоков в соответствии с (1) и записью формул для скоростей потоков при $\xi = 1$ с учетом условий (7). Методика построения и решения системы определяющих уравнений приведена в работе [Полосин, 2007], где предложен аналитический подход, позволяющий уменьшить погрешность и повысить скорость расчета. Необходимость вычисления кинематических характеристик в каждом сечении канала обусловлена переменностью глубины канала элемента по его длине. (Принятие допущения о том, что глубина канала изменяется по длине канала, а не вдоль его оси, позволило считать глубину постоянной в пределах ширины канала [Воскресенский, Кучинская, 2000].) Значения характеристик $\xi_{0x}^{j,i}$, $\xi_{0z}^{j,i}$, $v^{j,i}$, $B_z^{j,i}$ используются для расчета средней температуры расплава в i -м сечении по следующей схеме:

$$\begin{aligned} \bar{T}_1^{j,i} = T_r + \frac{1}{b} \cdot \ln \left(\frac{W^j \cdot (\alpha_b + \alpha_{scr}) + b \cdot q_{\eta p}^{j,i}}{b \cdot q_{\alpha}^j} \cdot \left\{ 1 - \exp \left[-\frac{b \cdot q_{\alpha}^j \cdot (z^i - z^{i-1})}{\rho \cdot c_p \cdot Q^j} \right] \right\} + \right. \\ \left. + \exp \left\{ b \cdot \left[\bar{T}_1^{j,i-1} - T_r - \frac{q_{\alpha}^j \cdot (z^i - z^{i-1})}{\rho \cdot c_p \cdot Q^j} \right] \right\} \right), \quad i = \overline{1, K}, \quad \bar{T}_1^{j,0} = \begin{cases} T_{melt}, & j = 1, \\ \bar{T}_1^{j-1,K}, & j = \overline{2, N_e}, \end{cases} \end{aligned} \quad (15)$$

где $q_{\eta p}^j$, q_{α}^j — удельные тепловые потоки за счет работы сил внутреннего трения в потоках и давления, теплообмена расплава с корпусом и шнеком экструдера, Вт/м:

$$\begin{aligned} q_{\eta p}^j = \frac{\mu_0}{(H^j)^{1+n}} \cdot \left(1 + \frac{1}{n} \right)^n \cdot B_z^j \cdot \left\{ H^j \cdot W^j \cdot \left[U_x^{1+n} \cdot \frac{1 - \xi_{0x}^j}{v^j} + U_z^{1+n} \cdot (1 - \xi_{0z}^j) \right] - Q^j \cdot U_z^n \right\} \cdot \Pi^j, \\ q_{\alpha}^j = W^j \cdot \left[\frac{1}{b} \cdot (\alpha_b + \alpha_{scr}) - \alpha_b \cdot T_b - \alpha_{scr} \cdot T_{scr} + (\alpha_b + \alpha_{scr}) \cdot T_r \right]. \end{aligned}$$

Формула (15) получена путем подстановки формул (11), записанных при $\xi = 1$, с учетом (13) и (4) в уравнение (14), разделения в полученном уравнении переменных \bar{T}_1^j и z , линеаризации (разложением нелинейного члена $\exp[-b \cdot (T_1^j - T_r)]$ в ряд Тейлора) и аналитического интегрирования линеаризованного уравнения с разделенными переменными [Полосин, 2009].

При найденном значении средней в сечении температуры последовательно рассчитываются коэффициент консистенции по формуле (4), нормирующий и текущий градиенты давления в поступательном потоке по формулам (13) и давление расплава в i -том сечении по формуле (12).

Температура и давление расплава, достигнутые на выходе из канала текущего j -го элемента шнека, в соответствии с условиями сопряжения (9) задаются как входные для следующего $(j+1)$ -го элемента. При окончании расчета процесса в канале шнека вычисляется давление расплава на входе в формующую (из расплава трубчатую заготовку) щель, которая на 85 % определяет сопротивление, оказываемое кольцевой головкой, течению: $P_{die} = f_{12}(k_{die}, n, \mu_{die}, Q)$, где

$k_{die} = f_{13}(d, \delta_0, l, n)$ — коэффициент гидравлического сопротивления щели головки, м³;
 $\mu_{die} = \mu^{N_e, K}$ — коэффициент консистенции расплава на выходе из канала шнека, Па·сⁿ.

Условием окончания итераций по расходу Q служит выполнение неравенства

$$|1 - P_{die}/P_{scr}| \cdot 100 \leq \varepsilon_p,$$

где $P_{scr} = P^{N_e, K}$ — давление расплава на выходе из канала шнека, Па; ε_p — предельная погрешность расчета рабочей точки экструдера, определяемая основной допускаемой погрешностью измерения давления, %.

Расчет процесса подготовки расплава в двухшнековом экструдере с зацепляющимися шнеками осуществляется с использованием описанной выше процедуры, которая модифицируется таким образом, что расход потока через экструдер Q представляется в виде суммы расходов потоков через каналы двух шнеков $Q_1 = \alpha_Q \cdot Q_2$ и $Q_2 = Q - Q_1$, отношение между которыми $\alpha_Q = Q_1/Q_2$ для каждого элемента рассчитывается методом последовательных приближений. Критерием окончания итераций является сближение (в среднеквадратической норме) распределений давлений по длине каналов первого и второго шнеков [Воскресенский, Сыкалов, 2013].

Найденное значение расхода Q определяет производительность экструдера G и температуру экструдата T_{ext} ,

$$G = \rho \cdot Q, \quad T_{ext} = \bar{T}_1^{N_e, K}, \quad (15)$$

а также показатели качества экструдата — степень смешения (суммарная среднемассовая деформация сдвига, накопленная в расплаве за время пребывания в экструдере) и индекс термической деструкции (отображение зависимости степени деструкции от времени при произвольном температурно-временном режиме, реализуемом в экструдере, на зависимость, экспериментально полученную для данного типа материала при изотермических условиях) [Полосин, Плоский, 2002],

$$\gamma = \sum_{j=1}^{N_e} (\bar{\tau}^j \cdot \bar{\dot{\gamma}}^j), \quad I_d = \frac{\bar{\tau}}{\tau_d} \cdot \exp \left[\frac{E_d \cdot (T_{ext} - T_d)}{8,31 \cdot (T_{ext} + 273) \cdot (T_d + 273)} \right] \cdot 100, \quad (16)$$

где среднее время пребывания $\bar{\tau}^j$ и средняя интегральная скорость деформации сдвига $\bar{\dot{\gamma}}^j$ материала в канале элемента шнека определяются выражениями, полученными при учете переменной глубины канала по его длине и независимости скоростей потоков от координаты x по ширине в центральной части сечения канала вследствие отсутствия в этой части радиального потока

$$\begin{aligned} \bar{\tau}^j &= \frac{1}{Q} \cdot z_f^j \cdot W^j \cdot \int_0^{Z^j} H^j dz = \frac{1}{Q} \cdot z_f^j \cdot \frac{H_{in}^j + H_{out}^j}{2} \cdot W^j \cdot Z^j, \quad \bar{\tau} = \sum_{j=1}^{N_e} \bar{\tau}^j, \\ \bar{\dot{\gamma}}^j &= \frac{1}{Z^j} \cdot \int_0^{Z^j} \left[\frac{1}{H^j} \cdot \int_0^1 \sqrt{\left(\frac{\partial v_x^j}{\partial \xi} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_z^j}{\partial \xi} \right)^2} d\xi \right] dz \stackrel{\text{Подстановка формул (10)}}{=} \\ &= \frac{1}{Z^j} \cdot \left(1 + \frac{1}{n} \right) \cdot U_z \cdot \int_0^{Z^j} \left\{ \frac{1}{H^j} \cdot (B_z^j \cdot \Pi^j)^{\frac{1}{n}} \cdot \int_0^1 \left[\left(\frac{\xi - \xi_{0x}^j}{v^j} \right)^2 + (\xi - \xi_{0z}^j)^2 \right]^{\frac{1}{2n}} d\xi \right\} dz. \end{aligned} \quad (17)$$

Интеграл в правой части формулы (17) вычисляется по методу Симпсона.

Производительность экструдера G , определяющая скорость выхода экструдата из головки v_{ext} , толщина $\delta_{ext} = f_{14}(\delta_0, \lambda_s)$ и температура T_{ext} экструдата являются входными параметрами модуля расчета характеристик процесса формообразования рукава пленки в потоке воздуха.

Математическая модель формообразования пленочного рукава в потоке воздуха

Анализ деформационных и тепловых процессов в зоне формообразования и охлаждения полимерной пленки позволяет разделить ее на два участка:

участок до линии затвердевания (кристаллизации) пленкообразующего полимера, на котором осуществляется продольное (тянущими валками) и поперечное (сжатым воздухом) растяжение охлаждаемой воздухом трубчатой заготовки полимера, находящегося в вязкотекучем состоянии, до необходимых размеров (радиуса R_f и толщины δ_f);

участок после линии затвердевания, на котором прекращается изменение геометрических параметров рукава (R_f , δ_f), так как интенсивный теплообмен на его поверхности, приводящий к застыванию наружного полимерного слоя, не позволяет растягиваться и внутренним, еще не закристаллизовавшимся слоям.

Наиболее сильное влияние на физико-механические и оптические свойства пленки оказывают условия формообразования на участке до линии затвердевания. Так, изменением соотношения степеней растяжения в продольном λ_d и поперечном λ_b направлениях можно изменять разрушающее напряжение при растяжении на 10–20 %. Поэтому разработана ММ формообразования и охлаждения пленочного рукава на участке до линии затвердевания, на котором происходит изменение как формы, толщины, так и температуры полимерного тела пленки. ММ построена на основе законов сохранения и реологии в условиях растяжения при следующих допущениях:

1. Формообразование рукава осуществляется в условиях, близких к одноосному растяжению, так как степень раздува при получении, например, полиэтиленовых пленок, как правило, не превышает трех–четырёх.

2. Кривизна стенки рукава мала, так как термические сопротивления рукава и плоской пластины одинаковой длины совпадают [Лукач, Петухов, Сенатос, 1981].

3. Напряжение σ , развивающееся при формировании рукава в неизотермических условиях, пропорционально средней скорости образования относительной свободной поверхности рукава $\dot{\xi}_{av}$ [Ведь, Сенатос, Петухов, 1979].

4. Процесс охлаждения протекает в статическом режиме, так как температура рукава на каждом заданном расстоянии от головки постоянна при непрерывном методе производства.

5. Полимер несжимаем, его теплофизические свойства постоянны.

6. Распределение температуры по сечению рукава равномерное, так как вследствие малой толщины слоя полимера и малых коэффициентов теплоотдачи при воздушном охлаждении [$\alpha_{cj} = 5\text{--}200 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$] выравнивание температуры в слое происходит существенно интенсивнее, чем отвод теплоты с поверхности, и скорость изменения температуры в центре пленки определяется интенсивностью теплообмена на ее поверхности.

7. Теплота, выделяемая при затвердевании полимера, мала по сравнению с теплотой, отводимой за счет охлаждения, потери теплоты за счет теплопроводности вдоль рукава пренебрежимо малы.

8. Для описания тепловых процессов в наружном и внутреннем хладагентах принята модель идеального смешения.

Результатирующее математическое описание процесса формообразования и охлаждения пленочного рукава на участке до линии затвердевания имеет следующий вид:

уравнение материального баланса (условие постоянства массового расхода) рукава —

$$R \cdot \delta \cdot v = R_{ext} \cdot \delta_{ext} \cdot v_{ext}; \quad (18)$$

формулы для расчета внутреннего радиуса R_{ext} и скорости выхода v_{ext} экструдата —

$$R_{ext} = 0,5 \cdot (d - 2 \cdot \delta_0), \quad v_{ext} = G / (2 \cdot \pi \cdot R_{ext} \cdot \delta_{ext} \cdot \rho); \quad (19)$$

формулы для расчета распределений внутреннего радиуса R и скорости движения v формируемого рукава по координате h вдоль его оси ($0 \leq h \leq H_c$), полученные путем статистиче-

ской обработки экспериментальных данных [Ведь, Сенатос, Петухов, 1979] —

$$R = R_{ext} + A \cdot (R_f - R_{ext}) \cdot [1 - \cos(\pi \cdot h / H_c)], \quad v = v_{ext} + B \cdot (v_d - v_{ext}) \cdot [1 - \cos(\pi \cdot h / H_c)]; \quad (20)$$

реологическая модель материала рукава [Лукач, Петухов, Сенатос, 1981] —

$$\sigma = \lambda_d \cdot K \cdot \dot{\xi}_{av}, \quad K = k_0 + k_1 \cdot T_2^{-1}, \quad \dot{\xi}_{av} = [\lambda_b \cdot \sqrt{\lambda_d} - (\lambda_b + 1) \cdot \sqrt{(\lambda_d + 1)/8}] / \tau; \quad (21)$$

уравнение теплового баланса рукава —

$$\delta \cdot \rho \cdot c_p \cdot v \cdot \frac{dT_2}{dh} = \delta \cdot \sigma \cdot \dot{\xi}_{av} - \sum_{j=1}^2 \alpha_{cj} \cdot (T_2 - T_{cj}) - \sum_{j=1}^2 \sigma_0 \cdot \varepsilon \cdot [(T_2 + 273)^4 - (T_{cj} + 273)^4]; \quad (22)$$

уравнения тепловых балансов наружного ($j = 1$) и внутреннего ($j = 2$) хладагентов —

$$0 = G_{cj} \cdot c_{pcj} \cdot (T_{cj}^0 - T_{cj}) + \alpha_{cj} \cdot F_j \cdot (T_2 - T_{cj}) + \sigma_0 \cdot \varepsilon \cdot F_j \cdot [(T_2 + 273)^4 - (T_{cj} + 273)^4]; \quad (23)$$

температурные граничные условия —

$$T_2|_{h=0} = T_{ext}, \quad T_2|_{h=H_c} = T_{melt}, \quad (24)$$

где δ — толщина рукава, изменяющаяся вдоль его оси, м; A, B, k_0, k_1 — эмпирические коэффициенты, зависящие от типа полимера; $R_f = f_{15}(R_{ext}, \lambda_b)$ — внутренний радиус рукава в конце участка формообразования, м; H_c — высота линии затвердевания (граница помутнения рукава), м; $v_d = f_{16}(D_d, N_d)$ — скорость движения пленки после тянущих валков, м/с; $\lambda_d = f_{17}(v_{ext}, v_d)$ — степень продольного растяжения пленки; K — коэффициент, характеризующий способность охлаждаемого расплава полимера образовывать свободную поверхность при растяжении, Па·с; τ — время приращения площади поверхности рукава, с; T_2 — температура рукава, изменяющаяся вдоль его оси, °C; α_{cj} — коэффициенты теплоотдачи от наружной ($j = 1$) и внутренней ($j = 2$) поверхностей рукава соответствующим хладагентам с температурами T_{cj} , Вт/(м²·°C); $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$ — постоянная Стефана–Больцмана, Вт/(м²·K⁴); G_{cj}, T_{cj}^0 — расходы (кг/с) и начальные температуры (°C) наружного ($j = 1$) и внутреннего ($j = 2$) хладагентов, $G_{c2} = f_{18}(R_f)$; $F_1 = f_{19}(R_{ext}, R_f, \delta_{ext}, \delta_f, H_c)$, $F_2 = f_{20}(R_{ext}, R_f, H_c)$ — площади наружной и внутренней поверхностей рукава, от которых осуществляется отвод теплоты, м².

Входящие в уравнения тепловых балансов (22) и (23) коэффициенты теплоотдачи рассчитываются на каждом участке по длине рукава в зависимости от реологических и теплофизических характеристик, а также средних скоростей хладагентов по эмпирическим моделям вида

$$\alpha_{cj} = c_{0j} \cdot h^{c_{1j}-1} \cdot (\eta_{cj} / \rho_{cj})^{-c_{1j}} \cdot \lambda_{cj} \cdot v_{cj}^{c_{1j}}, \quad j = 1, 2, \quad (25)$$

где c_{0j}, c_{1j} — эмпирические коэффициенты, зависящие от типов полимера и хладагента; v_{cj} — средние скорости хладагентов (м/с), рассчитываемые в зависимости от расходов хладагентов, подаваемых снаружи или внутрь рукава, и геометрических параметров охлаждающего кольца, если $j = 1$, или устройства внутреннего охлаждения рукава (устройства распределения хладагента) Γ_{cd} , если $j = 2$, $v_{c1} = f_{21}(R_{cr}, b_{cr}, G_{c1})$, $v_{c2} = f_{22}(\Gamma_{cd}, G_{c2})$.

Расчет распределений радиуса R , толщины δ и температуры T_2 формируемого пленочного рукава вдоль его оси осуществляется методом итераций по высоте линии затвердевания H_c . Начальное приближение высоты линии затвердевания выбирается в зависимости от типа пленкообразующего полимера $T_{polymer}$ и заданной толщины пленки δ_f^0 (как правило, на практике высота линии затвердевания поддерживается примерно равной диаметру рукава). На каждой итерации при заданном значении H_c рассчитываются:

распределения по координате h радиуса R и скорости v по формулам (20) с учетом формул (19) и распределения толщины δ по уравнению материального баланса (18);

распределения по координате h температуры рукава T_2 по уравнению теплового баланса (22) с учетом формул (21), (25) и распределений температур хладагентов T_{cj} по уравнениям

тепловых балансов (23); при этом на каждом шаге по координате h сначала рассчитывается текущая температура рукава, которая затем используется для расчета температур хладагентов.

Для решения нелинейного обыкновенного дифференциального уравнения (22) используется метод Рунге–Кутты четвертого порядка точности с автоматическим поиском устойчивого шага расчета Δh по алгоритму трех зон [Тарасик, 2004]. Нелинейные алгебраические уравнения (23) решаются методом Ньютона–Рафсона, обеспечивающим квадратичную скорость сходимости. Условием окончания итераций является приближенное выполнение второго равенства из граничных условий (24), то есть

$$\left| 1 - T_2|_{h=H_c} / T_{melt} \right| \cdot 100 \leq \varepsilon_T, \quad (26)$$

где ε_T — предельная погрешность расчета высоты линии затвердевания, определяемая основной допускаемой погрешностью измерения температуры, %.

Выполнение неравенства (26) физически означает, что температура рукава на линии затвердевания $T_2|_{h=H_c}$ равна (в пределах допускаемой погрешности) температуре плавления пленкообразующего полимера T_{melt} . Если при заданном на текущей итерации значении высоты линии затвердевания неравенство (26) не выполняется, осуществляется переход к следующей итерации, значение H_c на которой вычисляется на основе значения H_c на предыдущей итерации с учетом знака выражения под модулем в неравенстве (26). Если знак положительный (что означает, что рукав переохлажден), то значение H_c уменьшается; если знак отрицательный (рукав недостаточно охлажден), то значение H_c увеличивается.

На основе характеристик рукава рассчитываются показатели качества рукавной пленки: геометрические характеристики, толщина и ширина —

$$\delta_f = \delta|_{h=H_c}, \quad w_f = 2 \cdot \pi \cdot (R_f + \delta_f) / (m \cdot k); \quad (27)$$

оптические характеристики, мутность и глянецовитость. —

$$M_f = a_0 + a_1 \cdot H_c + a_2 \cdot H_c^2, \quad L_f = b_0 + b_1 \cdot H_c + b_2 \cdot H_c^2, \quad (28)$$

где m — число k -слойных плоских пленочных полотен, на которые разрезается сложенный рукав; $a_0, a_1, a_2, b_0, b_1, b_2$ — эмпирические коэффициенты, зависящие от типа полимерной пленки.

Эмпирические модели (28) получены путем статистической обработки экспериментальных данных по зависимостям мутности и глянецовитости рукавных пленок различных типов от высоты линии затвердевания. Структурный синтез моделей осуществлен путем постепенного усложнения (повышения порядка) регрессионного уравнения и сравнения остаточных дисперсий регрессионных уравнений смежных порядков (оптимальная структура модели получена при наименьшем значении остаточной дисперсии). На каждом этапе структурного синтеза расчет значений коэффициентов моделей выполнен с использованием метода наименьших квадратов.

Настройка системы моделирования на типы полимера и хладагентов осуществляется путем формирования из информационной подсистемы и библиотек ММ числовых значений входных параметров $H_{polymer}, H_{ca}$ и эмпирических коэффициентов $\{A, B, k_0, k_1, c_{0j}, c_{1j}, j = 1, 2, a_0, a_1, a_2, b_0, b_1, b_2\}$ ММ подготовки расплава в экструдере и формообразования пленочного рукава.

Проверка адекватности математических моделей

Адекватность ММ проверена по данным процессов изготовления рукавных пленок из полиэтилена низкой плотности (ПЭНП) и полиэтилена высокой плотности толщиной $(0,03–0,2) \cdot 10^{-3}$ м на линиях, состоящих из одношнековых экструдеров (с диаметрами шнека 0,045, 0,063, 0,09 м и относительными длинами шнека 25, 30 и 20 соответственно), укомплектованных угловыми головками (диаметром 0,18, 0,25 и 0,35 м). Шнек каждого экструдера имел модульную конфигурацию и состоял из транспортных (EZ) и смесительных (KE) элементов, объединенных в соответствующие секции, как показано на рисунке 3.

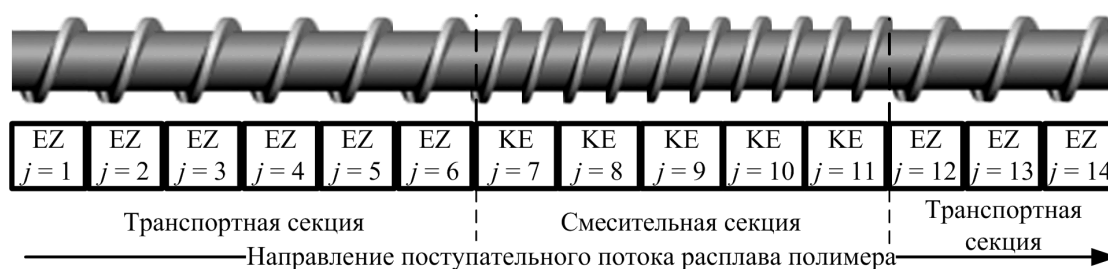


Рис. 3. Конфигурация модульного шнека экструдера

Пример исходных данных для проверки адекватности ММ приведен в таблице 2.

Таблица 2. Пример исходных данных

Характеристики материалов	Геометрические параметры экструдера	Режимные параметры процесса	Эмпирические коэффициенты ММ
Полимер — ПЭНП; $T_{melt} = 105^\circ\text{C}$; $\rho = 918 \text{ кг/м}^3$; $c_p = 2180 \text{ Дж/(кг}\cdot^\circ\text{C)}$; $\varepsilon = 0,8$; $\lambda_s = 10\%$. Хладагент — воздух; $\rho_{cj} = 1,2 \text{ кг/м}^3$; $\eta_{cj} = 17,2 \cdot 10^{-6} \text{ Па}\cdot\text{с}$; $c_{pcj} = 1000 \text{ Дж/(кг}\cdot^\circ\text{C)}$; $\lambda_{cj} = 0,025 \text{ Вт/(м}\cdot^\circ\text{C)}$, $j = 1, 2$	$D = 0,09 \text{ м}$; $L^j = 0,125 \text{ м}$, $H_{in}^j = H_{out}^j = 0,004 \text{ м}$, $j = 1, \dots, 14$; $z_j^j = 1$, $e^j = 0,012 \text{ м}$, $j = 1, \dots, 6, 12, 13, 14$; $z_j^j = 2$, $e^j = 0,008 \text{ м}$, $j = 7, \dots, 11$; $d = 0,35 \text{ м}$; $\delta_0 = 6 \cdot 10^{-4} \text{ м}$; $l = 0,05 \text{ м}$	$N = 0,5\text{--}1,7 \text{ об/с}$; $T_b = 140^\circ\text{C}$; $\lambda_b = 3$; $T_{cj}^0 = 20^\circ\text{C}$, $j = 1, 2$; $v_d = 0,05\text{--}0,15 \text{ м/с}$	$\mu_0 = 56000 \text{ Па}\cdot\text{с}^n$; $b = 0,01 \text{ 1/}^\circ\text{C}$; $T_r = 110^\circ\text{C}$; $n = 0,345$; $\alpha_b = \alpha_{scr} =$ $= 100 \text{ Вт/(м}^2\cdot^\circ\text{C)}$; $A = B = 0,5$; $k_0 = -31125 \text{ Па}\cdot\text{с}$; $k_1 = 75 \cdot 10^5 \text{ Па}\cdot\text{с}\cdot^\circ\text{C}$; $c_{01} = 0,62$; $c_{11} = 0,63$; $c_{02} = 0,032$; $c_{12} = 0,80$; $a_0 = 6,82 \%$; $a_1 = 19,5 \%$; $a_2 = -15,3 \%$; $b_0 = 45,0 \text{ ед.}$; $b_1 = 107 \text{ ед./м}$; $b_2 = -225 \text{ ед./м}^2$

В качестве варьируемых параметров использованы частота вращения шнека экструдера (на стадии подготовки экструдата) и скорость вращения тянущих валков (на стадии формообразования рукава). Проверка адекватности ММ выполнена путем сравнения рассчитанных (1) и измеренных в ходе промышленного эксперимента (2) зависимостей температуры экструдата от частоты вращения шнека (рис. 4) и толщины пленки от скорости тянущих валков (рис. 5).

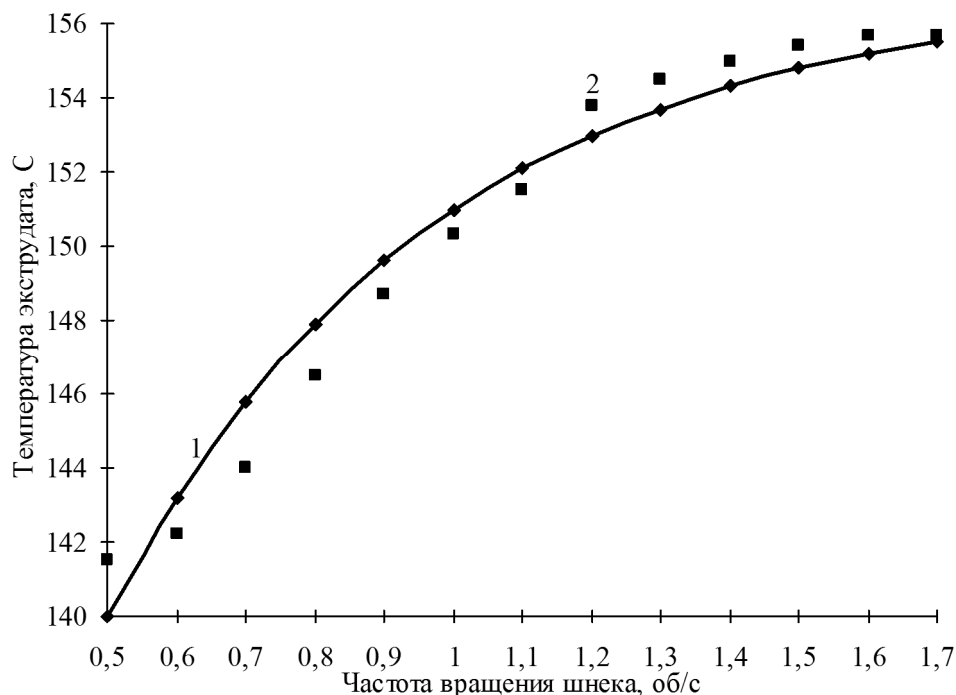


Рис. 4. Зависимость температуры экструдата от частоты вращения шнека

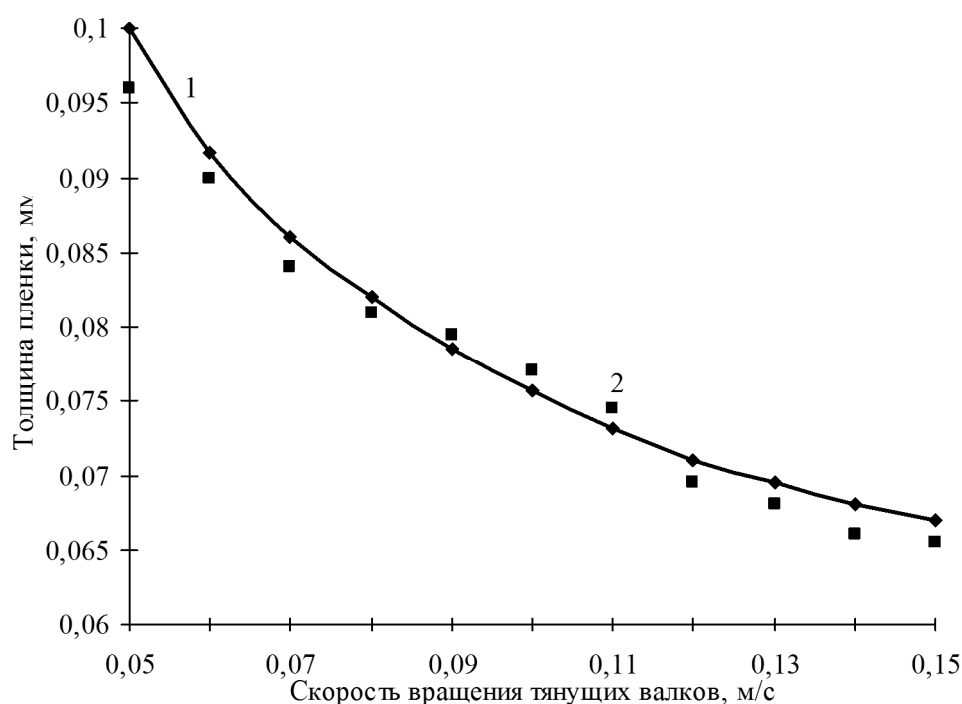


Рис. 5. Зависимость толщины пленки от скорости вращения тянущих валков

С повышением частоты вращения шнека температура экструдата увеличивается с постепенно уменьшающейся скоростью роста. При частоте от 0,5 об/с до 1,1 об/с рост температуры обусловлен интенсивными диссипативными тепловыделениями в деформируемом расплаве. При частоте, превышающей 1,1 об/с, рост температуры замедляется вследствие уменьшения интенсивности диссипации (из-за падения вязкости) и времени пребывания материала в экструдере. С повышением скорости вращения тянущих валков (при постоянной скорости выхода экструдата из головки, то есть неизменной производительности экструдера) толщина пленки падает, что обусловлено увеличением степени растяжения пленки в продольном направлении.

Результаты статистической обработки полученных данных приведены в таблице 3.

Таблица 3. Результаты статистической обработки полученных данных

Стадия	Число опытов	Число эмпирических коэффициентов ММ	Среднее измеренное значение выходного параметра	Дисперсия модели среднего	Остаточная дисперсия	Рассчитанный критерий Фишера	Табличный критерий Фишера ($\beta = 0,95$)	Рассчитанный коэффициент детерминации	Минимально допустимый коэффициент детерминации
Подготовка экструдата	13	6	150,4 °C	28,1 °C ²	1,8 °C ²	15,7	3,57	0,96	0,75
Формообразование рукава	11	7	0,077 мм	9,96·10 ⁻⁵ мм ²	0,982·10 ⁻⁵ мм ²	10,1	5,96	0,96	0,75

Из таблицы 3 видно, что рассчитанные значения критерия Фишера превышают его табличные значения, а вычисленный коэффициент детерминации больше минимально допустимо-

го значения [Тарасик, 2004]. При отсутствии параллельных опытов это подтверждает адекватность разработанных ММ реальному объекту с доверительной вероятностью $\beta = 0,95$.

Компьютерное исследование процесса изготовления рукавных пленок

Система моделирования процессов экструзии и формообразования разработана с использованием следующих информационных технологий: среда геометрического моделирования «Компас 3D» (созданы 3D-модели элементов шнеков экструдеров, формующих головок и охлаждающих колец различных типов); СУБД Access (построены БД оборудования, пленок, полимеров и хладагентов, технологических регламентов, результатов исследования, база правил перенастройки); среда визуального объектно ориентированного программирования C++ Builder (разработаны библиотеки ММ ключевых стадий процесса и ММ для оценки качества экструдата и пленки, подсистемы перенастройки и исследования качества пленки, программный интерфейс, интерфейсы исследователя и администратора) [Программный комплекс..., 2010].

По сформированному исследователем заданию Y_0 система осуществляет выбор и компоновку оборудования в экструзионную линию, а также проверку, удовлетворяет ли скомпонованная линия заданным ограничениям по стоимости, производительности и энергопотреблению. При соблюдении этих требований на интерфейсе исследователя отображается синтезированная трехмерная модель экструзионной линии, включающая модели экструдера, формующей головки и охлаждающего кольца. На рисунке 6 представлена 3D-модель раздувного агрегата на базе одношнекового экструдера с отводом рукава в горизонтальном направлении, предназначенного для изготовления рукавных пленок из непластифицированного поливинилхлорида. Такой метод отвода рукава значительно удешевляет формующую оснастку и обеспечивает более равномерный выход потоков расплава из головки по всему ее периметру.

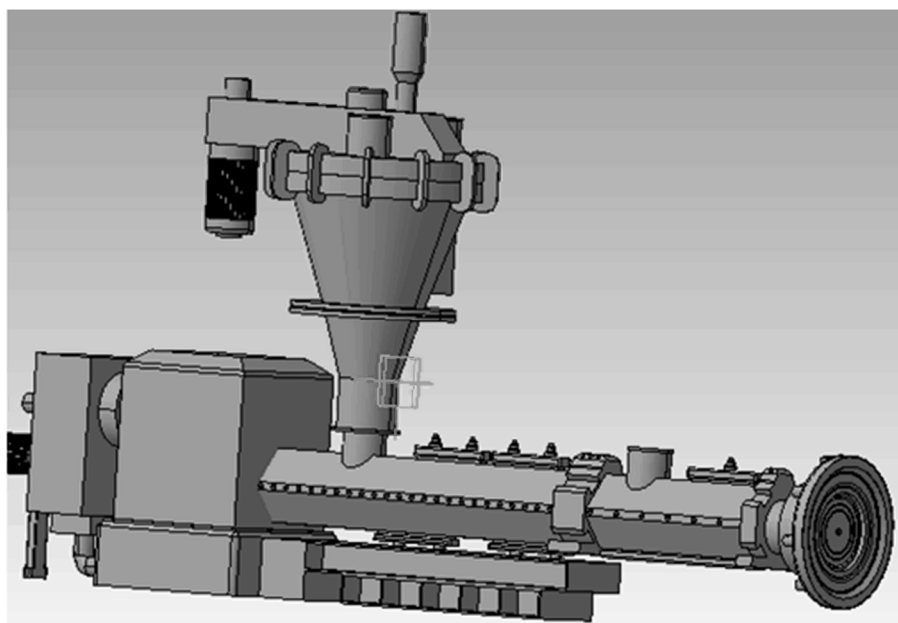


Рис. 6. 3D-модель раздувного экструзионного агрегата

Для синтезированной линии по ММ процесса экструзии при варьировании управляющих воздействий — частоты вращения шнека и температуры корпуса — в сформированных из БД технологических регламентов диапазонах осуществляется расчет распределений давления и температуры расплава полимера по длине канала модульного шнека экструдера и производительности экструдера G , определяемой как абсцисса рабочей точки — точки пересечения расходно-напорных характеристик шнека и головки. На рисунке 7 представлены распределение

температуры расплава по длине канала шнека и расходно-напорные характеристики шнека и головки раздувного одношнекового экструдера ($D = 0,09$ м; $L/D = 20$) для изготовления пленок из ПЭНП марки 15803-020. Рассчитанная производительность экструдера составляет 70,5 кг/ч.

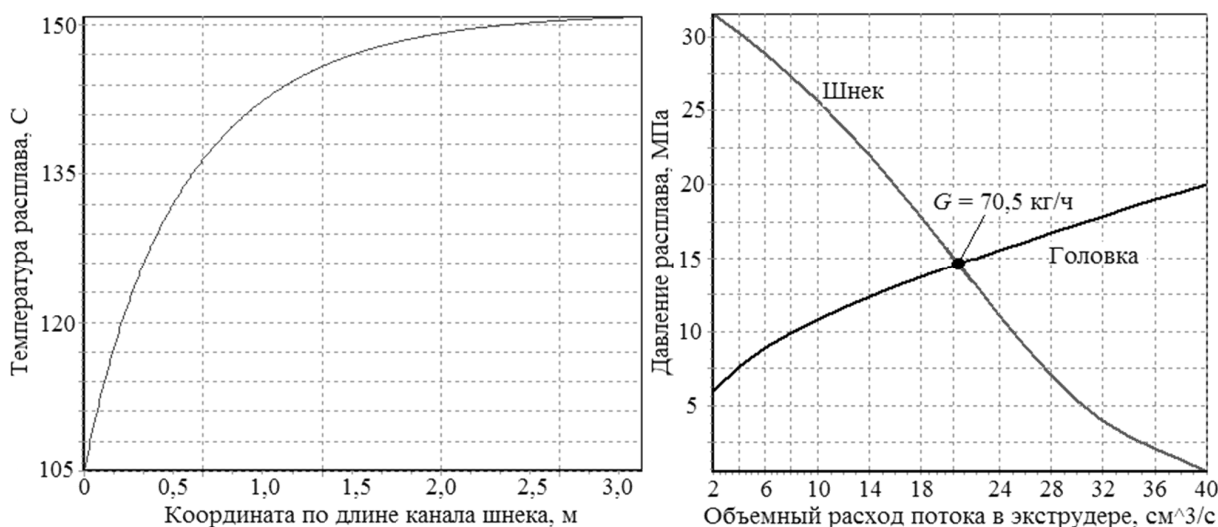


Рис. 7. Параметры состояния процесса подготовки экструдата

Расплав нагревается при движении по каналу шнека за счет теплоты, генерируемой в результате работы сил внутреннего трения, и теплоты, подводимой от обогреваемого корпуса экструдера теплопроводностью.

По параметрам состояния процесса экструзии рассчитываются показатели качества экструдата — степень смешения и индекс деструкции, зависимости которых от управляющих воздействий отображаются на интерфейсе исследователя в виде 3D-графических моделей (рис. 8).

Как видно из рисунка 8, с ростом температуры корпуса индекс деструкции экструдата увеличивается вследствие повышения теплосодержания материала за счет теплоты, подводимой от корпуса, а с увеличением частоты вращения шнека индекс деструкции падает, так как уменьшается время пребывания материала в экструдере, вследствие чего он не нагревается до высокой температуры. Обработка полученных зависимостей показателей качества от управляющих воздействий методом полного перебора позволяет определить допустимые значения частоты вращения шнека и температуры корпуса экструдера, которые обеспечивают выполнение требований к качеству экструдата ($\gamma \geq \gamma^{\min}$, $I_d \leq I_d^{\max}$) и предотвращают брак пленки, вызванный браком экструдата. Так, если режимные параметры экструдера обеспечивают получение экструдата с индексом деструкции I_d , не превосходящим пороговое значение $I_d^{\max} = 15\%$, число черных точек n_{destr} (площадью приблизительно 10^{-6} м² каждая) на 10 м² полотна изготавливаемой рукавной пленки не превысит предельно допустимое для фармацевтической и пищевой упаковки значение $n_{destr}^{\max} = 3$. Если степень смешения экструдата γ превышает минимальное значение $\gamma^{\min} = 2000$ ед. сдвига, то число включений нерасплавленного полимера n_{umelt} (площадью примерно $3 \cdot 10^{-6}$ м² каждое) на 10 м² полотна пленки не превысит предельное значение $n_{umelt}^{\max} = 15$. Таким образом, подсистема перенастройки на новый тип пленки и производительность процесса позволяет определить значения управляющих воздействий на стадии подготовки экструдата, обеспечивающие требуемое качество поверхности (внешний вид) пленки.

Для поиска управляющих воздействий на стадии формообразования рукава, обеспечивающих требуемое размерное качество и оптические характеристики пленки, в подсистеме исследования качества в сформированных регламентных диапазонах управляющих воздействий осуществляется расчет распределений радиуса, толщины и температуры формируемого пленочного рукава вдоль его продольной оси, а также высоты линии затвердевания материала. На рисунка 9 представлены продольные распределения толщины и температуры рукава пленки из

ПЭНП марки 15803-020, формуемого в потоке охлаждающего воздуха. Рассчитанная высота линии затвердевания (кристаллизации) ПЭНП составляет 0,55 м.

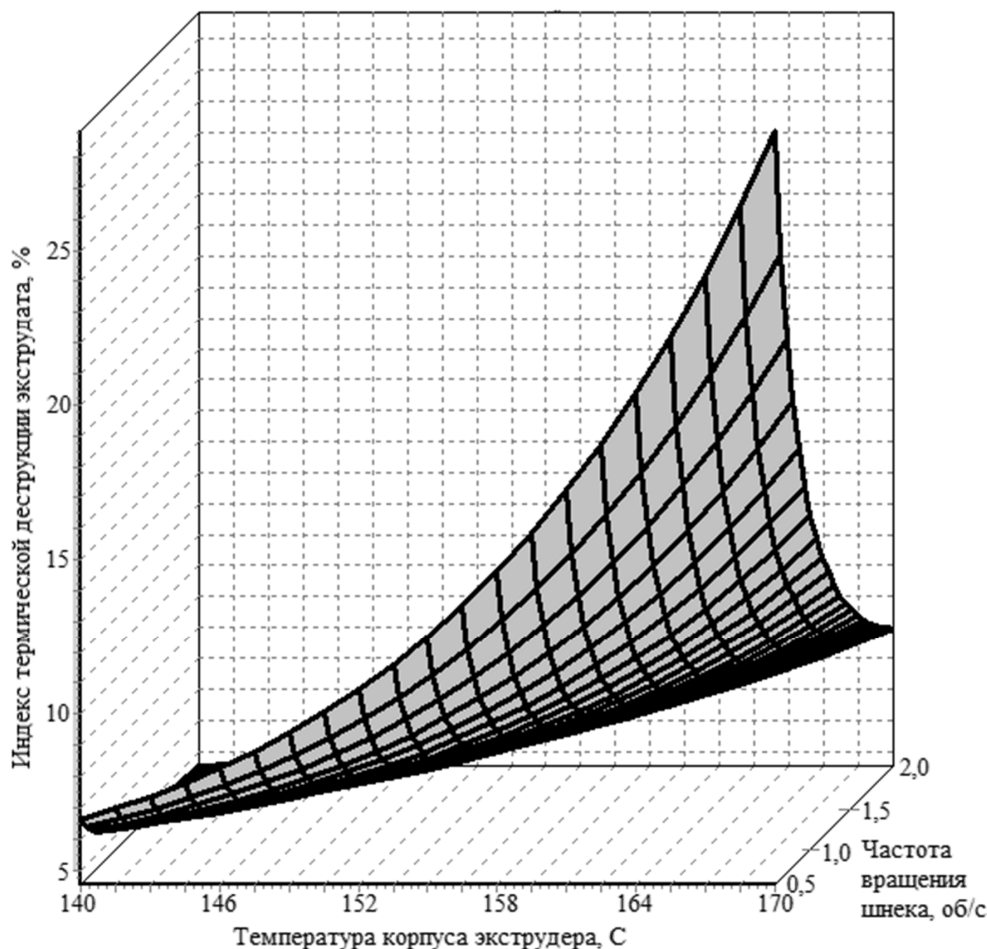


Рис. 8. Зависимость индекса деструкции экструдата от управляющих воздействий

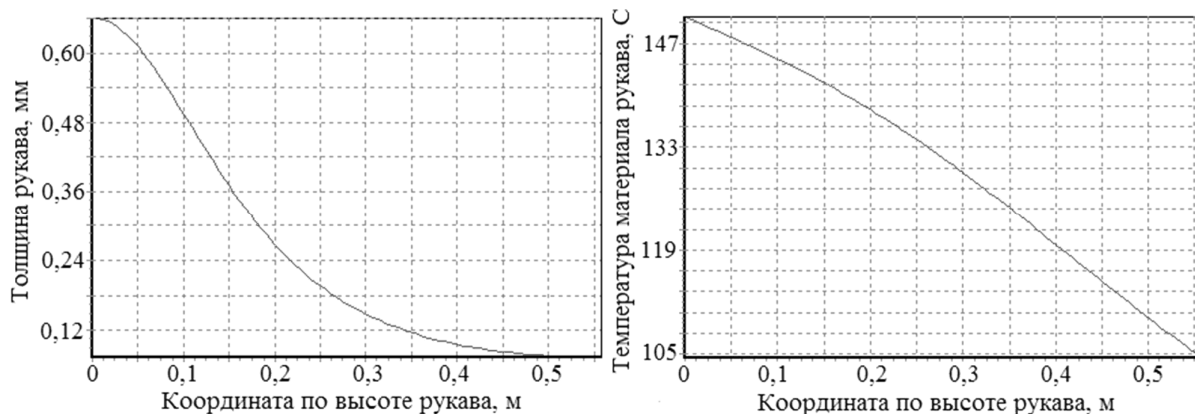


Рис. 9. Параметры состояния процесса формообразования пленочного рукава

Рукав утончается до толщины $\delta_f = 7,5 \cdot 10^{-5}$ м (толщина готовой однослойной рукавной пленки шириной $w_f = 1,5$ м) вследствие растяжения в продольном и поперечном направлениях. Рассчитанные оптические характеристики пленки составляют $M_f = 12,9$ %, $L_f = 36$ ед.

При варьировании управляющих воздействий — степени раздува, расхода и начальной температуры наружного хладагента, частоты вращения тянущих валков — в регламентных

диапазонах рассчитываются размерные и оптические показатели качества пленки и на интерфейсе исследователя в виде 3D-графических моделей отображаются зависимости показателей качества от управляющих воздействий. Анализ этих зависимостей позволяет исследователю определить допустимые значения управляющих воздействий на стадии формообразования рукава, которые обеспечивают выполнение требований потребителя к геометрическим (δ_f , w_f) и оптическим (M_f , L_f) характеристикам изготавливаемой пленки.

Заключение

Разработана проблемно ориентированная система моделирования процесса изготовления полимерных пленок методом экструзии с раздувом. Система позволяет на основе ММ процессов подготовки расплава в экструдере и формообразования пленочного рукава и ММ для оценки качества экструдата и пленки решать задачи перенастройки экструзионной линии на новые характеристики производства и управления качеством пленки для различных типов пленок, типов и конфигураций экструдеров, требований к производительности и качеству пленки. Применение системы моделирования позволит повысить конкурентоспособность производителей высокотехнологичных упаковочных и гигиенических полимерных пленок за счет роста качества продукции, снижения брака при перенастройке линии на другой тип пленки, производительность, экономии дорогостоящего сырья, уменьшения временных и финансовых затрат на проведение натурных экспериментов при освоении производства пленок новых рецептур.

Список литературы

- Басов Н. И., Казанков Ю. В. Литьеовое формование полимеров. — М.: Химия, 1984. — 248 с.
- Ведь Г. И., Сенатос В. А., Петухов А. Д. Определение напряжений при формовании рукавной пленки // Химическая технология. — 1979. — № 4. — С. 34–37.
- Воскресенский А. М., Ищенко М. А. Компьютерные модели свойств и переработки полимерных композиций. — СПб.: СПбГТИ (ТУ), 2008. — 66 с.
- Воскресенский А. М., Кучинская Е. А. Переработка полимерных материалов в червячных машинах. Методы технологических расчетов. — СПб.: СПбГТИ (ТУ), 2000. — 58 с.
- Воскресенский А. М., Сыкалов Г. В. Метод итераций вязкости в теории переработки полимеров. — СПб.: Изд-во СПбГТИ(ТУ), 2013. — 116 с.
- Лукач Ю. Е., Петухов А. Д., Сенатос В. А. Оборудование для производства полимерных пленок. — М.: Машиностроение, 1981. — 224 с.
- Полосин А. Н. Моделирование и оптимизация процессов смешения термопластичных материалов в одношнековых экструдерах // Информационные технологии моделирования и управления. — 2009. — № 2. — С. 297–305.
- Полосин А. Н., Плоский В. Ю. Расчет термической деструкции полимерного материала в осциллирующем экструдере // Информационные технологии в науке, проектировании и производстве: материалы V Всерос. науч.-техн. конф. Н. Новгород: Межрегион. верхневолж. отд-ние Акад. техн. наук РФ, 2002. — С. 13–14.
- Полосин А. Н. Технология моделирования неизотермического течения расплавов полимеров в одношнековых экструдерах на базе теории плоских потоков // Информационные технологии моделирования и управления. — 2007. — № 3. — С. 376–386.
- Полосин А. Н., Чистякова Т. Б. Математическая модель одношнековой экструзии для управления качеством пластика в многоассортиментных производствах полимерных пленок // Системы управления и информационные технологии. — 2009. — № 2. — С. 87–92.
- Полосин А. Н., Чистякова Т. Б., Блинов И. Г. Библиотека математических моделей для исследования и перенастройки процессов получения рукавных пленок // Математические методы

- в технике и технологиях — ММТТ-25: сб. тр. XXV Междунар. науч. конф. Саратов: СГТУ им. Гагарина Ю. А., 2012. — С. 9–14.
- Программный комплекс для моделирования и оптимизации одношнековых экструзионных процессов в многоассортиментных производствах пленочных и гранулированных полимерных материалов:* свидетельство о гос. рег. программы для ЭВМ № 201061423 (30.06.2010) / Чистякова Т. Б., Полосин А. Н., Григорьев О. Е. // Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных микросхем: офиц. бюл. Федер. службы по интелект. собственности, пат. и товар. знакам. — М.: ФИПС, 2010. — Вып. 3. — С. 447.
- Раувендааль К.* Экструзия полимеров. — СПб.: Профессия, 2008. — 768 с.
- Тадмор З., Гогос К.* Теоретические основы переработки полимеров. — М.: Химия, 1984. — 632 с.
- Тарасик В. П.* Математическое моделирование технических систем. 2-е изд., испр. и доп. — Мн.: ДизайнПРО, 2004. — 640 с.
- Торнер Р. В.* Основные процессы переработки полимеров (теория и методы расчета). — М.: Химия, 1972. — 456 с.
- Торнер Р. В.* Теоретические основы переработки полимеров (механика процессов). — М.: Химия, 1977. — 464 с.
- 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. — № 4. — С. 170–180.
- Чистякова Т. Б., Полосин А. Н., Блинов И. Г.* Программный комплекс для моделирования процесса раздувной экструзии полимерных материалов при изготовлении высокотехнологичных пленок // Высокие технологии в производстве и переработке полимерных материалов: сб. тр. VI Междунар. науч.-техн. конф. СПб.: СПбГИ(ТУ), 2012. — С. 52–65.