

Математические модели процессов экструзии для управления многоассортиментными производствами полимерных пленок

А. Н. Полосин

Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)
polosin-1976@mail.ru

Аннотация. Разработана библиотека перенастраиваемых математических моделей процессов экструзии, позволяющих решать задачи управления многоассортиментными производствами плоских и рукавных полимерных пленок. Модели описывают плавление полимеров, перемешивание, нагрев и формование расплавов, строятся на основе законов сохранения и реологии, позволяют рассчитать производительность, энергопотребление процесса и показатели качества экструдата, от которых зависят потребительские характеристики пленки. Создан программный комплекс, настраиваемый на тип пленки, метод ее производства, тип и конфигурацию экструдера. Он позволяет осуществить структурно-параметрический синтез модели для поиска конфигурации и управляющих воздействий на экструдер, обеспечивающих требуемые характеристики пленки при выполнении ограничений на производительность и энергопотребление линии. Тестирование комплекса по данным производств поливинилхлоридных и полиэтиленовых пленок на заводах в России и Германии подтвердило его работоспособность.

Ключевые слова: математическое моделирование; численные методы; программный комплекс; управление; многоассортиментное производство; процессы экструзии; полимерные пленки

I. ВВЕДЕНИЕ

Основными способами промышленного производства высокотехнологичных полимерных пленок (ПП), применяемых для упаковки лекарственных средств и продуктов питания, являются экструзия (плоскощелевая, раздувная) и каландрование. Высокая потребность в упаковочных материалах и многообразие типов упаковываемой продукции определяют крупнотоннажный и многоассортиментный характер экструзионных и каландровых производств ПП. Так, только одна из ведущих международных корпораций по производству ПП Klöckner Pentaplast ежегодно выпускает 250 тыс. тонн ПП на 35 экструзионных линиях и 400 тыс. тонн жестких ПП на основе поливинилхлорида (ПВХ) на 41 каландровой линии. Упаковочные ПП отличаются рецептурами (в частности, типами пленкообразующих полимеров, основными из которых являются ПВХ, полиэтилентерефталат, полипропилен, полиэтилены различной плотности), характеризуются большими

диапазонами толщины (от 0,02 до 1,65 мм) и ширины (до 6200 мм) полотна, жесткими требованиями к качеству (внешнему виду, цвету). Наименее приемлемыми для потребителей дефектами ПП являются черные точки, деструкционные полосы, включения нерасплавленного полимера, дефекты типа «рыбий глаз» (гелики) и «апельсиновая корка», отклонения цвета от эталона. Сложность управления производством ПП обусловлена большим числом параметров сырья, оборудования, технологического режима, качества продукции и множеством взаимосвязей между ними. Например, каландровое производство ПП характеризуется более чем 100 параметрами и 800 взаимосвязями [1].

Вне зависимости от способа производства ПП ключевой стадией является процесс экструзии, для реализации которого используются экструдеры различных типов, характеризующиеся аппаратной гибкостью (возможностью реализации различных конфигураций шнеков для изготовления многоассортиментных ПП). Экструзия включает последовательно протекающие в канале шнека/шнеков физические процессы: нагрев и плавление твердого полимера, нагрев, перемешивание и формование расплава. Целью является подготовка однородной пластичной массы (экструдата), из которой на следующих стадиях изготавливается ПП. Тепловое состояние, степень однородности и цветовые координаты (светлота, тон, насыщенность) экструдата в значительной мере определяют наиболее важные для потребителей показатели качества ПП: число черных точек, включений нерасплавленного полимера, геликов на 10 м² полотна, цветовые координаты. При экструзионных способах производства толщина ПП зависит от скорости выхода экструдата, то есть от производительности экструдера. В то же время на производстве осуществляется только визуальный контроль внешнего вида экструдата. Поэтому операторы принимают решения по управлению на основе субъективной оценки качества экструдата, собственного опыта, экспериментально подобранного регламента. В условиях многоассортиментного производства это сопровождается ошибками и приводит к экономическим потерям, вызванным повышением выхода бракованной ПП и израсходованными на ее получение ресурсами, увеличением времени перенастройки и, как следствие, уменьшением производительности и ростом энергопотребления.

Таким образом, актуальна разработка математических моделей (ММ) процессов экструзии, настраиваемых на тип ПП, метод ее производства, тип и конфигурацию экструдера, позволяющих рассчитывать характеристики качества экструдата, производительность и энергопотребление процесса и решать задачи ресурсо- и энергосберегающего управления многоассортиментными экструзионными и каландровыми производствами ПП.

II. ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА. ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ.

Формализованное описание производства ПП как объекта управления (ОУ) представлено на рис. 1. Тип T_{extrud} , диаметр D и длина L шнека применяемого экструдера определяются методом производства M_{prod} , типом пленкообразующего полимера T_{polym} и требованиями к производительности G_0 и энергопотреблению E^{max} линии.

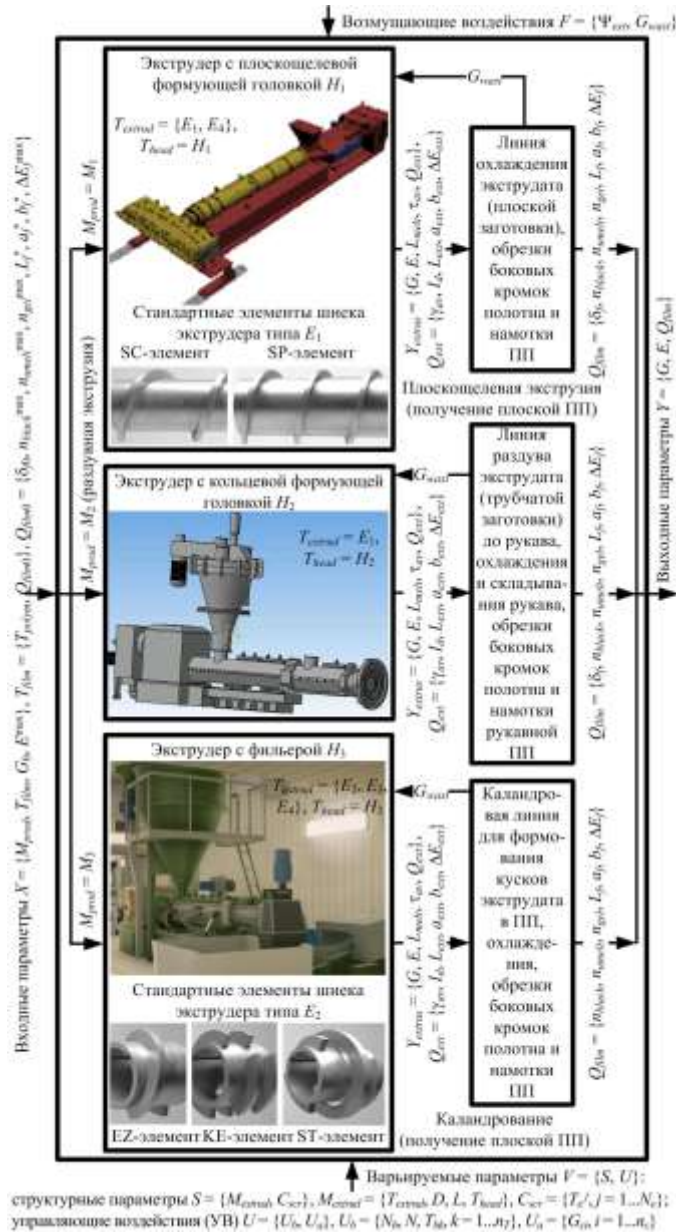


Рис. 1. Формализованное описание производства ПП как ОУ

Экструдеры отличаются числом шнеков q и характером их движения: E_1 – одношнековые экструдеры (шнек только вращается с частотой N), E_2 – осциллирующие экструдеры (шнек вращается и совершает возвратно-поступательное движение с амплитудой S_0), двухшнековые экструдеры с односторонним (E_3) и встречным (E_4) вращением шнеков. Конфигурация шнека C_{scr} составляется из N_e элементов различных типов T_e^j . Набор типов элементов определяется типом экструдера. Так, шнеки экструдеров типа E_1 , как правило, набираются из элементов с непрерывной нарезкой и цилиндрическим (SC) или коническим (SP) сердечником (SP-элементы используются в зоне плавления). Для экструдеров типа E_2 характерны транспортные (EZ), смесительные (KE) элементы и элементы с ограничительным кольцом (ST, используются в зоне дегазации). Экструдер комплектуется с формирующей головкой типа T_{head} , зависящего от метода производства M_{prod} . Аппаратная гибкость позволяет осуществлять не только параметрическое управление экструдером (путем изменения режима экструзии), но и структурное управление (путем изменения конфигурации шнека/шнеков C_{scr} при перенастройке производства на новый тип ПП T_{film} , определяемый типом полимера T_{polym} и требованиями к показателям качества Q_{film}). Режим экструзии изменяется с помощью основных УВ U_b : частот вращения загрузочного N_h и основного N шнека/шнеков, температур тепловых зон корпуса T_{bk} , $k = 1 \dots n_T$. От режима экструзии зависят выходные параметры Y_{extrud} : производительность G и энергопотребление E экструдера, определяющие соответствующие характеристики линии, длина зоны плавления (ДЗП) L_{melt} , среднее время пребывания полимера (СВП) в экструдере τ_{av} и такие характеристики качества экструдата Q_{ext} , как средняя степень смешения γ_{av} и индекс термодеструкции I_d . От производительности зависит толщина пленки δ_f (если $M_{prod} = M_1 \vee M_2$). Превышение ДЗП предельно допустимой ДЗП L_{melt}^{max} , зависящей от T_{extrud} и T_{polym} , свидетельствует о наличии в ПП непроплавленных частиц n_{umelt} . Характеристики Q_{ext} определяют показатели качества ПП Q_{film} – число геликов n_{gel} и черных точек n_{black} . При производстве цветных ПП подача в экструдер потока возвратных отходов (раздробленных боковых кромок ПП) с расходом G_{wast} и колебания запаса экструдата Ψ_{ext} в питающем зазоре каландра приводят к отклонению цветовых координат ПП L_f, a_f, b_f от эталонных значений L_f^*, a_f^*, b_f^* вследствие отклонения цветовых координат экструдата $L_{ext}, a_{ext}, b_{ext}$. Цветовое отклонение ΔE_f превышает предельное значение ΔE_f^{max} , что требует коррекции дополнительных УВ U_a : расходов жидких красителей, подаваемых в экструдер, $G_{ci}, i = 1 \dots n_c$.

Проведенный анализ ОУ позволил сформулировать задачи управления производством ПП при перенастройке линии и в режиме изготовления продукции. Задача управления при перенастройке линии, реализующей метод производства M_{prod} , на новое задание $Y_0 = \{T_{film}, G_0, E^{max}\}$ заключается в выборе марки экструдера M_{extrud} , формировании конфигурации его шнека/шнеков C_{scr} и допустимых значений основных УВ $U_b^* \in [U_b^{min}; U_b^{max}]$,

которые обеспечивают выполнение требований к качеству экструдата $\gamma_{av} \geq \gamma^{\min}$, $I_d \leq I_d^{\max}$ и ДЗП $L_{melt} \leq L_{melt}^{\max}$, гарантирующих соблюдение ограничений на число дефектов ПП ($n_{gel} \leq n_{gel}^{\max}$, $n_{black} \leq n_{black}^{\max}$, $n_{umelt} \leq n_{umelt}^{\max}$), при условии выполнения требований к характеристикам линии $G \geq G_0$, $E \leq E^{\max}$. Здесь γ^{\min} , I_d^{\max} – предельные значения характеристик качества экструдата, зависящие от требований к числу соответствующих дефектов ПП. Постановки задач управления в режиме изготовления продукции (в условиях действия возмущений G_{wast} и Ψ_{ext}), заключающиеся в определении расходов G_{ci}^* , $i = 1 \dots n_c$, обеспечивающих выполнение ограничения на цветовое отклонение экструдата ΔE_{ext} , приведены в работе [2]. Вследствие неполноты информации о параметрах состояния процесса экструзии и характеристиках качества экструдата, получаемой с ОУ, решение задач управления многоассортиментными производствами ПП базируется на использовании ММ, позволяющих дать комплексную оценку качества экструдата, производительности и энергопотребления экструдера в зависимости от УВ.

III. БИБЛИОТЕКА МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕССОВ ЭКСТРУЗИИ

Для учета многообразия типов и аппаратной гибкости экструдеров, множества типов полимеров, сложной картины движения, плавления, теплообмена в канале шнека/шнеков предложен комплексный метод моделирования. Он базируется на библиотеке ММ процессов экструзии, правилах и алгоритме структурно-параметрического синтеза модели для управления. Анализ описанных в литературе ММ процессов экструзии в агрегатах различных типов, построенных как на основе законов сохранения и реологии [3, 4], так и с применением типовых гидродинамических моделей [5, 6], позволил разработать библиотеку ММ. Она включает:

базовые ММ, описывающие движение, плавление и перемешивание полимера в канале элемента шнека и позволяющие рассчитать поля скоростей потоков v_x^j , v_z^j и скоростей деформаций сдвига $\dot{\gamma}_{xy}^j$, $\dot{\gamma}_{zx}^j$, $\dot{\gamma}_{zy}^j$ расплава, давления P^j и температуры T^j фаз полимера;

ММ течения расплава в зазорах различных типов (радиальном, боковом, межвалковом) и прорезях в нарезке элементов для расчета расходов утечек Q_δ^j , Q_s^j , Q_r^j , Q_c^j ;

ММ для расчета вязкости расплава η^j ;

ММ для расчета плотностей тепловых потоков при теплообмене полимера с корпусом q_{bk}^j и шнеком q_{scr}^j ;

ММ течения расплава в экструзионных головках различных типов для расчета перепада давления расплава;

типовые гидродинамические модели (ТГМ), описывающие структуру потоков в каналах секций шнека различных типов (в зависимости от типов элементов);

ММ для расчета характеристик качества экструдата Q_{ext} .

Структура базовой ММ, описывающей сдвиговое течение в канале j -го элемента шнека, имеет вид:

$$\int_0^{H^j} v_x^j dy = \dot{Q}_\delta^j + \dot{Q}_c^j, \quad (1)$$

$$z_f^j \left[(2-q)W^j \int_0^{H^j} v_z^j dy + (q-1) \int_0^{W^j} \int_0^{H^j} v_z^j dy dx \right] = (2-q)Q^j - (q-1)(2Q_s^j + Q_r^j), \quad (2)$$

$$Q^j = q^{-1}Q + (Q_\delta^j + Q_c^j) + (q-1)(2Q_s^j + Q_r^j), \quad (3)$$

$$\frac{\partial P^j}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y}(\eta^j \dot{\gamma}_{xy}^j), \quad \frac{\partial P^j}{\partial z} = (q-1) \frac{\partial}{\partial x}(\eta^j \dot{\gamma}_{zx}^j) + \frac{\partial}{\partial y}(\eta^j \dot{\gamma}_{zy}^j), \quad (4)$$

$$\rho c_p v_z^j \frac{\partial T^j}{\partial z} = \lambda \frac{\partial^2 T^j}{\partial y^2} + \eta^j \left[(\dot{\gamma}_{xy}^j)^2 + (q-1)(\dot{\gamma}_{zx}^j)^2 + (\dot{\gamma}_{zy}^j)^2 \right]; \quad (5)$$

$$P^j \Big|_{z=z^{j-1}} = P_{out}^{j-1}, \quad T^j \Big|_{z=z^{j-1}} = T_{out}^{j-1}, \quad (6)$$

$$v_x^j \Big|_{y=0} = 0, \quad v_x^j \Big|_{y=H^j} = \varphi_1(q, D, N, S_0, \Phi_{osc}), \quad (7)$$

$$v_z^j \Big|_{x=0} = v_z^j \Big|_{x=W^j} = v_z^j \Big|_{y=0} = \varphi_2(q, D, N), \quad (8)$$

$$v_z^j \Big|_{y=H^j} = \varphi_3(q, D, N, S_0, \Phi_{osc}), \quad (9)$$

$$-\lambda \partial T^j / \partial y \Big|_{y=0} = q_{scr}^j(T_{scr}, T^j), \quad -\lambda \partial T^j / \partial y \Big|_{y=H^j} = q_{bk}^j(T_{bk}, T^j), \quad (10)$$

где x, y, z – координаты по ширине W^j , глубине H^j и длине канала, м; z_f^j – число заходов нарезки; Q^j – расход потока через элемент, м³/с; Q – расход потока через экструдер с головкой (соответствует производительности), м³/с; ρ, c_p, λ – плотность (кг/м³), удельная теплоемкость (Дж/(кг·°C)), теплопроводность (Вт/(м·°C)) расплава; z^{j-1} – координата входа в канал, м; $P_{out}^{j-1}, T_{out}^{j-1}$ – давление (Па) и температура (°C) на выходе из канала $(j-1)$ -го элемента; Φ_{osc} – фаза осцилляции шнека в экструдере типа E_2 , рад; T_{scr} – температура шнека, °C.

В ходе синтеза ММ экструзии осуществляется компоновка ММ (1)–(10) с ММ для расчета расходов утечек, вязкости, плотностей внешних тепловых потоков, выбираемыми в зависимости от типов экструдера, элемента шнека, полимера, теплового режима экструзии. Применяемая реологическая модель расплава имеет вид:

$$\eta^j = \mu^j(T^j) \left[(\dot{\gamma}_{xy}^j)^2 + (q-1)(\dot{\gamma}_{zx}^j)^2 + (\dot{\gamma}_{zy}^j)^2 \right]^{(n-1)/2}, \quad (11)$$

где μ^j – коэффициент консистенции, учитывающий влияние объемной доли твердых частиц полимера в расплаве (при дисперсном плавлении) и температуры на вязкость, Па·с ^{n} ; n – индекс течения.

Зависимость коэффициента μ^j от доли твердых частиц описывается уравнением Марона–Пирса. Для описания его температурной зависимости применяются уравнения Вильямса–Лэндэла–Ферри и Рейнольдса (в зависимости от типа полимера и температурного диапазона процесса).

В соответствии с заданной конфигурацией шнека осуществляется компоновка сформированных ММ

движения, плавления и перемешивания полимера в каналах элементов шнека различных типов между собой, при этом обеспечивается выполнение условий сопряжения ММ, определяемых равенствами (6). Построенная ММ движения, плавления и перемешивания полимера в канале модульного шнека компонуется с ММ течения в головке, выбираемой в зависимости от типа головки. В результате формируется ММ для расчета параметров состояния фаз полимера ($v_x, v_z, \dot{\gamma}_{xy}, \dot{\gamma}_{zx}, \dot{\gamma}_{zy}, P, T, \eta$), ДЗП L_{melt} , производительности G и энергопотребления E экструдера.

Для оценки СВП τ_{av} , от которого зависят характеристики качества γ_{av} и I_d , синтезируется динамическая ММ (рис. 2), состоящая из ТГМ, охваченных рециклами, учитывающими утечки и осцилляцию [2, 5]. По ММ рассчитывается распределение выходной концентрации трассера C_{ind} во времени в зависимости от расходов потоков полимера Q_l и концентраций трассера C_l , $l = 1 \dots N_s$ (в примере $N_s = 7$) в секциях шнека и расходов рециркулирующих потоков Q_r при импульсном возмущении по составу входного потока C_0 . По С-кривой методом моментов вычисляется СВП τ_{av} .

На основе скоростей деформаций сдвига, температуры и СВП рассчитываются степень смещения γ_{av} (как средняя деформация сдвига, накопленная полимером) и индекс разрушения I_d (как отображение зависимости степени разрушения от времени при произвольном температурно-временном режиме в экструдере на зависимость, экспериментально полученную для данного типа полимера при изотермических условиях). Для оценки цветовых координат $L_{ext}, a_{ext}, b_{ext}$ используются регрессионные ММ, полученные путем обработки результатов активных производственных экспериментов, для расчета цветового отклонения ΔE_{ext} – модель CIE Lab.

Проверка адекватности ММ выполнена путем сравнения рассчитанных и измеренных значений температуры экструдата, ДЗП, производительности и СВП для экструдеров различных типов (E_1 – E_4) и конфигураций (C_{scr}), работающих с головками соответствующих типов (H_1 – H_3), при переработке ПВХ, полипропилена, полиэтилена низкой плотности (ПЭНП). Результаты обработки данных подтвердили адекватность ММ по среднеквадратическому отклонению и критерию Фишера.

Разработан гибкий программный комплекс (ПК), включающий модули выбора марки экструдера M_{extrud} (в зависимости от метода производства M_{prod} и параметров задания Y_0), формирования конфигурации шнека/шнеков C_{scr} экструдера, структурного синтеза и параметрической настройки ММ для расчета выходных параметров процесса экструзии Y_{extrus} (в сформированных регламентных диапазонах УВ) и визуализации результатов моделирования [7]. Информационное обеспечение ПК содержит банк данных (БнД) характеристик производств ПП, базы правил выбора марок экструдеров, размещения и компоновки 3D моделей элементов шнеков, синтеза ММ процесса экструзии.

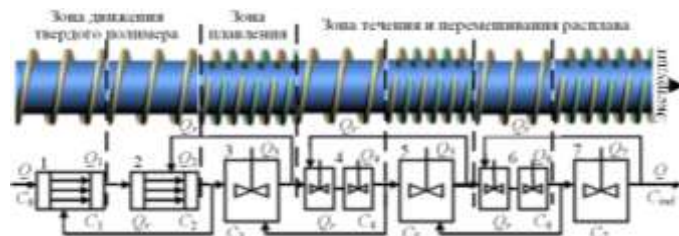


Рис. 2. Пример структурной схемы динамической ММ для оценки СВП

БнД включает базы данных методов производства ПП, геометрических параметров экструдеров, элементов шнеков и экструзионных головок, типов ПП и требований к качеству экструдата и ПП, параметров свойств пленкообразующих полимеров, регламентных диапазонов УВ. Модуль визуализации позволяет представить результаты в виде 3D моделей шнеков сформированных конфигураций, 3D графиков распределений параметров состояния фаз полимера по каналу шнека, 3D графиков зависимостей характеристик качества экструдата, производительности и энергопотребления экструдера от УВ. ПК позволяет для заданного метода производства, типа ПП, требований к производительности и энергопотреблению линии выбрать марку экструдера и на основе синтезированной ММ процесса экструзии определить конфигурацию шнека/шнеков и УВ на экструдер, которые обеспечивают заданные характеристики качества экструдата (что гарантирует заданные потребительские характеристики ПП) при выполнении требований к характеристикам линии.

Тестирование ПК, выполненное по данным каландровых производств плоских ПП на основе ПВХ и экструзионных производств рукавных ПП на основе ПЭНП на заводах в России и Германии, подтвердило его работоспособность при решении задач управления многоассортиментными производствами ПП в режимах перенастройки и изготовления продукции. Применение ПК позволяет обеспечить заданное качество экструдата, а значит и качество ПП, уменьшить энергоемкость процесса экструзии, снизить время перенастройки линии за счет выбора рациональных значений УВ на экструдер, которые предотвращают нештатные ситуации, связанные с нарушением качества экструдата.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Колерт К., Штайнмайер С., Колерт М. Математические методы в переработке полимерных материалов // Математические методы в технике и технологиях : сб. тр. междунар. науч. конф. СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2017. Т. 8. С. 14–21.
- [2] Chistyakova T.B., Polosin A.N. Computer modeling system of industrial extruders with adjustable configuration for polymeric film quality control // Proc. of 2017 IEEE 2nd Intern. Conf. on Control in Technical Systems (CTS'2017). St. Petersburg : St. Petersburg Electrotechn. Univ. «LETI», 2017. Pp. 47–50.
- [3] Multipurpose computer model for screw processing of plastics / K. Wilczyński, A. Nastaj, A. Lewandowski, K. J. Wilczyński // Polymer-Plastics Technology and Engineering. 2012. Vol. 51, № 6. Pp. 626–633.
- [4] Lyu M.Y., White J.L. Simulation of non-isothermal flow in a modular Buss kneader and comparison with experiment // International Polymer Processing. 1997. Vol. 12, № 2. Pp. 104–109.

- [5] Hoppe S., Detrez C., Pla F. Modeling of a cokneader for the manufacturing of composite materials having absorbent properties at ultra-high-frequency waves. Part 1 // Polymer Engineering and Science. 2002. Vol. 42, № 4. Pp. 771-780.
- [6] Monchatre B., Raveyre C., Carrot C. Residence time distributions in a co-kneader: a chemical engineering approach // Polymer Engineering and Science. 2015. Vol. 55, № 6. DOI: 10.1002/pen.24061.
- [7] Joint innovative IT projects in the field of production of polymeric sheet materials / T.B. Chistyakova, A.S. Razygrayev, A.N. Polosin, A.M. Araztaganova // 2016 IEEE 5th Forum «Strategic Partnership of Universities and Enterprises of Hi-Tech Branches» (Science. Education. Innovations). St. Petersburg : St. Petersburg Electrotechn. Univ. «LETI», 2016. Pp. 61-64.