

Компьютерная система обработки промышленной информации для управления производством многоассортиментных полимерных пленок

Т. Б. Чистякова¹, А. Н. Полосин², М. А. Тетерин³

Санкт-Петербургский государственный
технологический институт (технический университет)

¹chistb@mail.ru, ²polosin-1976@mail.ru,

³michail.teterin.92@gmail.com

Ф. Кляйнерт

Klöckner Pentaplast Europe GmbH & Co. KG
frank.kleinert@kpfilms.com

Аннотация. Предложена настраиваемая на характеристики многоассортиментного производства полимерных пленок компьютерная система, позволяющая осуществлять обработку производственных данных больших объемов и экспертных знаний для формирования советов операторам по выбору управляющих воздействий на основных стадиях производства, обеспечивающих заданное качество пленки в регламентном режиме и ввод показателей качества в регламентные ограничения при возникновении брака пленки. Система включает модуль интеграции производственных данных, получаемых из различных источников, банк данных и знаний о характеристиках производства, библиотеку методов интеллектуального анализа для сжатия, кластеризации многомерных данных и прогнозирования потребительских характеристик пленки, математические модели для вычисления показателей качества полупродуктов (экструдата) и продукции (пленки), которые не контролируются на производстве. Интерфейсы управленческого производственного персонала служат для визуализации трендов параметров производства, 3D графиков зависимостей показателей качества от управляющих воздействий, областей показателей качества, советов по управлению. Система протестирована по данным производств фармацевтических и пищевых упаковочных жестких полимерных пленок на экструзионно-каландровых линиях заводов в России и Германии. Результаты подтвердили работоспособность и эффективность применения системы вследствие повышения оперативности принятия решений по управлению и обеспечения ресурсосбережения в производстве за счет повышения качества пленки и снижения невозвратных отходов.

Ключевые слова: компьютерная система; обработка промышленной информации; данные больших объемов; экспертные знания; методы интеллектуального анализа данных; математические модели; управление качеством продукции; производство полимерных пленок

I. ВВЕДЕНИЕ

Жесткие пленки на основе поливинилхлорида (ПВХ), полипропилена, полиэтилентерефталата, отличающиеся высокой стойкостью к ударным нагрузкам, низкой газо- и паропроницаемостью, способностью к термоформованию, экологической безопасностью и приемлемой ценой,

широко (более 60 %) применяются в фармацевтической и пищевой промышленности как упаковочные материалы. Производства жестких полимерных пленок (ПП) являются непрерывными крупнотоннажными энергоемкими многоассортиментными химико-технологическими системами (ХТС) с рециклами, обеспечивающими возврат отходов (раздробленных кромок ПП) на повторную переработку с целью ресурсосбережения. ХТС работают в режимах частых перенастроек на выпуск новых типов ПП (в среднем 30 раз в месяц) и характеризуются множеством параметров сырья, оборудования, процесса, продукции (более 100) и сложных взаимосвязей между ними (около 800), большими объемами контролируемых данных (15,8 млн. значений параметров производства за месяц), получаемых из различных источников данных. В то же время имеет место неполнота информации о состоянии ХТС вследствие ограниченных возможностей автоматического контроля на производстве ряда показателей качества полупродуктов и целевой продукции. Вне зависимости от реализуемого метода производства (каландрование, плоскощелевая экструзия) основным полупродуктом, материальная однородность и тепловое состояние которого определяют качество поверхности ПП (наличие дефектов, цвет), является экструдат (смесь пленкообразующего полимера с добавками в вязкотекучем состоянии). Субъективная визуальная оценка оператором внешнего вида экструдата и частое отсутствие данных о таких важных потребительских характеристиках (ПХ) ПП, как разнотолщинность, цветовые координаты, степень продольной и поперечной усадки, приводят к необходимости принятия управленческих решений, основанных только на производственном опыте оператора. В условиях производства с возвратными отходами, характеристики которых (например, цвет) отличаются от характеристик выпускаемой ПП, это вызывает рост брака ПП (невозвратных отходов), снижение производительности ХТС, повышение ее ресурсо- и энергоемкости. Особенностью производства ПП является наличие множества возможных нештатных ситуаций (НС), описывающих различные виды брака экструдата и ПП, и множества причин их возникновения. Экспертные знания (ЭЗ) о НС аккумулируются в технологическом регламенте производства и инструкциях по управлению производством при возникновении брака.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 21-79-30029

Для целенаправленного управления производством ПП необходимо формировать и обрабатывать полные данные о состоянии ХТС. Это предполагает применение методов математического моделирования для вычисления показателей качества экструдата и ПХ ПП [1] и методов интеллектуального анализа для сжатия, кластеризации производственных данных (ПД) и прогнозирования показателей эффективности производства [2, 3]. Поэтому актуальна разработка гибкой компьютерной системы (КС), которая позволяет осуществлять обработку массивов ПД больших объемов, включающих как измеренные, так и вычисленные по математическим моделям (ММ) значения параметров, и ЭЗ, формализуемых в виде базы знаний (БЗ), с целью формирования советов операторам по управлению производством в регламентном режиме и при НС. Создание КС обеспечивает цифровизацию основной стадии жизненного цикла упаковочных ПП – изготовления ПП с рециклингом отходов, способствуя расширению ассортимента и улучшению ПХ ПП, снижению ресурсо- и энергоемкости ХТС, а значит, повышению рентабельности и конкурентоспособности производства на рынке.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВОМ

Системный анализ производств ПП различных типов T_{film} , реализующих разные методы изготовления ПП M_{prod} , позволил выделить их основные стадии ($s = 1$ – подготовка экструдата, $s = 2$ – формование экструдата в ПП, $s = 3$ – фиксация структуры ПП путем охлаждения). Аппаратурно-технологическое оформление стадий отличается гибкостью (переменностью конфигураций агрегатов – экструдеров, формирующих головок, каландров, вытяжных и охлаждающих устройств), необходимой для переработки широкого ассортимента полимеров.

На основе системного анализа составлено информационное описание производства ПП как объекта управления (рис. 1). На рис. 1 приняты следующие обозначения: X, U, F, Y – векторы входных параметров, управляющих и возмущающих воздействий, выходных параметров; C_{line} – конфигурация производственной линии (ПЛ); R_{film}, Q_{film}^0 – рецептура и требования к качеству ПП; $CEQs, \Gamma_{EQs}$ – конфигурация и геометрические параметры агрегата s -й стадии; N_h, N, T_{bk}, G_{ci} – частоты вращения шнеков воронки и экструдера, температура k -й тепловой зоны экструдера, расход i -го красителя, подаваемого в экструдер; $V_{cl}, T_{cl}, V_{tp}, T_{tp}, V_{clq}, T_{clq}$ – окружная скорость и температура l -го вала каландра, p -го съемно-вытяжного и q -го охлаждающего вала; $\tau_m^{left}, \tau_m^{right}$ – время работы двигателей, перемещающих внешний калибрующий валок (КВ) каландра (для управления толщиной ПП [4]); x, r_s – пространственный перекося внутреннего КВ (для управления разнотолщинностью ПП [4]); Ψ_{ext} – запас экструдата в питающем зазоре каландра; T_{air} – температура воздуха в цехе; $Y_1^{mes} = \{L_{ext}, a_{ext}, b_{ext}\}, Y_2^{mes} = \{\delta_f, n_{black}, n_{burn}, n_{gel}, n_{fiber}, n_{air}, n_{hol}, L_f, a_f, b_f\}, Y_3^{mes} = \{S_{fl}, S_{fc}\}$ – измеряемые выходные параметры стадий; $Y_1^{calc} = \{I_d, \gamma, \phi_s, L_{ext}^c, a_{ext}^c, b_{ext}^c, \Delta E_{ext}\}, Y_2^{calc} = \{\delta_f^c, D_\delta, L_f^c, a_f^c, b_f^c, \Delta E_f\}, Y_3^{calc} = \{S_{fl}^c, S_{fc}^c\}$ – выходные параметры, вычисляемые по ММ; $L_{ext}, a_{ext}, b_{ext}, L_f, a_f, b_f$ – координаты цвета экструдата и ПП; $n_{black}, n_{burn}, n_{gel}, n_{fiber}, n_{air}, n_{hol}$ – число дефектов различных типов (черных точек, желто-коричневых полос, нерасплавленных включений, волокон, воздушных пузырей, дырок) на заданной площади поверхности ПП; I_d, γ, ϕ_s – индекс термической деструкции, степень смешения и объемная доля твердого полимера в экструдате; $\Delta E_{ext}, \Delta E_f$ – отклонение цвета экструдата и ПП от эталона; D_δ – разнотолщинность ПП.

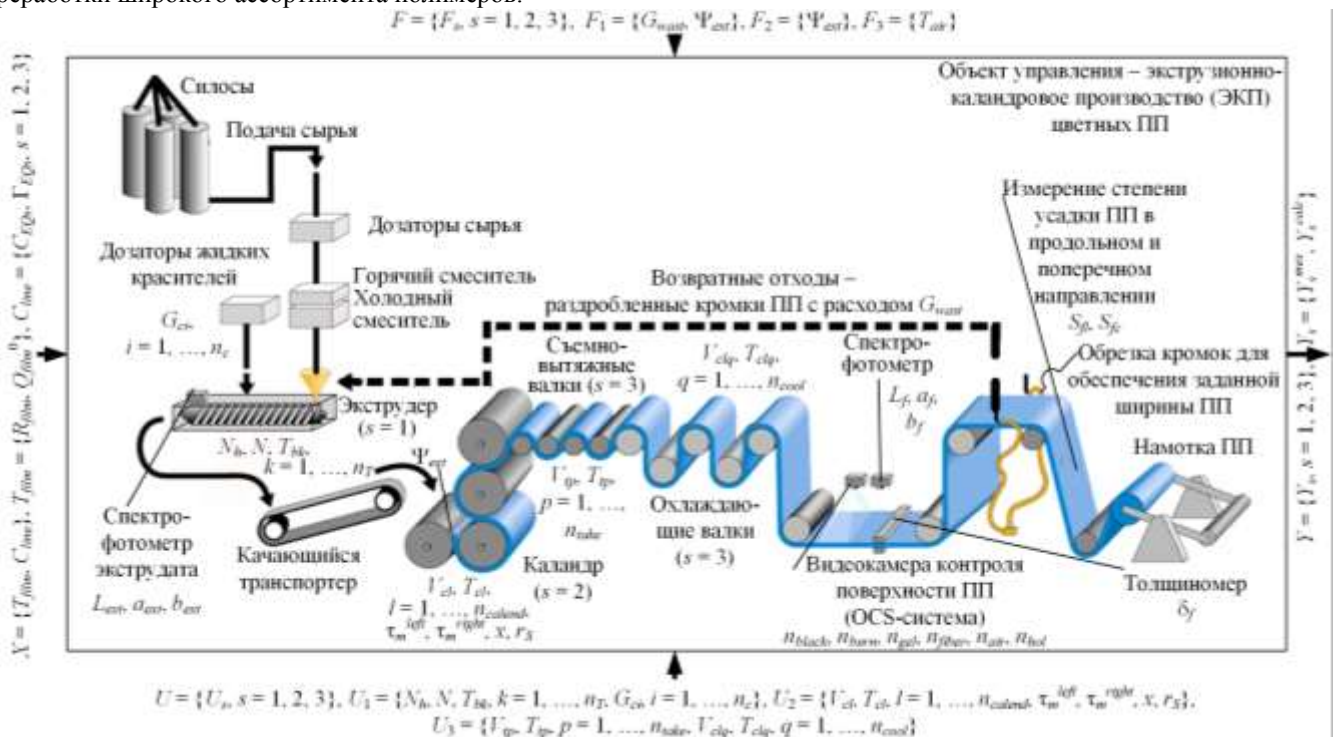


Рис. 1. Информационное описание производства ПП как объекта управления (на примере ЭКП ПП)

На основе информационного описания поставлены задачи управления (ЗУ) производством ПП, решаемые КС:

1) ЗУ в регламентном режиме: для заданного типа ПП T_{film} , метода ее производства M_{prod} и конфигурации ПЛ C_{line} на основе обработки ПД $\{U_s, Y_s^{mes}, Y_s^{calc}, s = 1, 2, 3\}$ с использованием методов интеллектуального анализа данных определить значения управляющих воздействий (УВ) $U_s \in [U_s^{min}; U_s^{max}]$, $s = 1, 2, 3$, которые в условиях возмущений F_s обеспечивают выполнение требований регламента к показателям качества экструдата и ПП $|Y_{s,g}^0 - Y_{s,g}| \leq \Delta_{s,g}^{max}$, $s = 1, 2, 3, g = 1, \dots, n_s$,

где U_s^{min} , U_s^{max} – регламентные ограничения на УВ; $Y_{s,g}^0$, $\Delta_{s,g}^{max}$ – заданное значение и предельное отклонение от него (или от порогового значения) для g -го выходного параметра; n_s – число выходных параметров на s -й стадии;

2) ЗУ в НС: для заданного типа ПП T_{film} , метода ее производства M_{prod} и конфигурации ПЛ C_{line} на основе анализа ЭЗ о НС St , описываемых отклонениями значений показателей качества экструдата и ПП за регламентные ограничения $Y_{s,a}^{min} - Y_{s,a} > \Delta_{s,a}^{max} \vee Y_{s,a} - Y_{s,a}^{max} > \Delta_{s,a}^{max}$, $s =$

$= 1, 2, 3, g = 1, \dots, n_s$, и причинах НС Rs , заключающихся в выходе технологических параметров процесса за регламентные ограничения, определить причину брака Rs^* и выдать оператору совет Rc , который содержит направление и величину изменения УВ U_s , чтобы ввести значения показателей качества экструдата и ПП в регламентные диапазоны $Y_{s,g}^{min} + \Delta_{s,g}^{max} \leq Y_{s,g} \leq Y_{s,g}^{max} - \Delta_{s,g}^{max}$, $s = 1, 2, 3, g = 1, \dots, n_s$,

где $Y_{s,g}^{min}$, $Y_{s,g}^{max}$ – пороговые регламентные значения g -го выходного параметра s -й стадии производства.

III. СТРУКТУРА И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КС

Структура КС обработки ПД и ЭЗ для решения ЗУ производством ПП показана на рис. 2. КС позволяет обрабатывать ПД больших объемов D_{prod} , получаемые из различных источников: система формирования заданий на изготовление ПП (BDE), SCADA-система, MES-система, система видеоконтроля поверхности ПП (OCS) и др.

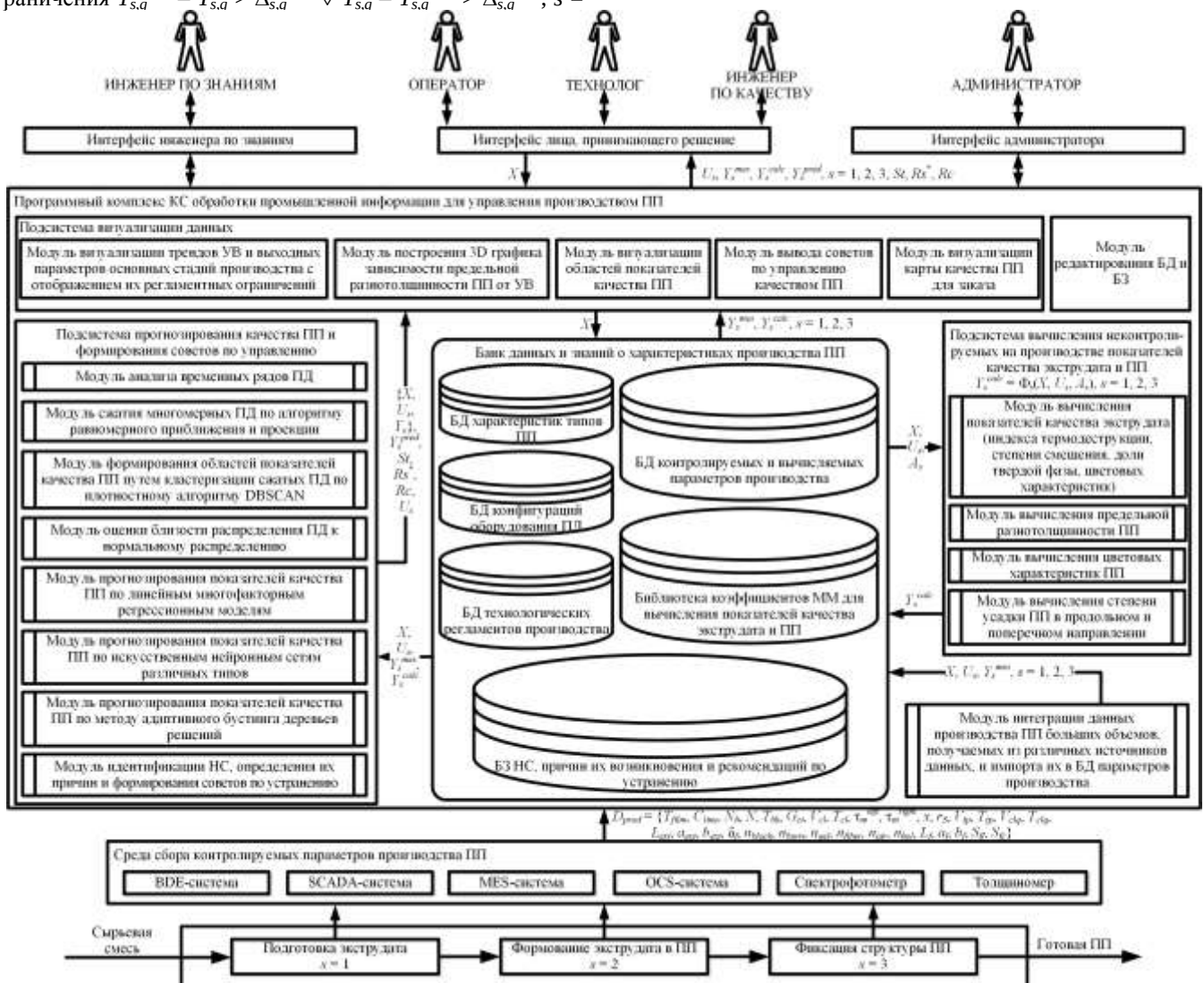


Рис. 2. Структура КС обработки промышленной информации для управления производством ПП

Программный комплекс КС включает модуль интеграции ПД, банк данных и знаний о характеристиках производства, детерминированные ММ для вычисления показателей качества экструдата и ПП, неконтролируемых на производстве, модули анализа, сжатия и кластеризации ПД, модули прогнозирования качества ПП на основе регрессионных ММ, методов машинного обучения (рис. 3), модуль выдачи рекомендаций по управлению при НС. Модуль интеграции позволяет сформировать единый массив контролируемых ПД $\{X, U_s, Y_s^{mes}\}$, структурированных по типам параметров производства, и импортировать этот массив в базу данных (БД) параметров производства. В этой БД сохраняются как контролируемые параметры $\{X, U_s, Y_s^{mes}\}$, так и вычисляемые параметры Y_s^{calc} . Это обеспечивает полноту данных об объекте, требуемую для их корректной обработки. ММ позволяют вычислить выходные параметры основных стадий Y_s^{calc} в зависимости от УВ U_s для разных типов ПП T_{film} и конфигураций ПЛ C_{line} . Настройка ММ на переменные характеристики объекта осуществляется означиванием коэффициентов A_s . Наименее приемлемые дефекты поверхности – черные точки, непроплавы, неравномерная окраска ПП – возникают, как правило, вследствие избыточного/недостаточного теплового и смесительного воздействия в экструдере. Чтобы предотвратить брак ПП, необходимо исключить брак экструдата. Автоматический контроль состояния экструдата на производстве не выполняется, поэтому КС вычисляет текущие значения показателей, характеризующих качество экструдата: $I_d = (\tau_{av}/\tau_d) \exp[E_d(T_{ext} - T_d)/(RT_{ext}T_d)]100$, $\gamma = \tau_{av}(d\gamma/dt)_{av}$, где τ_{av} – среднее время пребывания в экструдере, E_d , T_d , τ_d – энергия активации, абсолютная температура (АТ) и время деструкции, T_{ext} – АТ экструдата, R – газовая постоянная, $(d\gamma/dt)_{av}$ – средняя скорость деформации сдвига расплава в экструдере. Параметры T_{ext} , $(d\gamma/dt)_{av}$ и τ_{av} вычисляются по ММ экструзии, которые синтезируются из ММ движения и теплообмена в элементах экструдеров с учетом утечек и в соответствии с заданным типом и конфигурацией экструдера [1]. Для расчета цветовых отклонений экструдата и ПП применяется модель CIELab. Степень усадки ПП вычисляется по различным механическим моделям, позволяющим описать весь ассортимент ПП.

Массив измеренных и вычисленных значений параметров производства $\{X, U_s, Y_s\}$ в заданном интервале времени $[t_0; t_k]$ обрабатывается с использованием следующих методов. Метод анализа временных рядов применяется для оценки характеристик параметров (признаков временных рядов) – среднего значения, дисперсии, стандартного отклонения, коэффициента эксцесса и др. Уменьшение размерности ПД по алгоритму равномерного приближения и проекции и кластеризация сжатых ПД по плотностному алгоритму DBSCAN позволяют отобразить на плоскости области показателей качества ПП (качество, удовлетворяющее регламентным требованиям, или брак) [5]. Если в момент времени $t = t_k$ значение g -го выходного параметра $Y_{s,g}$ выходит за регламентные ограничения, КС идентифицирует НС, определяет ее истинную причину и формирует совет по устранению НС, используя БД параметров производства и БЗ НС, построенную по продукционно-фреймовой модели.

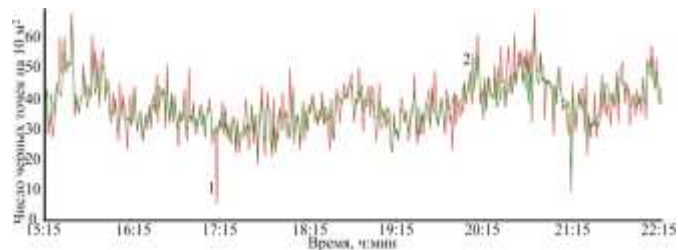


Рис. 3. Тренды измеренных и прогнозных значений числа черных точек

Для прогнозирования ПХ ПП применяются линейные многофакторные регрессионные ММ (если распределение ПД описывается законом Гаусса) и методы машинного обучения – искусственные нейронные сети (рекуррентная, с долгой краткосрочной памятью, сверточная, комбинированная), адаптивный композиционный усиленный метаалгоритм обучения (если распределение ПД отклоняется от нормального) [6, 7]. При этом массив ПД разбивается на три подвыборки: обучающую (для построения прогнозирующей ММ), оценочную и тестовую (для проверки адекватности построенной ММ).

Результаты тестирования КС по данным ЭКП жестких упаковочных ПВХ-пленок широкого ассортимента на российском и немецком заводах подтвердили адекватность разработанных ММ и работоспособность КС. На рис. 3 показаны тренды измеренных (1) и прогнозных (2, метод адаптивного бустинга деревьев) значений показателя n_{black} . Сравнение результатов показывает хорошее качество прогноза (погрешность не превышает 10 %).

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана перенастраиваемая КС, предназначенная для обработки данных и ЭЗ инновационных промышленных производств многоассортиментных ПП с использованием методов математического моделирования и искусственного интеллекта. Применение КС в качестве советчика операторов при управлении производством в регламентном режиме и в условиях брака ПП позволяет повысить качество ПП и снизить невозвратные отходы, что обеспечивает ресурсосбережение в производстве.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Polosin A.N., Chistyakova T.B. Mathematical modeling for resource and energy saving control of extruders in multi-assortment productions of polymeric films // J. Phys.: Conf. Ser. 2018. Vol. 1015, iss. 3. 032104.
- [2] Kohlert M., König A. Advanced polymeric film production data analysis and process optimization by clustering and classification methods // Front. Artif. Intell. Appl. 2012. Vol. 243. P. 1953-1961.
- [3] Data mining with big data / X. Wu, X. Zhu, G.-Q. Wu, W. Ding // IEEE Trans. Knowl. Data Eng. 2014. Vol. 26. № 1. P. 97-107.
- [4] ПО для управления толщиной каландрованных тонких материалов / Т.Б. Чистякова, С.И. Куликов, А.Н. Полосин, К. Колерт // Автоматизация в пром-сти. 2007. № 1. С. 8-11.
- [5] Chistyakova T.B., Kleinert F., Teterin M.A. Big data analysis in film production // Stud. Syst. Decis. Control. Vol. 259 / By ed. A.G. Kravets, A.A. Bolshakov, M.V. Shcherbakov. Cham: Springer, 2020. P. 229-236.
- [6] Bühlmann P., van de Geer S. Statistics for High-Dimensional Data: Methods, Theory, Applications. Berlin: Springer. 2011. 556 p.
- [7] Методы и модели исследования сложных систем и обработки больших данных / И.Ю. Парамонов, В.А. Смагин, Н.Е. Косых, А.Д. Хомоненко. СПб.: Лань, 2020. 236 с.