

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ КОНЦЕНТРАЦИИ КОМПОНЕНТОВ ПРЕПАРАЦИОННЫХ РАСТВОРОВ ДЛЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ПРЕПАРАЦИИ ПОЛИМЕРНЫХ ВОЛОКОН И ПЛЕНОК

И. В. Акиншева, Г. М. Айрапетьянц, С. В. Подолян

Могилёвский государственный университет продовольствия, Республика Беларусь

АННОТАЦИЯ

Введение. Управление процессом приготовления полимерных волокон и пленок на основе параметрического метода экономически наиболее целесообразно. Цель исследования – повышение качества управления процессом приготовления для обеспечения параметрической модернизации производства. Известные математические модели процессов приготовления, используемые для автоматизации управления, не позволяют обеспечить необходимый уровень его качества, т.к. не учитывают влияние всех значимых параметров процесса. Научная задача исследования – изучение влияния параметров приготовления на производительность технологических аппаратов с математическим описанием параметрической чувствительности концентрации компонентов препаративных растворов к изменению данных параметров.

Материалы и методы. Математическая модель процесса диффузии для определения концентрации диффундирующего вещества на поверхности пленки составлена на основе уравнения нестационарной диффузии. Выходной параметр модели – концентрация, входные параметры – скорость движения полиэфирных волокон и пленок в препаративной ванне, температура раствора, длина препаративной ванны. Границы варьирования параметров соответствуют требованиям производства.

Результаты. На основе математической модели разработан алгоритм расчета значимых параметров процесса приготовления в целях повышения качества управления процессом. Расчет параметрической чувствительности концентрации в полимере в зависимости от изменения технологических параметров показал, что наиболее значимым параметром является скорость движения полимера при вытяжке. Температура оказывает незначительное влияние на процесс диффузии, поэтому требует стабилизации на заданном технологическом уровне.

Выводы. Разработанный алгоритм позволяет параметрически управлять процессом приготовления полимерных пленок, обеспечивая адаптацию параметров системы автоматизации под рассчитанные значения для стабилизации максимальных отклонений температуры, а также регулирование скорости вытяжки с отклонением в 1 % от максимальной границы варьирования данного параметра при минимальном изменении производительности основных технологических аппаратов процесса до 5 %.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *полиэфирные волокна и пленки, подготовка, моделирование, алгоритм управления, диффузия, концентрация, стабилизация параметров.*

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Акиншева, И.В. Математическое описание чувствительности концентрации компонентов препаративных растворов для параметрического управления процессом приготовления полимерных волокон и пленок / И. В. Акиншева, Г. М. Айрапетьянц, С. В. Подолян // Вестник МГУП, 2019. – № 1 (26). – С. 130–139.

MATHEMATICAL MODELLING OF THE SENSITIVITY OF THE CONCENTRATION OF THE COMPONENTS OF THE PREPARATION SOLUTIONS FOR PARAMETRIC CONTROL OF THE PREPARATION PROCESS

I. V. Akinsheva, G. M. Ayrapet'yants, S. V. Podolyan

Mogilev State University of Food Technologies, Republic of Belarus

ABSTRACT

Introduction. The most efficient way to control the process of preparing polymer fibers and films is based on the parametric method. The purpose of the study is to improve the quality of the preparation process control to ensure parametric production modernization. Well-known mathematical models of the preparation processes used for automatic control do not provide adequate level of quality, because they don't take into

account the influence of all significant process parameters. The scientific task of the study is to investigate the influence of the preparation parameters on the productivity of the processing units and give mathematical formulation of the parametric sensitivity of the concentration of the components of the preparation solutions for the change in these parameters.

Materials and methods. A mathematical model of the diffusion process for determining the concentration of a diffusing substance on the film surface is based on the unsteady diffusion equation. The output parameter of the model is the concentration, the input parameters are speed of movement of the polyether fibers and films in the preparation bath, temperature of the solution, length of the preparation bath. The boundaries of variation of the parameters meet industrial demands.

Results. The algorithm for calculating the significant parameters of the preparation process in order to improve the quality of process control has been developed on the bases of the mathematical model. The calculation of the parametric sensitivity of the concentration in the polymer depending on the change in the process parameters showed that the speed of the polymer during drawing is the most significant parameter. Temperature has little effect on the diffusion process and therefore requires stabilization at a given technological level.

Conclusions. The developed algorithm allows us to control the polymer film preparation process parametrically, making it possible to adjust automation system parameters to the calculated values in order to stabilize the maximum temperature deviations, as well as to control drawing speed with a deviation of 1 % from the maximum limit of variation of this parameter with minimal change in the performance of main process units up to 5 %.

KEY WORDS: polyester fibers and films, preparation, modelling, control algorithm, diffusion, concentration, stabilization of parameters

FOR CITATION: Akinsheva I.V. Ayrapet'yants G. M., Podolyan S. V. Mathematical modelling of the sensitivity of the concentration of the components of the preparation solutions for parametric control of the preparation process. Bulletin of Mogilev State University of Food Technologies. 2019. No.1 (26). P. 130–139. (in Russian).

ВВЕДЕНИЕ

Процесс приготовления препаративных составов представляет собой последовательную смену состояний технологических операций во времени, определяемую входными и выходными переменными. Объектом исследования выбран как технологический процесс, так и способы управления процессом препарации. В оборудовании происходят различные химические процессы, поэтому изучению подвергаются и технологические параметры. Целью исследования является повышение качества управления процессом препарации полимерных волокон для обеспечения параметрической модернизации производства.

На мировом рынке в настоящий момент распространены универсальные аппараты для получения литевых изделий различной формы, используемые в мелкосерийном производстве [1], в данной же работе в качестве объекта управления рассматривается технологический процесс препарации, включаемый в состав крупных промышленных производств полимерных материалов.

Исследованием препаративных составов, предназначенных для улучшения характеристик полимеров активно занимаются как зарубежные, так и отечественные ученые. Одним из приоритетных направлений является разработка препаративных растворов для ускорения процессов разложения полимера [2, 3], другим – придание полимеру высоких прочностных характеристик [4]. В случае использования полиэфирных волокон и пленок при изготовлении изделий с длительным сроком хранения и требуемыми высокими прочностными характеристиками рассматриваются результаты второго направления исследований.

Препаративные составы применяются на стадии отделки сформированного полиэфирного жгута, волокон и пленок. Наносятся при производстве штапельного волокна и жгута в процессе прядения и вытяжки, с целью защиты поверхности волокна от повреждения, снятия электрического заряда, придания жгуту компактности и улучшения физико-механических показателей волокна, изменение коэффициента трения.

Задачи для анализа объекта исследования, как объекта автоматизации, следующие: выявить «узкие» места процесса, т.е. определить параметры, которые необходимо измерять,

контролировать, регулировать; установить объекты управления и блокировки в системе автоматизации технологического процесса препарации.

Производственные процессы крупных промышленных предприятий являются инерционными для модернизации. Поэтому стремятся проводить не аппаратную модернизацию, которая влечет большие затраты при смене оборудования, а параметрическую – путем разработки новых алгоритмов управления для построения систем автоматизации. Прежде чем внедрять системы автоматизации, необходимо детально изучить взаимосвязи между параметрами процесса. Для получения аналитических взаимосвязей используется математическая модель, включающая параметры процесса препарации. На основе результатов моделирования определяется степень влияния параметров процесса на качественные характеристики получаемых полимерных материалов, а также интенсификацию процесса препарации.

Цель исследования – повышение качества управления процессом препарации для обеспечения параметрической модернизации производства.

Предметом исследования является параметрическая чувствительность концентрации компонентов препаративных растворов к изменению параметров процесса препарации.

Известно, что определенную роль при формировании и отделки полиэфирных (ПЭ) волокон и нитей играют диффузионные процессы. Скорость диффузии препарации в волокне при термовытяжке предопределяет кинетику фазовых превращений, особенности надмолекулярной структуры и физико-механические свойства готовой продукции. Учеными проводится анализ диффузии и ее скорости в полимере, исследование зависимости коэффициента диффузии при неоднородной вязкости поверхностного слоя полимера [5, 6], а также рассматриваются различные методы пленочной диффузии [7]. Разработанные математические модели позволяют интенсифицировать процесс препарации путем анализа и изменения химического состава препаративных растворов, не затрагивая при этом технологические параметры.

При моделировании динамики проникновения диффундирующих растворов применяются методы динамического моделирования, дающие высокую точность моделирования при оценке модели на адекватность [8, 9].

Процесс диффузии при нанесении препаративных растворов описывается уравнением нестационарной диффузии:

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = D \frac{\partial^2 C}{\partial y^2}. \quad (1)$$

Здесь $C(y, \tau)$ – концентрация диффузионного вещества на расстоянии y от оси плёнки в момент времени τ , моль/м³.

Смысл времени определяется формулой

$$\tau = \frac{Z}{V}, \quad (2)$$

где Z – путь волокна в препаративной ванне, м;

V – скорость движения пленки, м/с

Существует два наиболее встречающихся в практике подхода к постановке краевой задачи для уравнения (1). В первой модели считают, что при $\tau > 0$ на поверхности плёнки $y = n$ поддерживается постоянная концентрация C_0 , а при $\tau = 0$ концентрация диффундирующего вещества равна его концентрации в препаративном растворе C_s , т.е.

$$\begin{aligned} C(y, \tau) &= C_0, \quad \tau > 0; \\ C(y, \tau) &= C_s, \quad \tau = 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Первая модель принимается в тех случаях, когда осуществляется принудительное перемешивание ПР, а также при формировании, когда на большом участке зоны формирования имеются конвективные поперечные потоки в непосредственной близости от пленки.

Во второй модели отказываются от предположения, что на поверхности пленки концен-

трация диффундирующего вещества постоянна.

На основании полученных в настоящем исследовании оптимальных гидродинамических условий формования ПЭ установлено, что в окрестностях пленки скорость продольной конвекции близка к скорости движения оболочки. Поэтому более приемлемой считается модель нестационарного диффузионного массообмена между пленкой и неподвижной относительно ее средой ПР. При этом, в начальный момент времени задаются однородные, но различные по величине концентрации диффундирующего вещества в пленке C_S и вне ее C_0 , а на большом удалении от пленки $y \rightarrow \infty$ концентрация рассматриваемого компонента остается постоянной

$$C(\infty, \tau) = C_0. \quad (4)$$

По этой модели идет формование, когда равновесные объемные концентрации диффундирующего вещества в пленке мало отличаются от объемных концентраций этих компонентов в ПР. Условие (4) выполняется при малых весовых долях полимера в прядильном растворе. По-видимому, при формовании ПЭ пленки, когда в прядильном растворе и формовочном наибольшая весовая доля приходится на воду, такое приближение удовлетворительно, особенно на начальных стадиях формования. Тепловыми эффектами при «застудевании» пренебрегаем, считая температуру волокна и препаративного раствора одинаковой и постоянной.

Математические модели диффузионных процессов, протекающие при формовании волокон и пленок из раствора полимера, получены в работах Серкова А.Т. и Кожевникова Ю.П. [10–12]. Данные модели основаны на решении уравнения нестационарной диффузии из неподвижной, относительно полимера, среды и, как показано в [13], при выполнении граничных условий достаточно точно описывают процессы, протекающие при формовании волокон. Однако они не позволяют аналитически определить влияние основных параметров процесса препарации на величину концентрации препаративных растворов в полимере.

Это дало возможность использовать уже имеющееся математическое описание [14] для решения научной задачи исследования, которая заключается в изучении влияния параметров препарации на производительность технологических аппаратов с математическим описанием параметрической чувствительности концентрации компонентов препаративных растворов к изменению данных параметров.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В основе моделирования процесса препарации лежало представление о нем как о процессе нестационарного диффузионного массообмена между пленкой и неподвижной относительно ее средой ПР. Свежесформированное волокно рассматривалось в виде неограниченной пластины, движущейся со скоростью, равной скорости движения ПР (препаративного раствора). Начало координат установлено в средней плоскости пластины (волокна). Ось OZ направлена вдоль движения, а ось OY – перпендикулярно пленке. В модели диффузией вдоль пленки пренебрегли, коэффициент диффузии считали постоянным.

$$\xi = \frac{y}{n}; \quad \tau = \frac{D \cdot Z}{n^2 \cdot V}, \quad (5)$$

$$\theta\left(\frac{y}{n}, \frac{D}{n^2}\right) = \frac{C_{\text{ш}} + C(y, \tau)}{C_{\text{ш}} + C_{\text{к}}}, \quad (6)$$

где $C_{\text{ш}}$ – концентрация компонента препарации ш, моль/м³;

$C_{\text{к}}$ – концентрация компонента препарации к, моль/м³.

После перехода к безразмерным величинам (5) и (6), уравнение (1) приняло следующий вид:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial \xi^2}. \quad (7)$$

Решение уравнения (7) должно удовлетворять следующим краевым условиям, вытекаю-

щим из диффузионной модели

$$\theta(\xi, 0) = \begin{cases} 0, & \text{если } \xi < 1; \\ 1, & \text{если } \xi > 1, \end{cases} \quad (8)$$

$$\theta(\infty, \tau) = 1, \quad (9)$$

$$\left. \frac{\partial \theta(\xi, \tau)}{\partial \xi} \right|_{\xi \rightarrow 0} = 1. \quad (10)$$

Условие (10) означает, что на оси пленки нет диффундирующего вещества. Согласно методу Фурье, частные решения уравнения (7) имеют вид

$$\theta(\xi, \tau) = \omega(\xi) \cdot T(\tau), \quad (11)$$

в этом случае получим два уравнения:

$$T'(\tau) + \lambda^2 \cdot T(\tau) = 0, \quad (12)$$

$$\omega''(\xi) + \lambda^2 \cdot \omega(\xi) = 0, \quad (13)$$

где $T(\tau)$ – температура плавления ПЭ пленки, °С;

λ – произвольный параметр;

$\omega(\xi)$ – вспомогательная функция.

Общее решение уравнения (13) имеет вид

$$\omega(\xi) = C_1 \cos \lambda(\xi) + C_2 \sin \lambda(\xi). \quad (14)$$

Так как при $\xi \rightarrow 0$, $\sin(\xi) \rightarrow 0$, то из (10) получаем, что $C_2 = 0$, а из того, что $\cos(\xi) = 1$ получаем выполнение (10) для любых значений C_1 . Таким образом, полученное выражение

$$\theta(\xi, \tau) = C_1 \cos \lambda(\xi) \cdot e^{-\lambda^2 \tau} \quad (15)$$

является решением уравнения (7), удовлетворяющим условию (10).

Тогда решением краевой задачи (7)–(10) является функция

$$\theta(\xi, \tau) = 1 - \frac{1}{2} \cdot \tau \cdot \cos\left(-\frac{\xi}{4 \cdot \tau}\right) \cdot \int_0^1 e^{-\frac{\lambda}{4 \cdot \tau}} \cdot \cos\left(-\frac{\xi \cdot \lambda}{2 \cdot \tau}\right) dt. \quad (16)$$

Второе слагаемое (13) представляет собой Р-функцию, таблица которой приведена в работе [15]. В случае $\xi = 0$ (т.е. по оси плёнки)

$$\theta(0, \tau) = e^{-\frac{1}{4 \cdot \tau}}, \quad (17)$$

а в случае $\xi = 1$ (т.е. на поверхности плёнки)

$$\theta(1, \tau) = \frac{1}{2} \cdot \left[e^{-\frac{1}{2 \cdot \tau}} \cdot \cos\left(\frac{1}{2 \cdot \tau}\right) \right]. \quad (18)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование параметрической чувствительности процесса нанесения препаративного раствора требует разработки алгоритма расчета значимых технологических параметров, влияющих на процесс. При разработке алгоритма руководствовались тем, что на производстве полиэфирных волокон сталкиваются с вопросом сохранения подобия условий их формования в случае изменения отдельных параметров процесса при переходе на выпуск волокон

другого ассортимента. В этом случае условия диффузии не изменяются, если концентрация ПР, толщина волокна, продолжительность пребывания его в ПР или коэффициент диффузии будут изменяться так, что безразмерные параметры θ и τ , входящие в уравнение (7), будут сохранены постоянными.

Завершенность диффузионного процесса при производстве полиэфирных волокон в исследовании характеризуется безразмерной величиной $\theta(\xi, \tau)$, принимаемой на оси пленки, т.е. при $\xi = 0$.

Пусть $\theta(0, \tau) = C_s$. Тогда из выражений (5), (6), (17) для второй модели протекания процесса имеем

$$C_k = (C_{щ} + C_s) \cdot e^{\frac{n^2 \cdot V}{4 \cdot D \cdot Z}} - C_{щ}. \quad (19)$$

Для нахождения оптимальных параметров и повышения эффективности управления процессом производства ПЭ волокна необходимо знать параметрическую чувствительность концентрации препаратов от изменения переменных параметров процесса.

Исследуем задачу определения значимых факторов процесса, входящих в уравнение (19). Будем считать переменные $V, C_{щ}, Z, T$, кроме одной, равными средним значениям, а одну, меняющейся от минимального до максимального значений, выяснять, какое изменение при этом претерпевает C_k . Толщина волокна в нашем случае постоянна и равна 32 мк.

Например, пусть меняется $C_{щ}$, тогда по теореме Лагранжа для

$$C_k = C_k(C_{щ}, V, Z, T)$$

имеем следующее выражение для нахождения приращения C_k при решении численным методом

$$\Delta C_{щ} C_k = C_k(C_{щ \max}, V_0, Z, T_0) - C_k(C_{щ \min}, V_0, Z, T_0) = \frac{\partial C_k}{\partial C_{щ}}(C_{щ \text{ ср}}, V_0, Z_0, T_0),$$

где $C_{щ \text{ ср}} = C_{щ \min} + \theta(C_{щ \max} - C_{щ \min})$.

Если $0 < \theta < 1$, то

$$|\Delta C_{щ} C_k| \leq C_{щ \max} \left(\frac{\partial C_k(C_{щ}, V_0, Z_0, T_0)}{\partial C_{щ}} \right) \Delta C_{щ}.$$

При разработке алгоритма расчета были использованы формулы (5), (6), (17), (19). Последовательность расчета следующая:

1. Вычисляются с использованием средних значений $C_k, C_s, C_{щ}, V, Z, T$.
2. Вычисляются значения частных производных C_k по $C_{щ}, V, Z, T$ по следующим формулам в границах соответствующих интервалов (т.к. производные монотонны по соответствующим аргументам):

$$(C_k)'_{C_{щ}} = e^{\frac{1}{4 \cdot \tau}} - 1, \quad (20)$$

$$(C_k)'_V = -\frac{(C_{щ} + C_s) \cdot n^2}{4 \cdot D \cdot Z} \cdot e^{-\frac{n^2 \cdot V}{4 \cdot D \cdot Z}}, \quad (21)$$

$$(C_k)'_T = \frac{(C_{щ} + C_s) \cdot D \cdot Z \cdot e^{-\frac{D \cdot Z}{4 \cdot \tau \cdot n^2 \cdot V}}}{4 \cdot n^2 \cdot V \cdot \tau^2} \cdot \left(-\frac{1}{T} \right), \quad (22)$$

$$(C_k)'_Z = -\frac{(C_{ш} + C_s) \cdot n^2}{4 \cdot D \cdot Z^2} \cdot e^{\frac{n^2 \cdot V}{4 \cdot D \cdot Z}} \quad (23)$$

3. Находятся максимальные и минимальные (по абсолютной величине) величины частных производных из каждой пары значений и умножаются на величину соответствующих интервалов изменения переменных.

4. Вычисляются относительные значения максимальных и минимальных приращений изменений параметров (по отношению к параметру, наиболее сильно влияющему на C_k).

Блок-схема алгоритма расчета представлена на рис. 1.

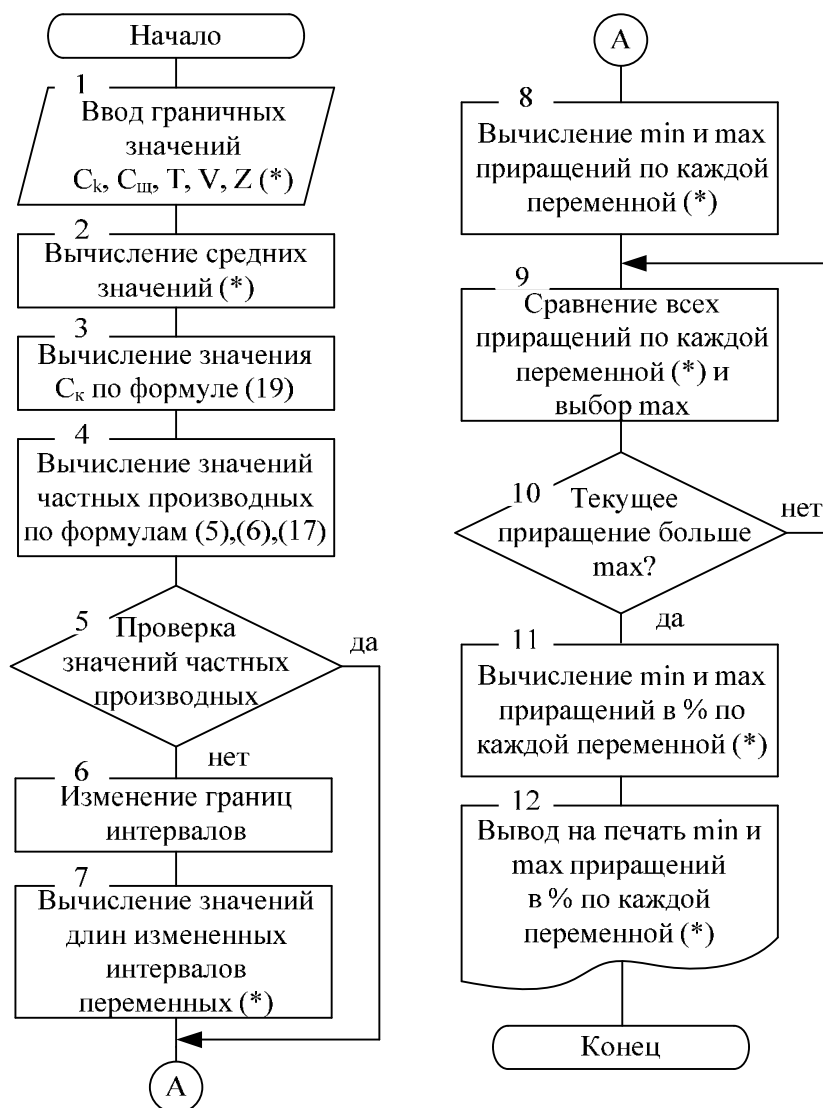


Рис. 1. Блок-схема алгоритма расчета значимых параметров в препаративном растворе

Fig. 1. Flow chart of the algorithm for calculating significant parameters in the preparation solution

Описание работы блоков алгоритма расчета значимых параметров в ПР:

Блок 1. Ввод граничных значений изменения C_k , $C_{ш}$, V , T , Z при постоянных значениях D .

Блок 2. Вычисление средних значений переменных.

Блок 3. Вычисление значения C_k по формуле (19) при средних значениях C_s , $C_{ш}$, V , T , Z .

Блок 4. Вычисление значений частных производных по переменным при граничных значениях соответствующих переменных.

Блок 5. Проверка: больше ли значение производной в правом конце интервала изменения соответствующей переменной, чем в левом. Если нет, то на блок 6.

Блок 6. Обмен значений производной в правом и левом конце интервала изменения переменной.

Блок 7. Вычисление значений длин интервалов изменения переменных $C_{\text{ш}}$, V , T , Z .

Блок 8. Вычисление максимальных и минимальных приращений по каждой переменной.

Блок 9, 10. Нахождение наибольшего из максимальных приращений по всем переменным.

Блок 11. Вычисление максимальных приращений в % относительно наибольшего из них и минимальных приращений в % относительно минимального приращения по соответствующей переменной.

Блок 12. Вывод на печать значений исходных величин, значений минимальных и максимальных приращений и их соответствующих значений в %.

При использовании разработанного алгоритма, осуществлен расчет приращений значимых для процесса препарации технологических параметров. Были выбраны следующие границы изменений параметров процесса, соответствующие требованиям производства:

$$C_{\text{к}} = (2,65 \text{ моль} / \text{м}^3 \div 3,06 \text{ моль} / \text{м}^3),$$

$$C_{\text{ш}} = (1,60 \text{ моль} / \text{м}^3 \div 1,90 \text{ моль} / \text{м}^3),$$

$$T = (45 \text{ }^\circ\text{C} \div 55 \text{ }^\circ\text{C}),$$

$$V = (0,1 \text{ м} / \text{с} \div 0,25 \text{ м} / \text{с}),$$

$$Z = (0,5 \text{ м} \div 2 \text{ м}).$$

Результаты расчета, согласно разработанному алгоритму, приведены в табл. 1.

Табл. 1. Результаты расчета приращений значимых параметров в препарационном растворе

Table 1. Results of the calculation of the increments of significant parameters in the preparation solution

	$C_{\text{ш}}$		V		T		Z	
	моль/м ³	%	м/с	%	°C	%	м	%
$D = 1,0 \cdot 10^{-6}$								
$\Delta C_{\text{к max}}$	1,7085	17,71	0,25	100	1,9270	19,98	2	65,62
$\Delta C_{\text{к min}}$	1,7085	57,51	0,16	100	0,8504	28,63	0,9	55,51
$D = 1,2 \cdot 10^{-6}$								
$\Delta C_{\text{к max}}$	1,1541	15,84	0,23	100	1,0903	14,96	1,9	67,81
$\Delta C_{\text{к min}}$	1,1541	42,26	0,15	100	0,5556	20,35	0,8	52,72
$D = 1,3 \cdot 10^{-6}$								
$\Delta C_{\text{к max}}$	0,8575	15,21	0,21	100	0,8234	12,71	1,8	68,67
$\Delta C_{\text{к min}}$	0,8575	37,62	0,13	100	0,4429	16,92	0,7	51,69
$D = 1,4 \cdot 10^{-6}$								
$\Delta C_{\text{к max}}$	0,8575	14,70	0,2	100	0,6199	10,63	1,7	69,40
$\Delta C_{\text{к min}}$	0,8575	34,13	0,116	100	0,3487	13,83	0,6	50,83
$D = 1,6 \cdot 10^{-6}$								
$\Delta C_{\text{к max}}$	0,6734	13,93	0,18	100	0,3244	6,71	1,6	70,64
$\Delta C_{\text{к min}}$	0,6734	29,08	0,1	100	0,1964	8,48	0,5	49,44

Анализ полученных результатов, приведенных в табл. 1, показал, что в границах варьирования параметров наиболее сильное влияние на изменение концентрации препарационных растворов оказывает скорость вытяжки. Следующим значимым фактором, влияющим на изменение концентрации ПР, является длина пути волокна в препарационной ванне (эквивалентная времени пребывания) и концентрации компонентов ПР, которые, как показано в [7, 13], определяют качественные характеристики получаемого продукта. В результатах исследований, приведенных в [10–12], и в других литературных источниках по обозначенной тематике отсутствует оценка параметрической чувствительности концентрации препарационного раствора в полимере к основным параметрам процесса. На производстве такая оценка

дается на основании опыта длительной эксплуатации аппаратов процесса. Наиболее значимые параметры: длина пути волокна в препаративной ванне и скорость вытяжки, выделенные аналитическим путем, совпадают с данными производства. При параметрической модернизации отсутствует возможность изменения длины препаративной ванны, поэтому необходимо управлять скоростью вытяжки. Согласно вычисленным значениям, управление производится по максимальной границе варьирования параметра – $0,25 \pm 0,002$ м/с, принятой на производстве, что позволит увеличить производительность аппаратов процесса, не снижая интенсивности диффузии ПР в полимер.

Фактор температуры раствора в исследуемом диапазоне изменений оказывает незначительное влияние на концентрацию раствора, необходимого для сохранения подобия протекающих диффузионных процессов. Поэтому при управлении процессом препарации необходимо проводить стабилизацию температуры ПР в указанных пределах. Стабилизация параметра с практической точки зрения означает управление в соответствии с допусками, обозначенными в технологическом регламенте процесса: $T = 50 \pm 0,2$ °С.

Согласно разработанному алгоритму, расчет минимальных и максимальных отклонений концентрации ПР производится непосредственно в ходе технологического процесса, что улучшит качество управления процессом препарации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании решения уравнения нестационарной диффузии (1), аналитически определена параметрическая чувствительность концентрации компонентов препаративных растворов C_k к изменению параметров процесса $C_{ш}$, C_s , V , T , Z , D , входящих в уравнения коррекции (20)–(23). При применении разработанного алгоритма для расчета максимальных и минимальных отклонений концентрации ПР в полимере, выделены те параметры, влияние которых является значительным в процессе препарации полиэфирных волокон и пленок. На основе анализа полученных расчетных данных, определены значения скорости вытяжки полимера и температуры препарации. Стабилизация выделенных параметров приведет к увеличению производительности аппаратов процесса.

Полученные научные результаты дают возможность определения параметрической чувствительности концентрации ПР к параметрам технологического процесса не зависимо от химического состава ПР, что позволит использовать специальные растворы для улучшения технических характеристик полимеров различного назначения.

Решена практическая задача исследования: изучен процесс препарации, как объект управления, выявлены наиболее значимые параметры, управление которыми необходимо реализовать в системе автоматизации технологическим процессом. Разработан алгоритм, включенный в функции управления и позволяющий управлять процессом препарации полимерных волокон и пленок, обеспечивая адаптацию параметров системы автоматизации под рассчитанные значения. Применение алгоритма дает возможность для устранения максимальных отклонений температуры в пределах ± 5 °С от установившегося значения, а также для регулирования скорости вытяжки с отклонением в 1 % от максимальной границы варьирования данного параметра, составляющей 0,25 м/с. Управление скоростью вытяжки позволило увеличить производительность основного технологического аппарата процесса (препаративной ванны) до 5 %.

Дальнейшим научным направлением исследования является расширение математической модели, путем включения в уравнения коррекции (20)–(23) концентрации каталитических веществ, ускоряющих диффузионные процессы. Также получение аналитической взаимосвязи между уравнениями коррекции и коэффициентами в функциях управления управляющего устройства, которая позволит по составленным алгоритмам вырабатывать управляющие воздействия, непосредственно влияющие на эффективность процесса препарации.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Цинкграф, С. Новые решения литья под давлением / С. Цинкграф // Полимерные материалы. Изделия, оборудование, технологии, 2018. – № 12. – С. 6–10.
- 2 Гольдаде, В. А. Современные тенденции развития полимерной пленочной упаковки / В. А. Гольдаде // Полимерные материалы и технологии, 2015. – Т.1, № 1. – С. 63–70.
- 3 Crisan, D. N. Poly (acryloyl hydrazide), a versatile scaffold for the preparation of functional polymers: synthesis and postpolymerisation modification / D. N. Crisan [et al.] // Polymer Chemistry, 2017. – № 8. – P. 4576–4584.
- 4 Hu, B. Facile preparation of biocompatible polymer microgels with tunable properties and unique functions to solely stabilize high integral phase emulsions / B. Hu [et al.] // Chemical Engineering Journal, 2017. – Vol. 315, № 1. – P. 500–508.
- 5 Лин, Д. Г. Изменения эффективности ингибирования полиэтилена при диффузионном насыщении расплава полимера антиоксидантом / Д. Г. Лин, Е. В. Воробьева // Полимерные материалы и технологии, 2017. – Т.3, № 2. – С. 41–48.
- 6 Ziebacz N. Crossover regime for the diffusion of nanoparticles in polyethylene glycol solutions: influence of the depletion layer / N. Ziebacz [et al.] // Soft Matter, 2011. – № 7. – P. 7181–7186.
- 7 Huang, J.-C. Diffusion in Polymers with Concentration Dependent Diffusivity / J.-C. Huang, H. Liu, Y. Liu // International Journal of Polymeric Materials, 2001. – Vol. 49, № 1. – P. 15–24.
- 8 Masaro, L. Physical models of diffusion for polymer solutions, gels and solids / L. Masaro, X. X. Zhu // Progress in Polymer Science, 1999. – Vol. 24, № 5. – P. 731–775.
- 9 Yang, Q.-H. Dynamics of adsorbed polymers on attractive homogeneous surfaces / Q.-H. Yang, M.-B. Luo // Scientific Reports, 2016. – № 6. – P. 1–10.
- 10 Кожевников, Ю. П. Количественное описание диффузии, происходящей при мокром способе формования химических волокон / Ю. П. Кожевников. – М.: НИИ – ТЭХим, 1971. – 25 с.
- 11 Серков, А. Т. Оценки коэффициента взаимной диффузии осадителя и растворителя при формировании полисульфопимидных волокон. / А. Т. Серков, Ю. П. Кожевников, Г. И. Кудрявцев // Химические волокна, 1972. – № 6. – С. 28–80.
- 12 Серков, А. Т. Влияние скорости формования на диффузионные процессы, протекающие в вязкоэластичных волокнах / А. Т. Серков, Л. Н. Косяченко // Химические волокна, 1978. – № 1. – С. 27–30.
- 13 Zaikov, G. E. Polymer Reactivity / G. E. Zaikov, B. A. Nowell. – N.Y.: Nova Science Publishers, 2006. – 196 p.
- 14 Айрапетьянц, Г. М. Методы и аппаратура для исследования диффузионных процессов при формировании химических волокон / Г. М. Айрапетьянц, Ю. Н. Ястремский. – Минск: БелНИИТИ, 1978. – 147 с.
- 15 Crank, J. The mathematics of diffusion. – London: Oxford University Press, 1975. – 417 p.

Поступила в редакцию 17.06.2019 г.

ОБ АВТОРАХ:

Ирина Владиславовна Акиншева, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автоматизации технологических процессов и производств, Могилевский государственный университет продовольствия, e-mail: starrina@mail.ru

Гайк Минасович Айрапетьянц, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автоматизации технологических процессов и производств, Могилевский государственный университет продовольствия, e-mail: starrina@mail.ru

Светлана Владимировна Подолян, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры высшей математики, Могилевский государственный университет продовольствия, e-mail: starrina@mail.ru

ABOUT AUTHORS:

Irina V. Akinsheva, PhD (Engineering), Associate Professor of the Department of Automation of Technological Processes and Production, Mogilev State University of Food Technologies, e-mail: starrina@mail.ru

Gayk M. Ayrapet'yanz, PhD (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Automation of technological Processes and Production, Mogilev State University of Food Technologies, e-mail: starrina@mail.ru

Svetlana V. Podolyan, (Physics and Mathematics), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Higher Mathematics, Mogilev State University of Food Technologies, e-mail: starrina@mail.ru