

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-6-528-533>

УДК 664.012

Моделирование динамики движения пленки на агрегате по производству полимерно-пленочных материалов

Кандидаты техн. наук, доценты Г. М. Айрапетьянц¹⁾, М. М. Кожевников¹⁾, Н. И. Ульянов¹⁾

¹⁾Могилевский государственный университет продовольствия (Могилев, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2018
Belarusian National Technical University, 2018

Реферат. Предложены новые эффективные динамические модели движения полимерной пленки, которые в отличие от известных учитывают процессы протекания деформации на агрегате по производству полимерно-пленочных материалов. Отмечено, что процесс деформации полимерной пленки в межсекционной зоне, определяемый ее натяжением, зависит от соотношения линейных скоростей секций и величин натяжений и деформаций в этих секциях. Анализ предложенных динамических моделей движения полимерной пленки показал, что снижение ее деформаций в каждой зоне агрегата может быть достигнуто как путем изменения соотношения скоростей на входе в зону и выходе из нее, так и введением компенсатора возмущающих воздействий, обусловленных деформациями пленки на входе в зону. Коррекция величины натяжения полимерной пленки в каждой зоне агрегата может быть осуществлена изменением соотношения скоростей на входе в зону и выходе из нее, а также изменением натяжения полимерной пленки на входе в зону и частичной компенсацией возмущений, обусловленных деформациями на входе в зону. Выявлены возможные каналы автоматического управления агрегатом по производству полимерно-пленочных материалов с целью улучшения качества продукции. На основе предложенных динамических моделей показано, что для эффективного управления процессом вытягивания необходимо применять системы автоматического измерения скоростей вращения секций агрегата по производству полимерно-пленочных материалов и натяжения пленки. Динамическая модель может быть эффективно использована при создании адаптивной системы управления многодвигательным электроприводом агрегата по производству полимерно-пленочных материалов с целью повышения прочности пленки и снижения ее удлинения.

Ключевые слова: полимерная пленка, деформация, динамические модели

Для цитирования: Айрапетьянц, Г. М. Моделирование динамики движения пленки на агрегате по производству полимерно-пленочных материалов / Г. М. Айрапетьянц, М. М. Кожевников, Н. И. Ульянов // *Наука и техника*. 2018. Т. 17, № 6. С. 528–533. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-6-528-533>

Dynamics Modelling of Film Motion at Unit for of Polymeric Film Material Production

G. M. Irapiants¹⁾, M. M. Kozhevnikov¹⁾, N. I. Ulianov¹⁾

¹⁾Mogilev State University of Food Technologies (Mogilev, Republic of Belarus)

Abstract. New effective dynamic models for motion of polymeric film have been proposed in the paper. These models in contrast to known ones take in to account deformation processes which occur at a unit for polymer-film materials production. It has been shown that the deformation process of a polymer film in intersectional area determined by its tension depends on ratio of linear section velocities and tension and deformation values in these sections. An analysis of the proposed dynamic models of polymer film motion has shown that a decrease in its deformations in every zone of the unit can be achieved both by changing ratio of input and output velocities and introducing a compensator for perturbing influences due to deformations

Адрес для переписки

Кожевников Михаил Михайлович
Могилевский государственный университет продовольствия
пр. Шмидта, 3
212027, г. Могилев, Республика Беларусь
Тел.: +375 222 48-56-76
mgup@mogilev.by

Address for correspondence

Kozhevnikov Mikchail M.
Mogilev State University of Food Technologies
3 Shmidt Ave.,
212027, Mogilev, Republic of Belarus
Tel.: +375 222 48-56-76
mgup@mogilev.by

of the film at the entrance to the zone. Possible channels for automatic control of the unit for polymer-film material production have been identified with the aim of improving quality of products. While using the proposed dynamic models it has been demonstrated that it is necessary to apply systems for automatic measuring of section rotation speed and film tension in the unit for polymer-film material production in order to ensure effective control over an extrusion process. The proposed dynamic model can be efficiently used to create an adaptive system which is applied to control a multi-motor drive of the unit for of polymer-film material production.

Keywords: polymer film, deformation, dynamic models

For citation: Irapietants G. M., Kozhevnikov M. M., Ulianov N. I. (2018) Dynamics Modelling of Film Motion at Unit for of Polymeric Film Material Production. *Science and Technique*. 17 (6), 528–533. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-6-528-533> (in Russian)

Выпуск качественных полимерно-пленочных материалов имеет большое значение в структуре современного производства [1]. На агрегатах по производству полимерно-пленочных материалов реализуются непрерывные технологические процессы, характерной особенностью которых является наличие ряда машин, расположенных последовательно и объединенных общим процессом. При формировании пленка проходит ряд технологических участков, на которых время ее пребывания должно быть строго определенным [2]. Кроме этого, для получения требуемых физико-механических характеристик пленка находится под определенным, но различным для каждого технологического участка натяжением. В пленке макромолекулы располагаются хаотично, что обуславливает ее низкую прочность на разрыв, очень высокое удлинение и низкую упругость. При натяжении пленки происходит распределение молекул и ориентация их вдоль одной оси, в результате чего образуются межмолекулярные связи, увеличивается прочность и снижается удлинение. Обеспечение значений этих параметров пленки в допустимых пределах осуществляется с помощью механизмов непрерывного перемещения пленки [3, 4].

Различные возмущения, возникающие в системе агрегата по производству полимерно-пленочных материалов, передаются через механизмы непрерывного перемещения пленки. Происходит рассогласование скоростей валков и нарушается режим натяжения. Непостоянство натяжений в процессе формирования пленки приводит к неоднородности физических и механических свойств по ее длине [5–7]. Отсутствие системы управления за скоростным режимом работы агрегата и натяжением пленки не дает возможности своевременно выявить

дефекты и предотвратить выпуск некачественной продукции.

Анализ агрегатов по производству полимерной пленки показывает, что к ним предъявляются достаточно серьезные требования в отношении поддержания соотношения линейных скоростей между секциями в установившихся ($\pm 1\%$) и динамических ($\pm 2\%$) режимах и регулировании натяжения, особенно в процессе сушки ($\pm 5\%$). Соблюдение указанных требований возможно посредством автоматических систем управления электроприводом, построенных с учетом динамической модели движения пленки [8–10]. Поэтому в данной работе предложены новые эффективные динамические модели движения полимерной пленки, которые в отличие от известных определяют связи между линейными скоростями пленки и ее деформацией и натяжением в каждой секции агрегата. Эти модели могут быть использованы при создании адаптивной системы управления многодвигательным электроприводом агрегата по производству полимерно-пленочных материалов с целью повышения прочности пленки и снижения ее удлинения.

В процессе разработки динамических моделей движения полимерной пленки приняты следующие допущения: при деформации пленки ее поперечные сечения остаются плоскими и перпендикулярными к оси растяжения; движением частиц пленки в поперечном направлении пренебрегаем; скорость движения пленки существенно меньше скорости распространения в них упругих деформаций; пленка имеет одинаковое сечение во всех зонах деформации.

Рассмотрим малый участок Δx (вдоль которого проходит пленка) секции, расположенной между секциями A и B (рис. 1). Через плоскость, находящуюся на расстоянии x от точки A (пре-

дыдущая секция), в рассматриваемый участок Δx за единицу времени входит количество пленки $Q_{\text{вх}}$

$$Q_{\text{вх}} = S\rho v_{\text{вх}},$$

где S – площадь поперечного сечения пленки; ρ – плотность пленки; $v_{\text{вх}}$ – скорость движения пленки на входе в участок Δx .

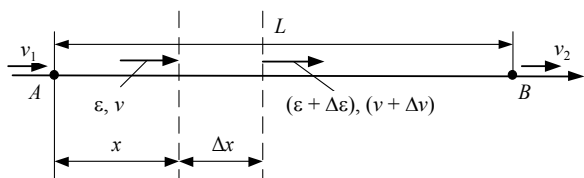


Рис. 1. Малый участок секции агрегата полимерно-пленочных материалов: v_1 – скорость пленки на выходе из секции A ; v_2 – скорость пленки на входе в секцию B ; v – скорость пленки в рассматриваемой секции; Δv – приращение скорости пленки в рассматриваемой секции; ε – деформация пленки в рассматриваемой секции; $\Delta\varepsilon$ – приращение деформации пленки в рассматриваемой секции; L – расстояние между секциями A и B

Fig. 1. Small section part of unit for polymeric film materials: v_1 – film speed at section A exit; v_2 – film speed at section B entrance; v – film speed at considered section; Δv – increment of film speed at considered section; ε – film deformation at considered section; $\Delta\varepsilon$ – increment of film deformation at considered section; L – distance between sections A and B

Примем в приближении, что в пределах малого участка секции Δx площадь поперечного сечения пленки S остается неизменной в процессе ее растяжения (усадки) между секциями A и B . Это допустимо с учетом коэффициентов Пуассона для полимерных пленок. Так, например, коэффициент Пуассона для полиэтиленов составляет 0,15–0,20. За промежуток времени Δt из зоны Δx выходит количество пленки $Q_{\text{вых}}$

$$Q_{\text{вых}} = Q_{\text{вх}} \pm \Delta Q = S(\rho v_{\text{вх}} \pm \Delta(\rho v)).$$

Следовательно, количество материала на участке Δx за счет деформации ΔQ (без учета знака) изменяется на величину

$$\Delta Q = S\Delta(\rho v).$$

По закону неразрывности среды, изменение массы вещества в единицу времени на участке Δx должно быть $\pm \Delta Q$, т. е.

$$\frac{\partial(S\rho\Delta x)}{\partial t} = \pm \Delta Q, \quad (1)$$

или

$$S\Delta x \frac{\partial \rho}{\partial t} = \pm S\Delta(\rho v). \quad (2)$$

В (1) и (2) знак «+» берется для процесса усадки, а знак «-» – для процесса растяжения. В пределе при $\Delta x \rightarrow 0$ имеем

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \pm \frac{\partial(\rho v)}{\partial x}. \quad (3)$$

Формула (3) представляет собой уравнение неразрывности среды для одномерного слоя, когда переменные зависят от одной координаты пространства и времени, при этом плотность среды в одномерном случае

$$\rho = \frac{\rho_0}{1 \pm \varepsilon}, \quad (4)$$

где ρ_0 – плотность недеформированной среды; ε – деформация (знак «+» относится к процессу растяжения, знак «-» – к процессу усадки).

Дифференцируя по t уравнение (4) и подставляя результат в (3), получим

$$-\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \pm \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} = (1 \pm \varepsilon) \frac{\partial v}{\partial x}.$$

Если $\varepsilon \ll 1$, что справедливо для отделочных агрегатов полимерных пленок, то получим

$$-\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \pm \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial x}.$$

Таким образом, распространение деформации в пленке, пространстве и во времени описывается дифференциальным уравнением в частных производных. Для его решения надо знать распределение скорости частиц материала вдоль участка растяжения. Между частицами материала существуют силы, стремящиеся передать смежным частицам такое же движение, которое приложено к материалу. Между частицами материала, к которым приложена нагрузка, и смежными частицами возникают силы, стремящиеся сообщить соседним частицам движение. Это действие сил задержи-

вается под влиянием сил инерции, действующих в направлении, противоположном движению.

Если под действием приращения силы ΔF сечение материала сместится на величину Δl , то деформация участка Δx запишется как $\varepsilon = \Delta l / \Delta x$, или при $\Delta x \rightarrow 0$

$$\varepsilon = \partial l / \partial x. \quad (5)$$

Скорость движения частиц материала в сечении x

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta l}{\Delta t} = \frac{\partial l}{\partial t}.$$

Поскольку смещение сечения происходит непрерывно, на основании (5) скорость деформации запишется как

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial l}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial l}{\partial t},$$

или

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \frac{\partial v}{\partial x}. \quad (6)$$

Уравнение (6) выражает связь между деформацией и скоростью движения материала. Величина ΔF , действующая на участок Δx :

$$\Delta F = S \Delta \sigma,$$

где σ – нормальное натяжение в сечении x .

С другой стороны, ΔF должна равняться произведению массы $\Delta m = \rho_0 S \Delta x$ на ускорение $\partial v / \partial t$

$$\rho_0 S \Delta x \frac{\partial v}{\partial t} = S \Delta \sigma,$$

или при $\Delta x \rightarrow 0$

$$\rho_0 \frac{\partial v}{\partial t} = \frac{\partial \sigma}{\partial x}. \quad (7)$$

Так как связь между напряжением и деформацией однозначно определяется уравнением механического состояния для упругих и упругопластических сред, то, полагая $\sigma = \sigma(\varepsilon(t, x))$, имеем

$$\frac{\partial \sigma}{\partial x} = \frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x}. \quad (8)$$

С учетом (8) равенство (7) примет вид

$$\rho_0 \frac{\partial v}{\partial t} = \frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon} \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial x},$$

или

$$\frac{\partial v}{\partial t} = c^2 \frac{\partial \varepsilon}{\partial x},$$

где $c = \sqrt{\frac{1}{\rho_0} \cdot \frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon}}$ – скорость распространения деформаций.

Из изложенного выше видно, что движение частиц в деформируемом материале описывается системой уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \frac{\partial v}{\partial x}; \\ \frac{\partial v}{\partial t} = c^2 \frac{\partial \varepsilon}{\partial x}. \end{cases} \quad (9)$$

Для решения (9) надо знать, является ли полимерная пленка упругим, упругопластическим или более сложным материалом; являются ли деформации обратимыми или необратимыми; как влияет скорость приложения нагрузки на зависимость $\sigma = \sigma(\varepsilon(t, x))$.

Проследим изменение состояния системы в точке x оси перемещения и примем, что поток однороден, т. е. ρ и v зависят только от t . При принятых допущениях уравнение неразрывности (3) запишем в виде

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{\rho_0 v_1 - \rho v_2}{L},$$

где L – расстояние между смежными секциями.

Учитывая (4), получим

$$L \frac{d\varepsilon}{dt} = v_2 - (1 + \varepsilon)v_1,$$

или

$$\frac{L}{v_1} \frac{d\varepsilon}{dt} + \varepsilon = \frac{v_2 - v_1}{v_1}. \quad (10)$$

Если $v_2 - v_1 = \text{const}$, то решение уравнения (10) имеет вид

$$\varepsilon = (v_2 - v_1) / v_1 (1 - e^{-t/\tau}), \quad (11)$$

где $\tau = L/v_1$ – постоянная времени протекания процесса деформации в зоне.

Из (11) видно, что процесс деформации материала в зоне протекает не мгновенно, а характеризуется некоторой постоянной времени τ . Изменение деформации отстает от изменения соотношения скоростей секций. Уравнения (10) и (11) являются динамической моделью межсекционной зоны при отсутствии проскальзывания перемещаемого материала в секциях.

Формула (10) справедлива при условии, что в межсекционную зону входит недеформированный материал. Однако в многосекционном агрегате часто требуется проанализировать процесс деформации материала в промежуточной зоне. В этом случае (10) примет вид

$$\frac{L}{v_1(1+\varepsilon_1)(1+\varepsilon_2)} \cdot \frac{d\varepsilon_2}{dt} + \varepsilon_2 = \frac{v_2(1+\varepsilon_1) - v_1}{v_1}, \quad (12)$$

где ε_1 – деформация материала, входящего в зону; ε_2 – то же в данной зоне.

Динамическая модель (12) демонстрирует, что процесс изменения деформации при скачкообразном изменении скоростей протекает с постоянной времени

$$\tau = \frac{L}{v_1(1+\varepsilon_1)(1+\varepsilon_2)} \frac{d\varepsilon_2}{dt}.$$

Как показали проведенные исследования [9, 10], на агрегатах по производству полимерных пленок не обеспечивается перемещение материала без его проскальзывания в валках под действием разности деформаций в смежных зонах. В этом случае линейная скорость валков v_b не равна скорости выхода из них материалов v . Скорость выхода материала из валков определяется по следующей зависимости:

$$v = v_b (1 + B(\varepsilon_2 - \varepsilon_1)),$$

где B – коэффициент, характеризующий проскальзывание материала относительно секции.

Между деформацией ε и натяжением T существует зависимость

$$T = k\varepsilon, \quad (13)$$

где k – коэффициент, характеризующий физико-механические свойства материала.

С учетом (13) уравнение (12) запишется следующим образом:

$$\frac{Lk}{v_1(1+T_1/k)(1+T_2/k)} \frac{dT_2}{dt} + \frac{T_2}{k} = \frac{v_2(1+T_1/k) - v_1}{v_1}, \quad (14)$$

где T_1 – натяжение материала, входящего в зону; T_2 – то же в данной зоне.

Динамическая модель (14) показывает, что процесс деформации материала в межсекционной зоне, определяемый его натяжением, зависит от соотношения линейных скоростей секций и величин натяжений в зонах. Для того чтобы этим процессом управлять, в первую очередь необходимо разработать системы автоматического измерения скоростей вращения секций агрегата по производству полимерно-пленочных материалов и натяжения пленки.

ВЫВОД

Анализ предложенных динамических моделей движения полимерной пленки (10), (12), (14) позволяет сделать следующие выводы о возможных каналах управления агрегатом по производству полимерно-пленочных материалов с целью улучшения качества продукции:

– снижение деформаций ε_2 полимерной пленки в каждой зоне агрегата может быть достигнуто как путем изменения соотношения скоростей на входе в зону и выходе из нее (v_1, v_2), так и введением компенсатора возмущений, обусловленных деформациями пленки ε_1 на входе в зону;

– коррекция величины натяжения полимерной пленки T_2 в каждой зоне может быть осуществлена изменением соотношения скоростей на входе в зону и выходе из нее (v_1, v_2), а также изменением натяжения полимерной пленки T_1 на входе в зону и частичной компенсацией

возмущений, обусловленных деформациями ε_1 пленки на входе в зону.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шерышев, М. А. Производство изделий из полимерных листов и пленок / М. А. Шерышев. М.: Научные основы и технологии, 2011. 556 с.
2. Евдокимов, В. В. Оборудование и механизация производства полимерных пленочных материалов и искусственных кож / В. В. Евдокимов. М.: Легпромбыт-издат, 1992. 272 с.
3. Лукач, Ю. Е. Оборудование для производства полимерных пленок / Ю. Е. Лукач, А. Д. Петухов, В. А. Сенатос. М.: Машиностроение, 1981. 222 с.
4. Крыжановский, В. К. Производство изделий из полимерных материалов / В. К. Крыжановский, М. Л. Кербер, В. В. Бурлов. СПб.: Профессия, 2008. 464 с.
5. Уайт, Д. Полиэтилен, полипропилен и другие полиолефины / Д. Уайт, Д. Чой. СПб.: Профессия, 2006. 240 с.
6. Абдель-Бари, Е. М. Полимерные пленки. Технологии производства, деструкция и стабилизация, применение, рециклинг / Е. М. Абдель-Бари, Е. Г. Заиков. СПб.: Профессия, 2010. 352 с.
7. Лебедева, Т. М. Экструзия полимерных пленок и листов / Т. М. Лебедева. СПб.: Профессия, 2009. 216 с.
8. Айрапетьянц, Г. М. Совершенствование систем автоматического регулирования технологическими процессами / Г. М. Айрапетьянц, А. В. Акулич, Н. И. Ульянов. Могилев: Могилев. госуд. ун-т продов., 2012. 322 с.
9. Способ управления процессом получения вискозной пленочной оболочки: а. с. 712411 СССР, МКИЗ, G05 D 27/00 / Г. М. Айрапетьянц, Ю. Н. Ястремский; дата публ. 05.10.1979.
10. Разработка математической модели динамики движения полимерной пленки на агрегате полимерно-пленочных материалов / Г. М. Айрапетьянц [и др.] // Вестник МГУП. 2014. Т. 17, № 2. С. 105–110.

Поступила 08.02.2018

Подписана в печать 25.10.2018

Опубликована онлайн 30.11.2018

REFERENCES

1. Sheryshev M. A. (2011) *Production of Items From Polymer Sheets and Films*. Moscow, Nauchnye Osnovy i Tekhnologii Publ. 556 (in Russian).
2. Evdokimov V. V. (1992) *Equipment and Mechanization of Production for Polymer Film Materials and Artificial Leather*. Moscow, Legprombytizdat Publ. 272 (in Russian).
3. Lukach Yu. E., Petukhov A. D., Senatov V. A. (1981) *Equipment for Production of Polymer films*. Moscow, Mashinostroyeniye Publ. 222 (in Russian).
4. Kryzhanovskiy V. K., Kerber M. L., Burlov V. V. (2008) *Production of Items from Polymer Materials*. Saint-Petersburg, Professiya Publ. 464 (in Russian).
5. White J., Choi D. (2006) *Polyethylen, Polypropylene and Other Polyolefins*. Saint-Petersburg, Professiya Publ. 240 (in Russian).
6. Abdel-Bary E. M., Zaikov E. G. (2010) *Polymer Films. Technologies of Production, Destruction and Stabilization, Application and Recycling*. Saint-Petersburg, Professiya Publ. 352 (in Russian).
7. Lebedeva T. M. (2009) *Extrusion of Polymer Films and Sheets*. Saint-Petersburg, Professiya Publ. 216 (in Russian).
8. Airapetiants G. M., Akulich A. V., Uliyanov N. I. (2012) *Modernization of Automatic Regulation Systems for Technological Processes*. Moglev, Publishing House of Moglev State University of Food Technologies. 322 (in Russian).
9. Airapetiants G. M., Yastremsky Yu. N. (1980) *Control Method for Process to Obtain Viscose Film Casing*: Inventor's Certificate 712411 USSR.
10. Airapet'yants G. M., Ul'yanov N. I., Kozhevnikov M. M., Yasnitskii V. V. (2014) *Development of Mathematical Model for Dynamics of Polymer Film Motion in Unit of Polymer-Film Materials*. *Vestnik Mogilevskogo Gosudarstvennogo Universiteta Prodovol'stviya* [Bulletin of Moglev State University of Food Technologies], 17 (2), 105–110 (in Russian).

Received: 08.02.2018

Accepted: 25.10.2018

Published online: 30.11.2018