

УДК 678.057.3

Носко С.В. к.т.н., доц.

НТУУ «Киевский политехнический институт», г. Киев, Украина

## ФАКТОРЫ ВЛИЯЮЩИЕ НА ТОЧНОСТЬ НАНЕСЕНИЯ ЖИДКОСТНОГО СЛОЯ НА ПОЛИМЕРНУЮ ПЛЕНКУ

Nosko S.

National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine (Noskosv@ukr.net)

### FACTORS WHICH INFLUENCE ACCURACY OF APPLICATION OF THE FLUID LAYER ON THE POLYMER FILM

*Приведен анализ факторов, влияющих на точность нанесения жидкостного слоя фотоэмульсии на полимерную пленку при производстве кино- и фотоматериалов экструзионным способом. Выявлены основные гидродинамические и технологические факторы определяющие толщину наносимого покрытия. Получены расчетные зависимости позволяющие установить влияние расхода эмульсии и скорости движения полимерной подложки на толщину наносимого слоя. Предложена конструктивная схема регулирования формующей капиллярной щели экструзионного устройства применяемого в производстве кино- и фотоматериалов.*

*Ключевые слова:* регулирование щели экструзионной головки; толщина наносимого слоя.

#### Введение

В связи с ростом объемов производства полимерных пленочных материалов актуальное значение приобретают вопросы, связанные с совершенствованием существующего и разработкой нового высокопроизводительного технологического оборудования. Широкое распространение, в настоящее время, находят экструзионные щелевые головки для производства кино- и фотоматериалов, что обусловлено их высокими технологическими показателями, относительной простотой конструкции и сравнительно небольшими энергозатратами.

Необходимость исследования процессов экструзионного нанесения кино- и фотоматериалов на движущуюся подложку связано так же, с появлением новых жидких эмульсий и материалов основы для которых данная технология еще не разработана.

Теоретическому исследованию пленочных течений посвящено большое количество работ, таких как [1-4]. В связи с сложностью построения математических моделей, описывающих данное движение жидкостной пленки, решения проводятся при соответствующих приближениях и допущениях, что ограничивает диапазон их практического применения. В связи с этим, при решении ряда прикладных задач возникает необходимость в подробной экспериментальной информации. В то же время экспериментальные исследования гидродинамических характеристик течений со свободной поверхностью, из-за незначительной толщины пленочных покрытий, ограничены техническими возможностями и высокой стоимостью проведения эксперимента. Кроме того, не всегда обеспечивают полную количественную информацию. Так например, данные о внутренних напряжениях, возникающих в неньютоновской жидкости в момент ее выхода из формующего канала экструзионной головки [6].

В работах [7-9] основным методом исследования процесса нанесения пленки неньютоновской жидкости с учетом термокапиллярного эффекта являлось численное моделирование.

Изучение волновых режимов стекающих пленок жидкости представлены в работах [10,11]. Авторами выведена система уравнений для течения двухслойной пленки. Проведено исследование устойчивости основного течения и получены критические значения волнового числа, при которых проявляется неустойчивость и начинается волнообразование.

Анализ публикаций по пленочным течениям жидкостей показал, что круг решаемых задач ограничен исследованием отдельных прикладных вопросов. Это связано как со сложностью математической постановки проблемы, так и трудностями ее численного решения, а на форму образующегося пленочного покрытия оказывают влияние ряд факторов, среди которых реологические свойства наносимой жидкости, геометрические параметры поверхности подложки, средняя толщина пленки, средняя скорость потока в пленке и касательное напряжение у стенки, волновые характеристики пленочного потока.

Кроме перечисленных выше общих факторов, влияющих на толщину наносимого слоя эмульсии, для исследуемой конструкции экструзионной головки, толщина слоя, зависит также от расхода  $Q$  и скорости

движения подложки  $V_n$ , а данные величины являются функциями ряда параметров, таких как физические свойства жидкой эмульсии, время истечения, геометрических характеристик распределительного канала и гидродинамических параметров движущейся в нем эмульсии.

### Цель

Целью работы является исследование гидродинамических и технических факторов влияющих на точность нанесения жидкостного слоя фотоэмульсии на полимерную пленку при производстве кино- и фотоматериалов.

### Исследование

Формирование пленочного течения фотоэмульсии зависит от гидродинамических характеристик потока в формующем щелевом канале, обеспечивающем переход от напорного течения к безнапорному. Изменение геометрических характеристик щелевого канала (нарушении параллельности) приводит к перераспределению напряжений в пленочном потоке [4].

Перепад давления по длине щелевого канала с параллельными стенками определяется зависимостью [3]:

$$\Delta P = \frac{12\mu QL}{b^3 \cdot H}, \quad (1)$$

где  $\mu$  – динамическая вязкость жидкости;

$L$  – длина канала;

$b$  – ширина канала;

$H$  – высота канала;

$Q$  – расход жидкости.

При изменении ширины щелевого канала « $b$ » будет изменяться расход жидкости через единицу длины щели:

$$q = \frac{\Delta P \cdot b^3}{12\mu L}, \quad (2)$$

т. е. на участках канала с разной шириной будет различная плотность орошения подложки и соответственно толщина слоя формируемого данной щелью.

Для определения величины изменения расхода продифференцируем уравнение (2) и после преобразования результата относительно  $\Delta q$  получаем зависимость для относительной величины отклонения расхода:

$$E = \frac{\Delta q_{щ}}{q} = \frac{3\Delta b}{b}, \quad (3)$$

где  $\Delta q_{щ} = 3\Delta P / 12\mu \cdot L \cdot b^2 \cdot \Delta b$ .

Толщина наносимого слоя определяется из уравнения для расхода при экструзионном способе нанесения [4]:

$$h = Q / V_n \cdot S, \quad (4)$$

где  $V_n$  – скорость движения полимерной подложки;

$S$  – ширина подложки.

В соответствии с зависимостью (4) толщина слоя формируемого щелью пропорциональна расходу через щель, то формула (3) определяет и относительное отклонение толщины слоя:

$$\Delta h / h = 3\Delta b / b. \quad (5)$$

На рис.1 показано конструктивное исполнение экструзионной щелевой головки позволяющей осуществлять регулирование формующих капиллярных щелей, с целью улучшения равномерности фотоэмульсионного покрытия по ширине подложки.

Разработанная конструкция экструзионной головки, при однослойном покрытии, позволяет получить заданную толщину наносимого на подложку слоя  $h \approx 6 \cdot 10^{-6}$  м.

Как было показано выше, толщина наносимого слоя является функцией двух переменных – расхода  $Q$  и скорости движения полимерной пленки  $V_n$ . Для определения влияния на отклонение толщины изменение расхода, продифференцируем уравнение (4) по  $Q$  (считая, что  $V_n = \text{const}$ ):

$$\partial h / \partial Q = Q_H / V_n \cdot S, \quad (6)$$

где  $Q_H = \varphi'(t)$  – производная функции  $Q = \varphi(t)$ ,

частный дифференциал  $h$  по  $Q$  имеет вид:

$$dh = \frac{\partial h}{\partial Q} dQ = \frac{Q_H}{V_n \cdot S} dQ. \quad (7)$$

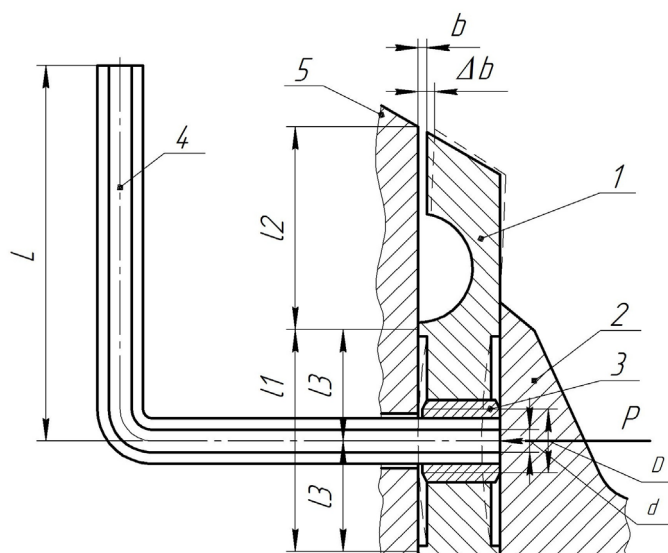


Рис. 1. Конструктивная схема регулирования капиллярной щели

Заменяя дифференциал расхода приращением и принимая частное приращение толщины слоя равным его частному дифференциалу, получим:

$$\Delta h = Q_H / V_n \cdot S \cdot \Delta Q. \quad (8)$$

Дифференцируя выражение (4) по  $V_n$ , имеем

$$\partial h / \partial V_n = Q V_n / S \cdot V_n^2, \quad (9)$$

где  $V_n' = \psi'(t)$  – производная функции  $V_n = \psi(t)$ ,  
частный дифференциал функции  $h$  по  $V_n$ :

$$dh = \partial h / \partial V_n \cdot \partial V_n = -Q \cdot V_n' / S \cdot V_n^2 \cdot dV_n. \quad (10)$$

Заменяв дифференциалы приращениями, находим

$$\Delta h_{V_n} = -Q \cdot V_n' / S \cdot V_n^2 \cdot \Delta V_n. \quad (11)$$

Следовательно, полученные соотношения (8) и (11) показывают, как зависит абсолютное отклонение толщины слоя от изменения расхода и скорости подложки.

Для относительного отклонения толщины пленки необходимо подставить значения  $\Delta h$  и  $h$  из уравнений (8) и (11) и (4), получим

$$E_Q = \frac{Q / V_n \cdot S \cdot \Delta Q}{Q / V_n \cdot S} = Q_H / Q \cdot \Delta Q, \quad (12)$$

$$E_{V_n} = \frac{-Q \cdot V_n' / S \cdot V_n^2}{Q / V_n \cdot S} = V_n' / V_n \cdot \Delta V_n. \quad (13)$$

Знак минус в формулах (11) и (13) показывает, что при увеличении скорости подложки толщина слоя уменьшается т. к. положительному приращению скорости соответствует отрицательное приращение толщины.

Для определения изменения отклонения толщины наносимого слоя при одновременном изменении расхода и скорости подложки необходимо найти полный дифференциал функции  $h=f(Q, V_n)$ :

$$dh = \partial h / \partial Q \cdot dQ + \partial h / \partial V_n \cdot dV_n = Q_H / V_n \cdot dQ + (-Q / S \cdot V_n' / V_n^2) dV_n. \quad (14)$$

Заменяя дифференциалы приращениями, получаем искомую зависимость:

$$\Delta h = Q_H / V_n \cdot S \cdot \Delta Q + (-Q / S \cdot V_n' / V_n^2) \Delta V_n. \quad (15)$$

Сравнивая уравнения (11), (12) и (13) видно, что

$$\Delta h = \Delta h_Q + \Delta h_{V_n}, \quad (16)$$

то есть общее абсолютное отклонение толщины слоя за любой промежуток времени представляет собой алгебраическую сумму отклонения, возникающего в результате изменения расхода насоса, и отклонения, возникшего из-за изменения скорости подложки.

Разделив члены уравнения (16) на  $h$ , имеем:

$$\Delta h / h = \Delta h_Q / h + h_{V_n} / h$$

или

$$E = E_Q + E_{V_n}. \quad (17)$$

Из уравнения (15) следует, что  $\Delta h$  может быть равным нулю и, следовательно,  $h$  может быть постоянной только в двух случаях: либо  $\Delta Q$  и  $\Delta V_n$  должны быть равными нулю, либо они должны иметь один знак. Для определения абсолютной величины приращения расхода насоса либо скорости подложки, при которых бы сохранилась постоянная толщина слоя, приравняем нулю правую часть уравнения (15)

$$Q_H / V_n \cdot S \cdot \Delta Q + (-Q / S \cdot V_n' / V_n^2) \Delta V_n = 0,$$

$$Q_H / V_n \cdot S \cdot \Delta Q = Q / S \cdot V_n' / V_n^2 \cdot \Delta V_n,$$

отсюда

$$\Delta Q = Q / V_n \cdot V_n' / Q_H \cdot \Delta V_n, \quad (18)$$

$$\Delta V_n = V_n / Q \cdot Q_H / V_n' \cdot \Delta Q. \quad (19)$$

Уравнения (18) и (19) позволяет на основании заданной функциональной зависимости расхода  $Q$  от времени и скорости движения подложки найти поправочные функции на расход насоса либо на скорость движения подложки.

Регулирование ширины капиллярных щелей экструзионной головки (рис.1) производится следующим образом: для увеличения первой щели на каком-либо ее участке регулировочной втулку 3, расположенную против этого участка, вращают по часовой стрелке со стороны накладки. При этом втулка упирается в корпус вакуумной камеры 2 и нижняя часть рабочей пластины 1 прогибается влево, а свободная верхняя часть – вправо. Для уменьшения ширины щели втулки 3 необходимо вращать против часовой стрелки, при этом втулка упирается в коренную пластину 5 и нижняя часть рабочей пластины прогибается вправо, а верхняя часть – влево.

Необходимо учитывать, что кроме отклонений от прямолинейности образующих экструзионной щели пластин, связанных с процессом их изготовления, в капиллярных щелях возможны отклонения, причиной которых является деформации, вызванные внутренней перекристаллизацией и силами веса пластин.

### Выводы

Проведен анализ факторов, влияющих на точность нанесения жидкостного слоя фотоэмульсии на полимерную пленку при производстве кино- и фотоматериалов. Представлены расчетные зависимости для определения соответствующих погрешностей. Предложена схема регулировки щели экструзионной головки.

**Анотація.** Проведено аналіз факторів які впливають на точність нанесення рідинного шару фотоэмульсії на полімерну плівку при виробництві кіно- та фотоматеріалів екструзійним способом. Виявлені основні гідродинамічні та технологічні фактори які визначають товщину шару який наноситься. Отримані розрахункові залежності які дозволяють встановити вплив витрати емульсії і швидкості руху полімерної підкладки на товщину шару який наноситься. Запропонована конструктивна схема регулювання формуючої капілярної щілини екструзійного пристрою який застосовується у виробництві кіно- та фотоматеріалів.

**Ключові слова:** регулювання щілини екструзійної головки; товщина шару який наноситься.

**Abstract.** Analysis of factors affecting the accuracy of application of the photoemulsion fluid layer on the polymer film in the production of film and photographic materials by the extrusion method was given. Basic hydrodynamic and technological factors determining the thickness of the applied coating were identified. It has been shown that the coating thickness for the investigated structure of the die head is a function of two variables: the output of pump and velocity of the polymer film. Calculated dependences allowing determining the effect of the emulsion flow rate and motion speed of the polymer support on the thickness of the applied layer were obtained. The reasons for straightness errors forming the extrusion gap of the plate, associated with the process of their manufacturing were identified. There was proposed the constructive regulatory scheme of the molding capillary gap of extrusion apparatus used in the production of film and photographic materials, which provides air-tightness of the head and the ability to control the width of the forming channels. Production tests of extrusion dies showed an improvement in the photoemulsion coating uniformity across the width of the polymer support.

**Keywords:** regulation of the gap of the extrusion head; applied layer thickness.

### Библиографический список использованной литературы

1. Торнер Р. В. Основные процессы переработки полимеров (теория и методы расчета). / Р. В. Торнер // - М. : Химия, 1972. – 452 с.
2. Воронцов Е. Г. Локальная толщина орошающей пленки на входном участке. / Е. Г. Воронцов, О. М. Яхно // - Журн. прикл. механики и техн. физики. – 1974. - № 4. – С.64-69.
3. Каминер А. А. Гидромеханика в инженерной практике. / А. А. Каминер, О. М. Яхно // — К.: Техника, 1987. — 175 с.
4. Сомов Н. Н. О форме струи, вытекающей из капилляра на наклонную плоскость экструдера поливной машины. / Н. Н. Сомов, С. М. Леви, К. Д. Вачагин, Р. Ш. Акопов // Журн. науч. и прикл. Фотографии и кинематографии. — 1972. – Т. 15. № 6. – С. 21-23.

5. Тушканов Д. А. Нелинейные волны в капиллярных пленках на наклонной поверхности при малых углах наклона. / Д. А. Тушканов, В. Я. Шкадов // Тезисы конфер. «Современные проблемы аэрогидродинамики». – М.: Изд. Моск. ун-та. – 2003. – С. 69.
6. Тазюков Ф. Х. Исследование формы жидкой пленки наносимой на твердую подложку. / Ф. Х. Тазюков, Ф. Р. Карибулина, Т. Аль Смади // Материалы межрегиональной научно-практич. конф. «Инновационные процессы в области образования, науки и производства». – Нижнекамск. – 2004. – С. 159-162.
7. Гарифуллин Ф. А. Исследование формы жидкой пленки наносимой на твердую подложку. / Ф. А. Гарифуллин, Ф. Х. Тазюков, Т. Аль Смади, Ф. Р. Карибулина, А. Г. Кутузов, А. Ф. Вахитов // Вестник Казанского технологического университета, - 2003. - № 1. С. 357-361.
8. Якутенок В. А. Численное моделирование в плоской постановке растекания капли. / В. А. Якутенок, М. А. Пономарева, В. А. Архипов // Известия ВУЗов. Физика. – 2006. – Т. 49. – с. 172-176.
9. Гарифуллин Ф. А. Численное моделирование течения упруговязкой жидкости на выходе из капилляра. / Ф. А. Гарифуллин, Ф. Х. Тазюков, Т. Аль Смади, Ф. Р. Карибулина, А. Г. Кутузов, А. Ф. Вахитов // Вестник Казанского технологического университета, - 2003. - № 1. С. 362-367.
10. Тушканов Д. А. Нелинейные волны в двухслойных пленках. / Д. А. Тушканов, В. Я. Шкадов // Вестник Моск. ун-та. Сер. 1. Матем. Механ. – 2004. - № 2. – С. 51-57.
11. Сисоев Г. М. Пространственное развитие неустойчивых возмущений в течениях капиллярных пленок. / Г. М. Сисоев, Д. А. Тушканов, В. Я. Шкадов // Тезисы конфер. «Современные проблемы аэрогидродинамики». – М.: Изд. Моск. ун-та. – 2002. – С. 58.

#### References

1. Torner R. V. Osnovnyye protsessy pererabotki polimerov (teoriya i metody rascheta) (The main processes of polymer processing (theory and methods of calculation)). Moscow, Khimiya, 1972, 452 p.
2. Vorontsov Ye. G., Yakhno O. M., Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. 1974, no 4, pp. 64-69.
3. Kaminer A. A., Yakhno O. M. Gidromekhanika v inzhenernoy praktike (Gidromihanika in engineering practice). Kiev, Tekhnika, 1987, 175 p.
4. Somov N. N., Levi S. M., Vachagin K. D., Akopov R. SH. O forme strui, vytekayushchey iz kapillyara na naklonnyuyu ploskost' ekstrudera polivnoy mashiny (On the shape of the jet flowing out of the capillary on the inclined plane of the extruder irrigation machines). Journal of Scientific and Applied Photography and Cinematography. 1972, T. 15, no 6, pp. 21-23.
5. Tushkanov D. A., Shkadov V. YA. Nelineynnye volny v kapillyarnykh plenkakh na naklonnoy poverkhnosti pri malykh uglakh naklona (Nonlinear waves in capillary films on an inclined surface at small angles of inclination). Tezisy konfer. «Sovremennyye problemy aerogidrodinamiki». Moscow, Izd. Mosk. un-ta., 2003, p. 69.
6. Tazyukov F. KH., Karibulina F. R., Smadi T. Al'. Issledovaniye formy zhidkoy plenki наносимой на tverduyu podlozhku (Investigation of the shape of the liquid film applied to a solid substrate). Materialy mezhregional'noy nauchno-praktich. konf. «Innovatsionnyye protsessy v oblasti obrazovaniya, nauki i proizvodstva». Nizhnekamsk. 2004. pp. 159-162.
7. Garifullin F. A., Tazyukov F. KH., Smadi T. Al', Karibullina F. R., Kutuzov A. G., Vakhitov A. F. Issledovaniye formy zhidkoy plenki наносимой на tverduyu podlozhku (Investigation of the shape of the liquid film applied to a solid substrate). Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta, 2003, no 1, pp. 357-361.
8. Yakutenok V. A., Ponomareva M. A., Arkhipov V. A. Chislennoye modelirovaniye v ploskoy postanovke rastekaniya kapli (Numerical simulation of a flat statement of spreading droplets). Izvestiya VUZov, Fizika, 2006, T. 49, pp. 172-176.
9. Garifullin F. A., Tazyukov F. KH., Smadi T. Al', Karibullina F. R., Kutuzov A. G., Vakhitov A. F. Chislennoye modelirovaniye techeniya uprugovязkoy zhidkosti na vykhode iz kapillyara (Numerical simulation of viscoelastic fluid at the outlet of the capillary). Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta, 2003, no 1, pp. 362-367.
10. Tushkanov D. A., Shkadov V. YA. Nelineynnye volny v dvukhsloynnykh plenkakh (Nonlinear waves in two-layer films). Vestnik Mosk. un-ta. Ser. 1. Matem. Mekhan., 2004, no 2, pp. 51-57.
11. Sisoyev G. M., Tushkanov D. A., Shkadov V. YA. Prostranstvennoye razvitiye neustoychivykh vozmushcheniy v techeniyakh kapillyarnykh plenok (Spatial development of unstable disturbances in the flow of capillary films). Tezisy konfer. «Sovremennyye problemy aerogidrodinamiki». Moscow. Izd. Mosk. un-ta., 2002, p. 58.

Подана до редакції 04.02.2015