

УДК 655.3.022.3:004.94

**О. Л. Благодир, Е. М. Величко**Издательско-полиграфический институт  
Национального технического университета Украины  
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»**ВЛИЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНОЙ ЭНЕРГИИ ПЕЧАТНОЙ ФОРМЫ  
И ВЯЗКОСТИ КРАСКИ НА КРАСКОПЕРЕНОС ВО ФЛЕКСОГРАФИИ**

В данном исследовании предложена имитационная модель процесса краскопереноса с ячейки анилоксого вала на гибкую фотополимерную печатную форму. Модель построена на использовании уравнений Навье – Стокса для вязкой несжимаемой жидкости с соответствующими граничными условиями на свободной границе жидкости. Решение этих уравнений осуществлялось посредством метода конечных элементов.

Для учета возможности изменения поверхностной энергии фотополимерной печатной формы вследствие износа или отработки больших тиражей в имитационной модели использовались различные значения краевых углов смачивания печатной формы.

Путем математического моделирования проведено исследование влияния поверхностной энергии печатной формы на коэффициент краскопереноса во флексографической печати. Серия моделирований с различными краевыми углами показала, что свойства смачиваемости печатной формы имеют большое влияние на процесс краскопереноса из ячеек анилоксого вала.

Кроме того, проанализирована динамика течения жидкости из ячейки анилоксого вала на печатную форму при изменении вязкости флексографической краски. Результаты моделирования показали значительное влияние угла смачивания печатной формы и изменение вязкости краски на коэффициент краскопереноса.

**Ключевые слова:** моделирование, краскоперенос, краевые углы смачивания, анилоксый вал, флексография.

**O. L. Blagodir, Ye. M. Velichko**Institute of Publishing and Printing National Technical University  
of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”**THE EFFECT OF THE PRINTING PLATE SURFACE ENERGY AND INK  
VISCOSITY ON INK TRANSFER PROCESS IN FLEXOGRAPHIC PRINTING**

In the presented study, simulation model of ink transfer process from anilox roll cell to the printing plate has been developed. This model is based upon Navier – Stokes differential equations with appropriate equations for fluid boundary conditions. The solutions of the Navier – Stokes equations have been obtained using finite element methods.

To record the possible change of the surface energy of the flexographic printing plate due to its wear or working out long runs, different values of the printing plate contact angle have been used in the simulation model.

Research of surface energy influence on the ink transfer ratio in flexographic printing has been conducted by simulation study. A series of simulations with different contact angles has shown that the wettability properties of the printing plate have a great impact on the ink transfer process from the anilox cells.

In addition the fluid dynamics from the cell of anilox roll on the printing plate has been analysed while changing the viscosity of the flexographic ink. The simulation results have shown a significant effect of the printing plate contact angle and the change in the viscosity on ink transfer ratio.

**Key words:** simulation, ink transfer, contact angles, anilox roller, flexographic printing.

**Введение.** Математическое моделирование — мощный инструмент, который интегрирован в проектирование, разработку и контроль эксплуатационных характеристик составляющих любого печатного процесса. Сегодня такой инструмент активно внедряют для исследования движения жидкостей на микроуровне. Его использование позволяет спрогнозировать результаты поведения краски в процессе переноса с анилоксого вала на печатную форму.

**Основная часть.** Исследованию процесса краскопереноса во флексографской печати уделяется значительное внимание со стороны отечественных и зарубежных ученых. В частности, проблемы краскопереноса в системе анилоксый валик – флексографская форма – запечатываемый материал освещены в работах [1, 2], где авторы анализируют влияние давления и скорости печати на коэффициент краскопереноса.

Значительная часть исследований приходится на краскоперенос в глубокой офсетной печати [3–7]. В частности, это обусловлено использованием данного способа печати при изготовлении печатной электроники. Флексография нашла широкое применение для печати на различных невпитывающих поверхностях и упаковке. Благодаря свойствам фотополимерных печатных форм, флексография также используется для изготовления сенсоров и гибкой электроники, поскольку позволяет печатать на любых поверхностях. Такое широкое использование флексографии приумножает важность моделирования процессов краскопереноса для данного способа печати.

При моделировании краскопереноса можно учесть ключевые параметры влияния на динамику движения краски, а именно: поверхностное натяжение, вязкость краски и краевые углы смачивания поверхностей печатной формы и растрового валика. Для упрощения моделирования во многих исследованиях рассматривается процесс краскопереноса между двумя параллельными плоскостями [3, 8]. Недостатком такой модели является пренебрежение геометрией ячейки анилоксосового вала и, как следствие, неточность прогнозирования количества краски, переносимой на печатную форму. Однако существуют исследования [9, 10] глубокого и глубокого офсетного способов печати, в которых процесс краскопереноса моделируется с ячейкой глубокой печатной формы на поверхность запечатываемого материала или офсетного резинотканевого полотна.

Поскольку анилоксосовый вал по своим свойствам и структуре микрогеометрии можно сравнить с печатной формой глубокой печати, научные подходы, предложенные в математических моделях [5, 9], могут быть использованы при моделировании краскопереноса в зоне контакта анилоксосового вала и флексографской печатной формы.

Анализ научных трудов показал, что процессы краскопереноса во флексографской печати недостаточно исследованы и требуют дальнейшего анализа с учетом характерных параметров и особенностей флексографии.

Таким образом, целью данной работы было разработать компьютерную модель процесса краскопереноса, которая позволит прогнозировать количество перенесенной краски из ячеек вала на печатную форму с учетом характеристик контактирующих поверхностей печатной формы и анилоксосового вала; установить зависимости коэффициента краскопереноса от поверхностной энергии печатной формы и вязкости краски.

В данном исследовании предложена имитационная модель для моделирования краскопереноса из ячеек анилоксосового вала на печатную

форму. Для целей расчета рассматривается перенос краски в пределах упрощенной геометрии по сравнению с реальной флексографской печатью. Предлагается рассматривать сложное вращательное движение поверхностей формного цилиндра и анилоксосового вала как поступательное движение поверхности первого относительно неподвижной поверхности последнего. Такое упрощение обосновано малыми размерами ячеек растрового вала, поскольку радиус анилоксосового вала гораздо больше размеров ячейки.

На рис. 1 изображена схематическая модель краскопереноса между неподвижной трапециевидальной ячейкой и движущейся вверх плоскостью, расположенной относительно нее на фиксированном начальном расстоянии.

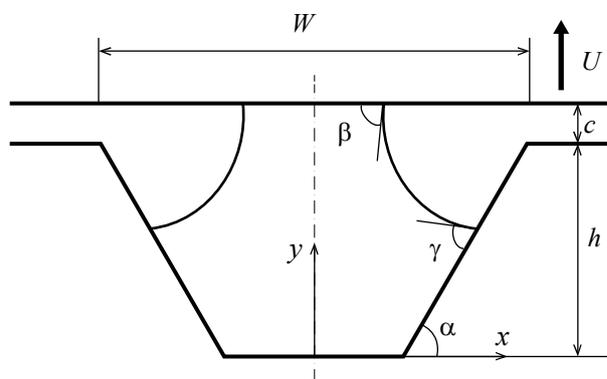


Рис. 1. Схематическая модель процесса краскопереноса между ячейкой анилоксосового вала и печатной формой

Данная модель представляет процесс краскопереноса из ячеек вала на печатную форму. В целях уменьшения количества расчетов моделирование проводилось для осесимметричного варианта данной модели, что позволило вдвое уменьшить количество элементов расчетной сетки. При моделировании учитывалась только нормальная составляющая скорости, поскольку, учитывая малое значение скоростей смещения и вращения, ими можно пренебречь.

Процесс краскопереноса с анилоксосового вала на печатную форму описывается уравнениями Навье – Стокса для вязкой несжимаемой жидкости [11]:

$$\frac{d\mathbf{u}}{dt} = -(\mathbf{u}\nabla)\mathbf{u} + \mu\Delta\mathbf{u} - \frac{1}{\rho}\nabla P + \mathbf{f}, \quad (1)$$

$$\nabla\mathbf{u} = 0,$$

где  $\mathbf{u} = (u, v)$  векторное поле скоростей;  $\nabla$  — оператор набла;  $\mu$  — вязкость;  $\Delta$  — оператор Лапласа;  $\rho$  — плотность;  $P$  — давление;  $\mathbf{f}$  — векторное поле массовых сил.

Для решения этих уравнений используются методы конечно-разностной аппроксимации

для нахождения значений давления и скорости для каждого элемента расчетной сетки.

Моделирование свободных поверхностей является сложной задачей в любой вычислительной среде, поскольку параметры потока жидкости (плотность, вязкость, скорость и давление) дискретные и определяются количеством элементов расчетной сетки. Зона краски представляет собой ньютоновскую жидкость с плотностью  $\rho$ , вязкостью  $\mu$  и поверхностным натяжением  $\sigma$ . Поскольку зона воздуха имеет незначительную плотность и вязкость по отношению к краске, ею можно пренебречь. Этот подход уменьшает количество вычислений, так как в большинстве случаев детали движения газа неважны для движения гораздо более сложной краски. При моделировании в случаях  $t = 0$  рассматривается система в состоянии равновесия, тогда свободная поверхность является статическим мениском между ячейкой и формой со статическими краевыми углами смачивания  $\gamma$  и  $\beta$  соответственно. Свободная поверхность становится одной из внешних границ краски. Правильное определение граничных условий на свободной поверхности имеет большое значение для точного отслеживания ее динамики. С этой целью используется метод объема жидкости Volume of Fluid (VOF) [12]. Его основой является дробная функция  $\phi$  — относительный объем жидкости. При  $\phi = 1$  область заполнена краской, при  $\phi = 0$  — газом. Свободная поверхность — набор точек, в которых  $0 < \phi < 1$ . Уравнение переноса для функции  $\phi$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \mathbf{u} \nabla \phi = 0. \quad (2)$$

Сила поверхностного натяжения выражена как

$$\mathbf{f} = \sigma \mathbf{k}_n, \quad (3)$$

где  $\sigma$  — коэффициент поверхностного натяжения;  $\mathbf{k}$  — изгиб свободной поверхности;  $\mathbf{n}$  — единичный вектор нормали свободной поверхности. Величины  $\mathbf{n}$  и  $\mathbf{k}$  вычисляются следующим образом:

$$\mathbf{n} = \frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|}, \quad (4)$$

$$\mathbf{k} = -\nabla \mathbf{n}. \quad (5)$$

Граничные условия прилипания применены для печатной формы и ячейки вала. Поскольку модель является симметричной, граничное условие симметрии используется для линии центра ячейки, чтобы уменьшить количество вычислений на 50%. Зона моделирования поделена на квадратные элементы расчетной сетки, в каждом из которых осуществляются расчеты скорости и давления.

Параметры, неизменяемые в данной серии моделирований, представлены в таблице. Моделирование с указанными параметрами соответствует краскопереносу с анилоксогового вала линиатурой 177 лин/см, емкостью  $5,27 \text{ см}^3/\text{м}^2$  при скорости печати 5 м/с.

### Параметры моделирования

Плотность краски, $\rho$	1000 кг/м <sup>3</sup>
Коэффициент поверхностного натяжения, $\sigma$	0,03 Н/м
Скорость движения верхней плоскости, $U$	0,1 м/с
Краевой угол смачивания стенок ячейки, $\gamma$	60°
Глубина ячейки, $h$	15 мкм
Ширина ячейки, $w$	54 мкм
Начальное расстояние между ячейкой и плоскостью, $c$	0,5 мкм
Угол наклона стенок ячейки, $\alpha$	60°
Количество элементов расчетной сетки по горизонтали	70
Количество элементов расчетной сетки по вертикали (в начальный момент времени)	26

Поскольку поверхностная энергия фотополимерных печатных форм может меняться вследствие износа или отработки больших тиражей [13], моделирование было проведено с учетом различной смачиваемости поверхности печатной формы. Для этого значение краевого угла смачивания  $\beta$  изменялось в пределах от 30° (хорошая смачиваемость) до 90° (плохая смачиваемость). Кроме того, исследовано влияние различных вязкостей краски ( $\mu_1 = 0,01 \text{ Па}\cdot\text{с}$ ,  $\mu_2 = 0,02 \text{ Па}\cdot\text{с}$ ,  $\mu_3 = 0,03 \text{ Па}\cdot\text{с}$ ) на коэффициент краскопереноса.

На рис. 2 представлены результаты моделирования в виде зависимостей коэффициента краскопереноса от краевого угла смачивания печатной формы  $\beta$  при различной вязкости краски  $\mu$ .

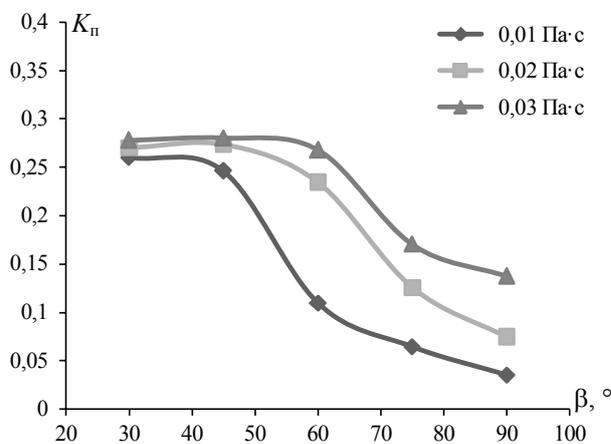


Рис. 2. Зависимость коэффициента краскопереноса от угла смачивания печатной формы

Коэффициент краскопереноса рассчитывается как

$$K_n = \frac{V_k}{V_{\text{общ}}}, \quad (6)$$

где  $V_k$  — объем краски, перенесенной на печатную форму;  $V_{\text{общ}}$  — общий объем краски в ячейке.

Как видно по рис. 2, с увеличением угла смачивания печатной формы коэффициент краскопереноса уменьшается нелинейно. Наибольший коэффициент краскопереноса ( $K_n = 0,27$ ) получен при угле смачивания печатной формы  $30^\circ$ . Это объясняется высокой смачиваемостью печатной формы и, как следствие, большим участком прилипания краски к ней. В то же время угол  $90^\circ$  соответствует низкой смачиваемости печатной формы, которую можно наблюдать в результате отработки больших тиражей, при этом размер участка смачивания краской уменьшается и наблюдается существенное уменьшение  $K_n$  в 2–5 раз по сравнению с  $K_n$  при угле  $30^\circ$ . Результаты моделирования показали, что при увеличении вязкости краски коэффициент краскопереноса увеличивается. Это можно объяснить, проанализировав движение жидкости из ячейки на печатную форму. С увеличением

вязкости наблюдается увеличение времени растяжения краски, а зона высокого давления, которая приводит к разрыву краски, находится дальше от верхней плоскости по сравнению с меньшей вязкостью. За счет этого количество краски, перенесенной на форму, увеличивается.

**Заключение.** Предложенная имитационная модель процесса краскопереноса позволяет спрогнозировать динамику движения краски из ячейки анилоксового вала на печатную форму с учетом параметров контактирующих поверхностей. В данном исследовании установлены зависимости влияния поверхностной энергии печатной формы и вязкости краски на коэффициент краскопереноса во флексографской печати. Результаты моделирования показали, что при увеличении смачиваемости печатной формы и вязкости краски коэффициент краскопереноса растет. Следовательно, для обеспечения стабильной дозировки краски с анилоксового вала на печатную форму можно поддерживать поверхностную энергию печатной формы с помощью обработки ее поверхности специальными средствами, а также настраивать вязкость краски таким образом, чтобы получить необходимое значение коэффициента краскопереноса.

### Литература

1. Луцків Н. М., Стемпень К. Моделирование передачи краски в системе растровый цилиндр – флексографская форма – запечатываемый материал // Квалілогія книги. 2009. № 2. С. 101–109.
2. Луцків М., Стемпень К. Моделювання перенесення фарби з флексографічної форми на задрукуваний матеріал // Поліграфія і видавнича справа. 2008. № 2 (48). С. 141–152.
3. Huang W., Lee S., Sung H. J., Lee T. Simulation of liquid transfer between separating walls for modeling micro-gravure-offset printing // International Journal of Heat and Fluid Flow, 2008, no. 29, pp. 1436–1446. DOI: 10.1016/j.ijheatfluidflow. 2008.07.002.
4. Ahmed D. H., Sung H. J., Kim D.-S. Simulation of non-Newtonian ink transfer between two separating plates for gravure-offset printing. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2011, vol. 32, no. 1, pp. 298–307. DOI: 10.1016/j.ijheatfluidflow. 2010.06.011.
5. Campana D. M., Carvalho M. S. Numerical simulation of liquid emptying of micro-cavities as a model of gravure printing applications // 22nd International Congress of Mechanical Engineering (COBEM 2013). Ribeirão Preto, 2013, pp. 10159–10170.
6. Ghadiri F., Ahmed D. H., Sung H. J., Shirani E. Non-Newtonian ink transfer in gravure-offset printing // International Journal of Heat and Fluid Flow, 2011, vol. 32, no. 1, pp. 308–317.
7. Sankaran A. K., Rothstein J. P. Effect of viscoelasticity on liquid transfer during gravure printing // Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 2012, vol. 175–176, pp. 64–75.
8. Hizir F. E., Hardt D. E. Effect of Substrate Contact Angle on Ink Transfer in Flexographic Printing // Comsol Conference. Boston, 2014.
9. Ahmed D. H., Kang H. W., Sung H. J. Non-Newtonian effect on ink transfer for gravure-offset printing // IEEE International Symposium on Assembly and Manufacturing. Suwon, 2009, pp. 165–166.
10. Campana D. M., Carvalho M. S. Liquid transfer from single cavities to rotating rolls // Journal of Fluid Mechanics, 2014, vol. 747, pp. 545–571. DOI: 10.1017/jfm. 2014.175.
11. Acheson D. J. *Elementary fluid dynamics*. Oxford: Clarendon Press, 1990. 408 p.
12. Hirt C., Nichols B. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries // Journal of Computational Physics, 1981, vol. 39, no. 1, pp. 201–225. DOI: 10.1016/0021-9991(81)90145-5.
13. Зоренко О. В., Розум О. Ф. Декелі в офсетному друкарському процесі. Київ: ВПЦ «Київський університет», 2008. 168 с.

### References

1. Lutskiv N. M., Stempen' K. Simulation of ink transfer in the system of raster cylinder – flexographic plate – printed substrate. *Kvalilogiya knigi* [Book kvalilology], 2009, no. 2, pp. 101–109 (In Russian).
2. Lutskiv N. M., Stempen' K. Simulation of ink transfer from the flexographic plate to the substrate. *Poligrafiya i vidavnicna sprava* [Printing & Publishing], 2008, vol. 48, no. 2, pp. 141–152 (In Ukraine).
3. Huang W., Lee S., Sung H. J., Lee T. Simulation of liquid transfer between separating walls for modeling micro-gravure-offset printing. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2008, no. 29, pp. 1436–1446. DOI: 10.1016/j.ijheatfluidflow. 2008.07.002.
4. Ahmed D. H., Sung H. J., Kim D.-S. Simulation of non-Newtonian ink transfer between two separating plates for gravure-offset printing. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2011, vol. 32, no. 1, pp. 298–307. DOI: 10.1016/j.ijheatfluidflow. 2010.06.011.
5. Campana D. M., Carvalho M. S. Numerical simulation of liquid emptying of micro-cavities as a model of gravure printing applications. *22nd International Congress of Mechanical Engineering (COBEM 2013)*. Ribeirão Preto, 2013, pp. 10159–10170.
6. Ghadiri F., Ahmed D. H., Sung H. J., Shirani E. Non-Newtonian ink transfer in gravure-offset printing. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2011, vol. 32, no. 1, pp. 308–317 (In English).
7. Sankaran A. K., Rothstein J. P. Effect of viscoelasticity on liquid transfer during gravure printing. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 2012, vol. 175–176, pp. 64–75 (In English).
8. Hizir F. E, Hardt D. E. Effect of Substrate Contact Angle on Ink Transfer in Flexographic Printing. *Comsol Conference*. Boston, 2014.
9. Ahmed D. H., Kang H. W., Sung H. J. Non-Newtonian effect on ink transfer for gravure-offset printing. *IEEE International Symposium on Assembly and Manufacturing*. Suwon, 2009, pp. 165–166.
10. Campana D. M., Carvalho M. S. Liquid transfer from single cavities to rotating rolls. *Journal of Fluid Mechanics*, 2014, vol. 747, pp. 545–571. DOI: 10.1017/jfm. 2014.175.
11. Acheson D. J. *Elementary fluid dynamics*. Oxford, Clarendon Press Publ., 1990. 408 p.
12. Hirt C., Nichols B. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. *Journal of Computational Physics*, 1981, vol. 39, no. 1, pp. 201–225. DOI: 10.1016/0021-9991(81)90145-5.
13. Zorenko O. V., Rozum O. F. *Dekeli v ofsetnomu drukars'komu protsesi* [Dekels in the offset printing process]. Kyiv, VPTs “Kievskiy universitet” Publ., 2008. 168 p.

### Информация об авторах

**Благодир Ольга Леонидовна** — аспирантка кафедры репрографии. Издательско-полиграфический институт Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикирского» (03056, г. Киев, ул. Янгеля, 1/37, Украина). E-mail: olha.blagodir@gmail.com

**Величко Елена Михайловна** — доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой репрографии. Издательско-полиграфический институт Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикирского» (03056, г. Киев, ул. Янгеля 1/37, Украина). E-mail: reprografy15@gmail.com

### Information about the authors

**Blagodir Ol'ga Leonidovna** — PhD student, the Department of Reprography. Institute of Publishing and Printing National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” (1/37, Yangelya str., 03056, Kiev, Ukraine). E-mail: olha.blagodir@gmail.com

**Velichko Yelena Mikhaylovna** — DSc (Engineering), Professor, Head of the Department of Reprography. Institute of Publishing and Printing National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” (1/37, Yangelya str., 03056, Kiev, Ukraine). E-mail: reprografy15@gmail.com

*Поступила 02.03.2016*