

## ПЕРКОЛЯЦИЯ ТИПОГРАФСКОЙ КРАСКИ В ПОРИСТОЙ СТРУКТУРЕ БУМАГИ

Кулак М. И., Старченко О. П.

*In work the model of penetration of a printing ink in porous space of a paper is offered. Porous space it is considered as fractal cluster. The model allows to present more full the mechanism of fastening of a ink on a print. It can be useful to quality assurance of a press.*

Проблема проникновения жидкостей через пористые среды, в частности бумагу, постоянно находится в центре внимания как теоретиков, так и специалистов, занимающихся прикладными разработками. Развитие высоких технологий стимулировало возрастание интереса к исследованию проницаемости стохастических пористых систем.

К наиболее существенным факторам, обуславливающим механизм и параметры процесса проникновения высоковязких жидкостей в пористые среды, относятся анизотропия и стохастический характер структуры таких сред, возможность их деформирования в процессе проникновения жидкости, нелинейность вязких свойств жидкостей [1–3].

Значение ряда характеристик объема и поверхности бумаги зависит от однородности ее структуры. В первую очередь это такие характеристики как пористость, проницаемость, впитываемость, гладкость бумаги и др. Все они тесно связаны с пористой структурой бумаги и считаются традиционными при оценке ее пространственной структуры. Применение фрактального подхода дает возможность учесть влияние на коэффициент проницаемости бумаги ее неоднородности.

В рамках модели извилистых капилляров считают [1, 2], что коэффициент проницаемости пористой среды линейно-вязкой жидкостью равен

$$K = k \frac{P}{\beta}, \quad (1)$$

где  $k$  — коэффициент проницаемости элементарной поровой ячейки;  $P$  — пористость среды;  $\beta$  — коэффициент извилистости капилляров.

Выражение для определения  $k$  получено в [3]

$$k = \frac{1}{3\pi} \int_0^{\pi} (\sqrt{2} - \sin \varphi)^3 d\varphi. \quad (2)$$

Поскольку бумага по структуре представляет собой фрактальный кластер, то плотность убывает по степенному закону [3]:

$$\rho(r) = \rho_0 \left( \frac{r}{r_0} \right)^{D-d}, \quad (3)$$

где  $D$  — фрактальная размерность поверхности бумаги;  $\rho_0$  — плотность материала частиц кластера;  $r_0$  — средний радиус частиц;  $d$  — евклидова размерность пространства.

Тогда в соответствии с (3), пористость можно ввести как

$$P(x) = 1 - \rho(x) = 1 - x^{D-d}. \quad (4)$$

Для определения коэффициента извилистости капилляров  $\beta$  можно воспользоваться соотношением [3], представляющим увеличение пути  $l$ , проходимого возбуждением за счет диффузии и случайных блужданий на фрактальных решетках.

Известно [4], что в таких случаях диффузионный фронт имеет фрактальную структуру, характеризуемую размерностью  $G$ . Множество траекторий частиц проникающей в волокнистую систему жидкости образуют гиперкластер с топологической размерностью  $H$ . Диффузионный фронт можно трактовать как пересечение фрактального кластера порового пространства с размерностью  $D_P$  и гиперкластера траекторий. Выражение для  $l$  имеет вид:

$$l = h^{\frac{H}{d}} T^{-\frac{\nu H}{d}}, \quad (5)$$

где  $\nu$  — критический индекс радиуса корреляции кластера пор.

Параметр  $T$  определяется следующим образом:

$$T = |(P - P_c) / (1 - P_c)|, \quad (6)$$

где  $P_c$  — критическая пористость, т. е. пористость при которой в системе начинается перколяция жидкости.

Топологические размерности  $H$ ,  $G$  и  $D_{II}$  связаны между собой простой зависимостью

$$H = G - D_{II} + d. \quad (7)$$

Окончательное выражение для коэффициента извилистости порового пространства имеет вид:

$$\beta = \frac{l}{h} = h^{\frac{H}{d}-1} T^{-\frac{\nu H}{d}}. \quad (8)$$

Учитывая (4) и (8), окончательное выражение для коэффициента проницаемости  $K$  можно представить следующим образом:

$$K = \frac{(1 - x^{D-d})}{3\pi} h^{1-\frac{H}{d}} T^{\frac{\nu H}{d}} \int_0^{\pi} (\sqrt{2} - \sin \varphi)^3 d\varphi. \quad (9)$$

Методы теории фракталов позволяют учесть сложные нелинейные взаимосвязи параметров структуры и физико-механических свойств бумаги, как стохастической волокнистой системы. Они базируются на учете флуктуаций плотности и подчеркивают их определяющую роль в технологических процессах связанных с проникновением краски в бумагу и картон.

Зависимость количества краски на оттиске от давления в печатном контакте является основной в процессе печати и во многих случаях может служить характеристикой правильности проведения технологического процесса. Для типографской печати эта зависимость была исследована в [5]. Однако закономерность передачи краски на начальной стадии процесса печатания установить не удалось.

С точки зрения современных структурных представлений процесс проникновения печатной краски в бумагу на начальной стадии можно считать процессом перколяции жидкости в неоднородной пористой среде. Этот процесс существенно зависит от реологических свойств краски. Восприятие краски, распределение ее в бумаге — одно из основных явлений взаимодействия краски и бумаги, протекающее в обоих периодах процесса и определяющее скорость закрепления краски и качество оттиска.

Для того чтобы судить о характере течения краски и ее вязкости в процессе печатания, т. е. при больших рабочих скоростях, когда интенсивные механические воздействия разрушают тиксотропную структуру краски, необходимо проанализировать реальные опытные данные. Для этой цели нами были взяты опытные данные полученные Л. А. Козаровицким в процессе исследования красок в большом интервале скоростей деформаций вплоть до областей, заведомо обеспечивающих предельное разрушение структуры [3, 5].

Тот факт, что экспериментальные данные о вязкости краски в процессе печатания хорошо аппроксимируются линейными уравнениями регрессии подтверждает, что о полиграфических красках в процессе печати можно говорить как о ньютоновских жидкостях. Исключение, вероятно, составляют только краски для специальных видов печати, таких как трафаретная, тампопечать, ризография и т. п. То есть это те виды печати в которых уже сам характер печатных форм, а также специфика нанесения краски на запечатываемый материал предполагает ненарушенную структуру печатной краски.

Выражение для расхода  $Q$  при фильтрации краски через щелевой капилляр в соответствии с законом Дарси имеет вид:

$$Q = -\frac{K}{\mu_0} \left( \frac{dp}{dx} \right). \quad (10)$$

Для продавливания высоковязких жидкостей через узкие щели необходимо приложить значительное давление  $p_0$ . Суммарное давление на выходе, как правило, мало по сравнению с  $p_0$ , поэтому будем полагать, что

$$\left| dp/dx \right| \approx p_0/x. \quad (11)$$

Подставим в (10) выражения (11), (7) и (8):

$$Q = -\frac{k\Pi}{\mu_0} h^{1-\frac{H}{d}} T^{\frac{vH}{d}} \left( \frac{p_0}{x} \right). \quad (12)$$

В существующих подходах по изучению распределения давления по ширине полосы контакта, а также изучению ее ширины от диаметров цилиндров и жесткости декеля во внимание принимают только влияние геометрии [6], а такие факторы, как структура печатающих поверхностей и запечатываемого материала, не учитываются. Поэтому изучение влияния неоднородности структуры поверхностей печатного контакта на распределение давления и расход краски, учитывая геометрию печатного контакта, является актуальным. В данной работе учитывается неоднородный характер деформации более эластичного цилиндра, следствием чего является изменение давления по длине полосы контакта и, соответственно, перераспределение расхода краски.

В [7, 8] был установлен закон распределения напряжений в приповерхностных слоях листа бумаги. Зависимость напряжения от деформации для бумаги различных видов имеет нелинейный характер, что обусловлено сильной неоднородностью модулей упругости. При дальнейшем развитии теории была учтена цилиндрическая форма поверхностей в зоне печатного контакта, а также многослойность декельной композиции. Кроме того, были сделаны расчеты для реальных декельных композиций, подтверждающие высказанное предположение о решающем влиянии неоднородности структуры поверхностей печатного контакта на распределение давления [8-10].

Для того чтобы определить время контакта запечатываемого материала с офсетным полотном обратимся к рис. 1. Из треугольника  $O_1GO_2$  найдем  $\angle\varphi$ , который равен половине угла, соответствующего ширине площадки контакта печатной пары. Для этого найдем расстояние между осями офсетного и печатного цилиндров, учитывая что радиусы цилиндров равны,  $R_1 = R_2 = R$

$$O_1O_2 = 2R - \lambda_{\max}. \quad (13)$$

Тогда отрезок  $BO_1$  (расстояние от оси печатного цилиндра до центральной точки зоны контакта) будет равно

$$BO_1 = \frac{2R - \lambda_{\max}}{2} = R - \frac{\lambda_{\max}}{2}. \quad (14)$$

Рассмотрев треугольник  $O_1BG$ , найдем  $\cos\varphi$

$$\cos\varphi = \frac{BO_1}{R} = \frac{R - \frac{\lambda_{\max}}{2}}{R} = 1 - \frac{\lambda_{\max}}{2R}. \quad (15)$$

Из формулы (15) выразим  $\angle\varphi$

$$\varphi = \arccos\left(1 - \frac{\lambda_{\max}}{2R}\right). \quad (16)$$

В частности для листовых офсетных печатных машин типа Доминант угол, соответствующий ширине площадки контакта печатной пары, будет равен

$\angle\varphi = 0,09$  рад  $\approx 5^\circ$ . Угол найден при значении радиусов цилиндров печатной пары  $R = 100$  мм и максимальной деформации эластичной покрышки  $\lambda_{\max} = 0,2$  мм.

Угловую скорость вращения цилиндров  $\omega$  можно выразить как  $\omega = \varphi / t_{\text{кон}}$  или  $\omega = 2\pi n$ , где  $n$  — частота вращения. Время контакта запечатываемого материала с офсетным полотном определяется по формуле

$$t_{\text{кон}} = \varphi / \omega = \varphi / 2\pi n. \quad (17)$$

Если учесть, что рабочая скорость печати на печатной машине Доминант соответствует  $n = 7000$  об/ч, то время контакта при заданных выше условиях будет составлять  $t_{\text{кон}} = 7,322 \times 10^{-3}$  с.

Интерес представляет и численное значение ширины самой площадки контакта  $b$ . Из треугольника  $O_1GH$  видно, что  $b = GH$ , тогда

$$\begin{aligned} b = GH &= 2\sqrt{R^2 - BO_1^2} = 2\sqrt{R^2 - \left(R - \frac{\lambda_{\max}}{2}\right)^2} = \\ &= 2\sqrt{R^2 - R^2 + 2\frac{R\lambda_{\max}}{2} - \frac{\lambda_{\max}^2}{4}} = \sqrt{\lambda_{\max}(4R - \lambda_{\max})}. \end{aligned} \quad (18)$$

Для тех же числовых значений радиуса и максимальной деформации ширина полосы контакта составляет  $b = 8,94$  мм.

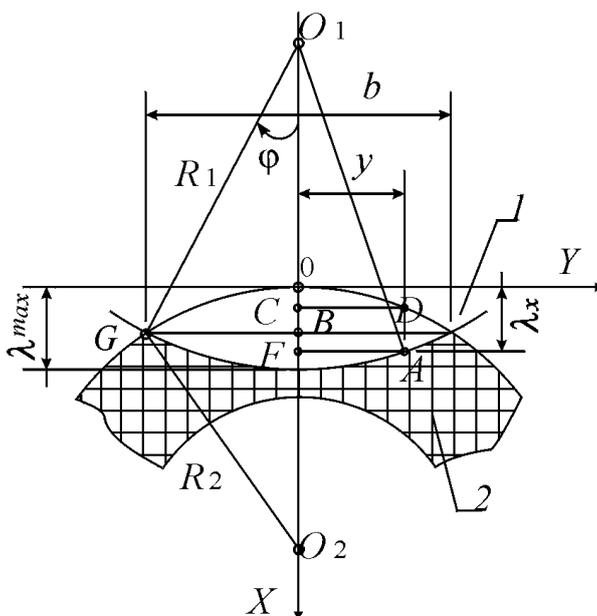


Рис. 1. Схема деформации упругой покрышки цилиндра:  
1 — жесткий цилиндр; 2 — цилиндр с эластичной оболочкой;  
 $R_{1,2}$  — радиусы жесткого цилиндра и цилиндра с эластичной оболочкой

Массу краски, которая перейдет с офсетного полотна на бумагу (или другой запечатываемый материал) можно представить в виде

$$M_6 = Q_0 S t_{\text{кон}} \rho_{\text{кр}}, \quad (19)$$

где  $M_6$  — масса печатной краски;  $Q_0$  — расход краски;  $S$  — площадь запечатываемой поверхности;  $\rho_{\text{кр}}$  — плотность краски.

Тогда расход будет равен

$$Q_0 = \frac{M_6}{S t_{\text{кон}} \rho_{\text{кр}}}. \quad (20)$$

Масса краски, находящаяся на офсетном полотне, рассчитывается по формуле

$$M_{\phi} = S h_{\phi} \rho_{кр}, \quad (21)$$

где  $h_{\phi}$  — толщина слоя краски на полотне.

Известно, что коэффициент перехода краски — это отношение массы краски на бумаге к массе краски на офсетном полотне

$$K_{п} = \frac{M_{б}}{M_{\phi}}. \quad (22)$$

Тогда с учетом (21) и (22) формула (19) преобразуется к виду

$$M_{б} = K_{п} M_{\phi} = K_{п} S h_{\phi} \rho_{кр}. \quad (23)$$

Используя формулы (20), (23), получим формулу для расчета расхода печатной краски

$$Q_0 = \frac{M_{б}}{S t_{кон} \rho_{кр}} = \frac{K_{п} S h_{\phi} \rho_{кр}}{S t_{кон} \rho_{кр}} = \frac{K_{п} h_{\phi}}{t_{кон}}. \quad (24)$$

Результаты расчетов расхода краски по формуле (24) приведены в табл. 1. В качестве исходных данных использовались значения коэффициентов перехода и толщины слоя краски на печатной форме, приведенные в [3].

Вид бумаги	$T_{бум.}$ , мкм	$D$	$h_{\phi}$ , мкм	$K_{п}$ , %	$Q_0$ , мкм/с	$Q_{max}$ , мкм/с	$h_{max}$ , мкм
Люми Арт, мелованная глянцевая	113	2,156	2,5	57,50	157,1	227,3	17
Юнион Силк, мелованная матовая	138	2,382	2,50	78,10	266,6	160,5	22
Газетная Балахнинского ЦБК	81	2,807	6,36	54,44	472,8	93,4	33
Офсетная № 1	84	2,737	4,00	50,00	273,1	42,2	60

Таблица 1. Характеристики печатной бумаги и расхода краски

Результаты расчета зависимости глубины проникновения краски от расхода для некоторых видов печатной бумаги представлены на рис. 2.

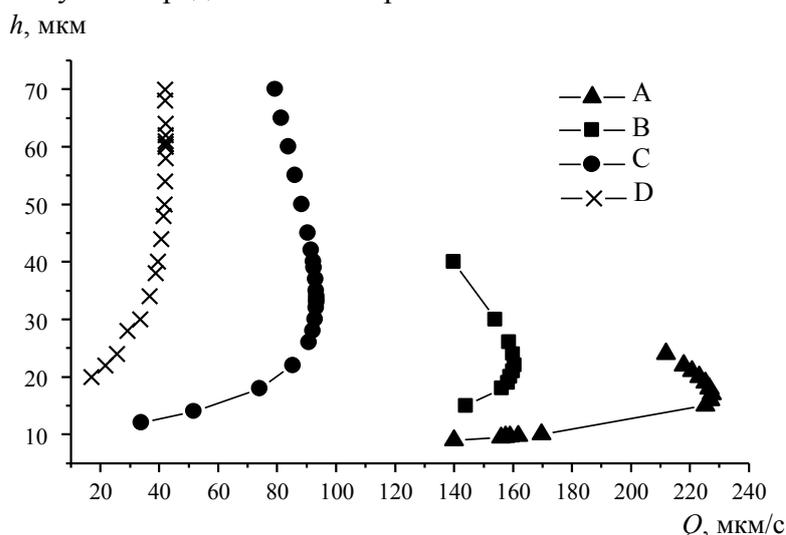


Рис. 2. Зависимость глубины проникновения краски от расхода для печатной бумаги:  
А — Люми Арт; В — Юнион Силк; С — газетная Балахнинского ЦБК; D — Офсетная № 1

Приведенные на рис. 2, а также в табл. 1 результаты подтверждают сложный механизм перехода и закрепления печатной краски на бумаге. Причем в зависимости от вида и структуры бумаги проявляет этот механизм себя по-разному.

Мелованная глянцевая бумага имеет наименее развитую структуру поверхности. Поэтому у этой бумаги глубина проникновения краски наименьшая. Однако и она не будет достигнута, поскольку количество перешедшей на бумагу краски, характеризуемое расходом  $Q_0$ , меньше  $Q_{\max}$ . Фактически при  $Q_0 = 157$  мкм/с глубина проникновения составит  $h = 10$  мкм.

Мелованная матовая бумага имеет более развитую поверхность,  $D = 2,382$ . Поскольку у этой бумаги  $Q_0 > Q_{\max}$ , то не вся краска, перешедшая на ее поверхность, проникнет в поровое пространство. Часть краски останется на поверхности.

Газетная и офсетная бумага имеют максимально развитую поверхность. Поровое пространство такой бумаги представлено сложной системой капилляров. Поэтому расход краски при ее проникновении в газетную и офсетную бумагу резко уменьшается, но глубина проникновения возрастает.

Предложенная в работе модель позволяет более полно представить механизм закрепления краски на оттиске, а также может быть полезна для контроля качества печати.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Хейфец Л. И., Неймарк А. В. Многофазные процессы в пористых средах. — М.: Химия, 1982. — 320 с.
2. Бернадинер М. Г., Ентов В. М. Гидродинамическая теория фильтрации аномальных жидкостей. — М.: Наука, 1975. — 200 с.
3. Кулак М. И. Фрактальная механика материалов. — Мн.: Выш. шк., 2002. — 304 с.
4. Федер Е. Фракталы. — М.: Мир, 1991 — 254 с.
5. Попрядухин П. А. Технология печатных процессов. — М.: Книга, 1968. — 360 с.
6. Митрофанов В. П., Тюрин А. А., Бирбраер Е. Г. Печатное оборудование. — М: Изд-во МГУП, 1999. — С. 23—28.
7. Кулак М. И., Старченко О. П. Расчет упругих свойств декеля с учетом фрактальной неоднородности поверхностей печатного контакта // Труды БГТУ: Издательское дело и полиграфия. — Минск, 2002. — Вып. 10. — С. 55—60.
8. Старченко О. П. Расчет упруго-прочностных свойств декельных композиций // Труды БГТУ: Издательское дело и полиграфия. — Минск, 2003. — Вып. 11. — С. 58—62.
9. Старченко О. П. Влияние неоднородности структуры поверхностей печатного контакта на распределение давления и расход краски // Труды БГТУ: Издательское дело и полиграфия. — Минск, 2004. — Вып. 12. — С. 51—54.
10. Старченко О. П. Фрактальная модель распределения давления в зоне печатного контакта. // Труды БГТУ: Издательское дело и полиграфия. — Минск, 2005. — Вып. 13. — С. 68—72.