УДК 519.72

Старченко О. П., ассистент

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ ПОРОВОГО ПРОСТРАНСТВА БУМАГИ НА ПЕРКОЛЯЦИЮ ПЕЧАТНОЙ КРАСКИ

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 claster. 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.

Изучение влияния неоднородности структуры поверхностей печатного контакта на распределение давления и расход краски, учитывая геометрию печатного контакта [1, 2], позволило разработать новую методику расчетов на базе фрактального подхода. Был рассмотрен неоднородный характер деформации более эластичного цилиндра, следствием чего является изменение давления по длине полосы контакта и, соответственно, перераспределение расхода краски.

В работе [3] на основании закона Дарси, используемого в качестве уравнения кинетики, и методов теории фракталов была рассмотрена модель фильтрации жидкой фазы в пористой среде (краска–бумага).

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 [4, 5].

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.

Значение ряда характеристик объема и поверхности бумаги зависит от неоднородности 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 [6, 7].

Целью данной работы является исследование на основании расчетов по построенной модели [1–3] влияния на расход и глубину проникновения краски таких факторов, как: вид и сорт используемой бумаги; вязкость краски и давление, возникающее в зоне печатного контакта.

Расчет расхода краски производился по формуле

$$Q_0 = \frac{M_б}{S\, t_{кон} \rho_{кр}} = \frac{K_п\, S\, h_ф\, \rho_{кр}}{S\, t_{кон} \rho_{кр}} = \frac{K_п\, h_ф}{t_{кон}}, \qquad (1)$$

где Q_0 — расход краски; $M_б$ — масса печатной краски, перешедшей на бумагу; S — площадь запечатываемой поверхности; $\rho_{кр}$ — плотность краски; $t_{кон}$ — время контакта запечатываемого материала с офсетным полотном; $K_п$ — коэффициент перехода краски; $h_ф$ — толщина слоя краски на офсетном полотне.

Результаты расчетов расхода краски Q_0 по формуле (1) приведены в таблице. В качестве исходных данных использовались значения коэффициентов перехода и толщины слоя краски на печатной форме, рассчитанные в [6].

Кроме того, в таблице две последние колонки содержат результаты расчета максимального расхода краски Q_{max} для однослойного декельного материала и ее глубину проникновения h_{max} по формуле

$$Q_{max} = \frac{k\Pi}{\eta} h^{1-\frac{H}{d}} T^{\frac{\nu H}{d}} \frac{16\lambda_{max}}{b^2 \delta_д} y E_1(y), \qquad (2)$$

где k — коэффициент проницаемости элементарной поровой ячейки; Π — пористость среды; η — вязкость предельно разрушенной структуры краски в результате раската; h — толщина листа бумаги; H — топологическая размерность гиперкластера, образованного диффузионным фронтом проникающей краски; ν — критический индекс радиуса корреляции кластера пор; d — размерность физического пространства; $\delta_д$ — толщина декеля; b — ширина полосы контакта; λ_{max} — максимальная деформация декеля; $E_1(y)$ — распределение модуля упругости по ширине зоны печатного контакта.

При расчете были приняты следующие значения входящих параметров. Коэффициент проницаемости элементарной поровой ячейки k с учетом того, что степень нелинейности краски после прохождения через развитый красочный аппарат печатной машины $s = 1$, равен $k = 1{,}489$.

При расчете множителя Π (распределение пор, пористости) было учтено, что евклидова размерность пространства $d = 3$, а фрактальная

Таблица

Характеристики печатной бумаги и расхода краски

Бумага	$T_{бум.}$, мкм	$h_ф$, мкм	$K_п$, %	Q_0, мкм/с	Q_{max}, мкм/с	h_{max}, мкм
Люми Арт, мелованная глянцевая	113	2,00	57,50	157,06	227,30	15,04
Юнион Арт, мелованная глянцевая	114	2,00	62,15	169,76	126,93	23,68
Люми Силк, мелованная матовая	129	2,50	76,70	261,88	105,31	24,03
Юнион Силк, мелованная матовая	138	2,50	78,10	266,66	160,55	15,94
Картон Малмеро	140	2,00	70,00	191,21	167,14	15,71
Офсетная № 1	84	4,00	50,00	273,10	42,20	71,43
Дата Копи	90	4,00	57,00	311,39	170,94	23,33
Офсетная Кондопогского ЦБК	81	4,00	58,00	316,85	93,36	40,74
Газетная Балахнинского ЦБК	94	6,36	54,44	472,87	21,80	100
Цветная газетная Балахнинского ЦБК	87	6,36	54,44	472,87	38,47	73,56

размерность порового пространства $D_п$ определялась с учетом фрактальной размерности поверхности бумаги для всех исследуемых сортов. Вязкость краски была принята 144 Пуаз.

Как видно из формулы (2), на множители h и T, входящие в состав формулы, влияние оказывает топологическая размерность H, которая связана с еще двумя размерностями G и $D_п$ [3]. Причем если $D_п$ — фрактальная размерность поверхности бумаги ранее уже была определена, то размерность G (размерность объема бумаги) определяется в процессе расчетов по формуле $G = 5 - D_п$. Это объясняется тем, что скелет бумаги и ее поровое пространство являются взаимными (взаимно дополняют друг друга). Таким образом при расчете используется фрактальная размерность скелета бумаги.

Остановимся на параметре T. Следует отметить, что этот параметр в процессе расчетов также определяется для каждого вида бумаги отдельно, так как пористость образцов бумаги различных сортов неодинакова.

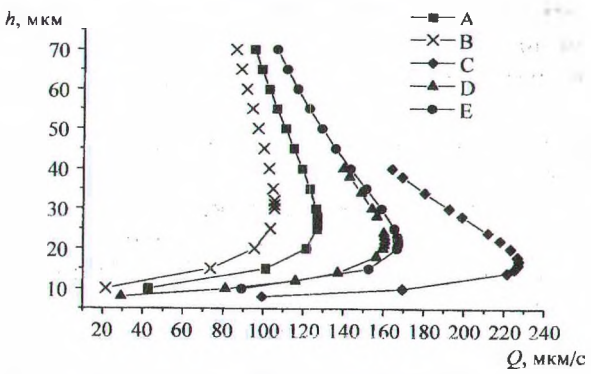

Рис. 1. Зависимость глубины проникновения краски от расхода для мелованной бумаги: A — бумага Юнион Арт; B — бумага Люми Силк; C — бумага Люми Арт; D — бумага Юнион Силк; E — картон Малмеро

Критическая пористость $П_c$, которая присутствует при расчете параметра T, была принята равной 0,31 [3], то есть тому ее значению, при котором в системе начинается перколяция жидкости.

Еще одной важной составляющей выражения для расчета расхода краски является давление. В качестве исходных данных было взято давление в середине ширины полосы печатного контакта, рассчитанное в [2].

На первом этапе рассчитывалась глубина проникновения краски от расхода при использовании однослойного декельного материала — офсетного полотна на основе натурального каучука с 30 весовыми частями канальной сажи в качестве наполнителя, E = 3,18 МПа.

Тот факт, что для газетной бумаги Балахнинского ЦБК максимальная глубина проникновения краски составила 100%, говорит о том, что при выбранных для расчета параметрах в качестве исходного режима печатания краска будет продавливаться насквозь.

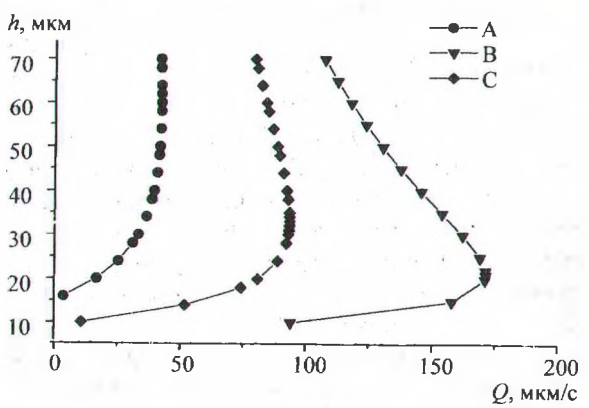

Рис. 2. Зависимость глубины проникновения краски от расхода для офсетной бумаги: A — бумага офсетная № 1; B — бумага Дата Копи; C — бумага Кондопогского ЦБК

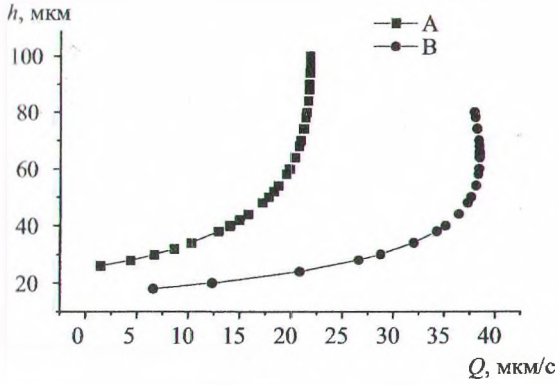

Рис. 3. Зависимость глубины проникновения краски от расхода для газетной бумаги: A — бумага Балахнинского ЦБК; B — цветная бумага Балахнинского ЦБК

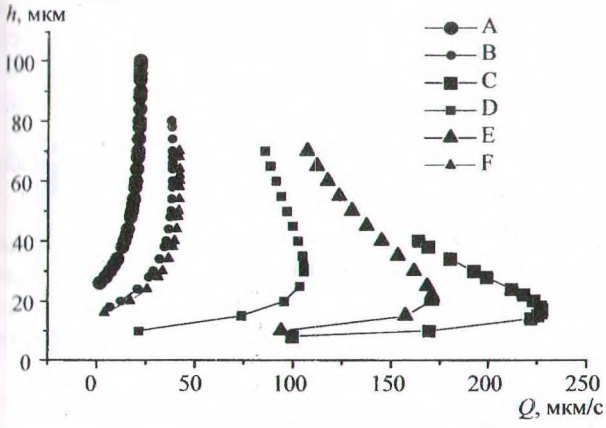

Рис. 4. Диапазоны зависимости глубины проникновения краски от расхода для мелованной, офсетной и газетной бумаги: A — газетная бумага Балахнинского ЦБК; B —газетная цветная бумага Балахнинского ЦБК; C — бумага Люми Арт; D — бумага Люми Силк; E — бумага Дата Копи; F — бумага офсетная № 1

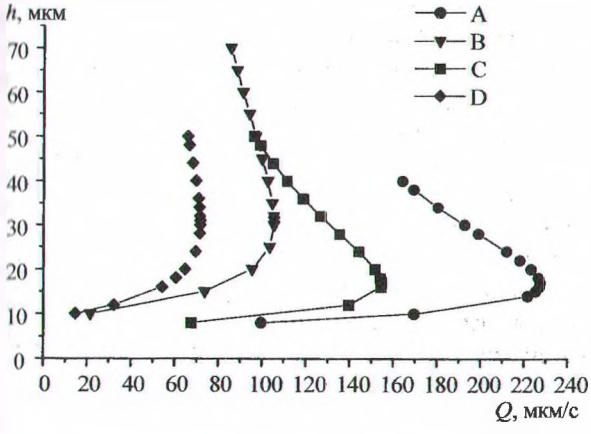

Рис. 5. Зависимость глубины проникновения краски различной вязкости от расхода для мелованной бумаги: A — бумага Люми Арт при вязкости краски 144 Пуаз; B — бумага Люми Силк при вязкости краски 144 Пуаз; C — бумага Люми Арт при вязкости краски 212 Пуаз; D — бумага Люми Силк при вязкости краски 212 Пуаз

Это объясняется некоторыми техническими показателями, характерными для газетной бумаги, такими как сравнительно небольшая толщина и малая степень проклейки.

Результаты расчета зависимости глубины проникновения краски от расхода для некоторых видов печатной бумаги представлены на рис. 1–3, а на рис. 4 приведены диапазоны зависимости глубины проникновения краски от расхода для мелованной, офсетной и газетной бумаги.

Приведенные на рис. 1–3, а также в таблице 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 Люми Арт имеет наименее развитую структуру поверхности. Поэтому, как видно из рис. 1, 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.

Некоторые характеристики мелованной печатной бумаги Юнион Арт очень близки по своим значениям, соответствующим характеристикам бумаги Люми Арт. Однако тот факт, что фрактальная размерность поверхности структуры глянцевой бумаги Юнион Арт несколько выше (на три десятые доли, что для такого показателя, как фрактальная размерность, довольно ощутимо), то и глубина проникновения ее больше, чем у бумаги Люми Арт.

Мелованная матовая бумага имеет еще более развитую поверхность, $D = 2{,}382$; $2{,}549$. 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.

Причем, если проанализировать более детально различные образцы офсетной бумаги (рис. 2), то видно, что чем меньше максимальный расход, тем на меньшую глубину будет проникать перешедшая с офсетного полотна на бумагу краска. Так, например, для офсетной бумаги Дата Копи с самой малоразвитой поверхностью структуры максимальное значение проникновения краски h_{max} составляет 21 мкм, в то время

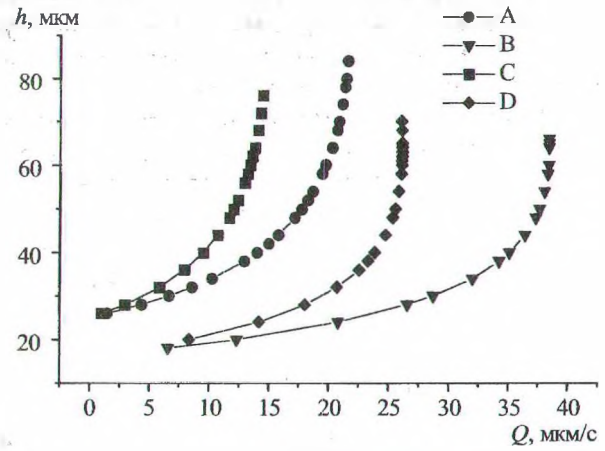

Рис. 6. Зависимость глубины проникновения краски различной вязкости от расхода для газетной бумаги: A — бумага Балахнинского ЦБК при вязкости краски 144 Пуаз; B — цветная бумага Балахнинского ЦБК при вязкости краски 144 Пуаз; C — бумага Балахнинского ЦБК при вязкости краски 212 Пуаз; D — цветная бумага Балахнинского ЦБК при вязкости краски 212 Пуаз

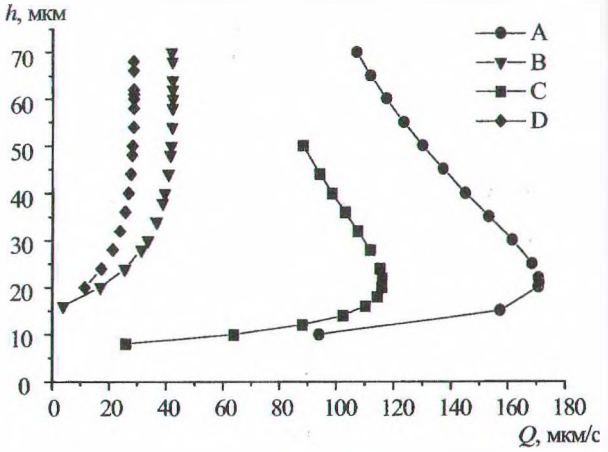

Рис. 7. Зависимость глубины проникновения краски различной вязкости от расхода для офсетной бумаги: A — бумага Дата Копи при вязкости краски 144 Пуаз; B — бумага Офсетная № 1 при вязкости краски 144 Пуаз; C — бумага Дата Копи при вязкости краски 212 Пуаз; D — бумага офсетная № 1 при вязкости краски 212 Пуаз

как для двух других образцов бумаги офсетной № 1 и Кондопогского ЦБК этот показатель равен соответственно 33 и 60 мкм.

Перейдем далее к сравнительному анализу зависимости глубины проникновения краски от расхода для мелованной, офсетной и газетной бумаги. Как видно из рис. 4, самый узкий интервал значений присущ газетной бумаге. Значительную роль играет в этом то, что различные сорта данного вида бумаги имеют более схожие показатели фрактальной размерности, т. е. характеризуются однотипностью поверхностных структур.

Диапазоны же значений расхода для мелованных и офсетных бумаг достаточно широки. Данный факт обусловлен в значительной мере технологией изготовления этих видов бумаги.

Печатная бумага представляет собой сложную гетерогенную структуру, состоящую из отдельных волокон, частиц наполнителя и других компонентов, свойства которой зависят от большого числа факторов, связанных с характером сырья и используемых вспомогательных материалов, с технологией и условиями их переработки, с технологическими параметрами отлива, прессования, сушки и отделки бумаги.

Этим объясняется то, что значения фрактальной размерности поверхности офсетной и особенно мелованной бумаги варьируются в довольно широких пределах [7], что, в свою очередь, обуславливает довольно широкий диапазон зависимости глубины проникновения краски от расхода для мелованной и офсетной бумаги.

Для получения теоретической оценки влияния вязкости краски на глубину ее проникновения и расход для различных видов бумаги были произведены расчеты при двух разных значениях этого показателя.

Так, в таблице приведены расчетные данные расхода краски по формуле (2) при значении вязкости краски 144 Пуаз. Далее в рамках рассматриваемого подхода были произведены аналогичные расчеты при вязкости краски 212 Пуаз.

На рис. 5–7 представлены зависимости глубины проникновения краски различной вязкости от расхода для мелованных, офсетных и газетных сортов бумаги. При увеличении вязкости краски на 47% увеличение расхода краски для различных сортов бумаги колеблется от 30 до 32%.

Так, для мелованной бумаги эта цифра соответствует 32% (как для бумаги Люми Арт, так и для бумаги Люми Силк). Увеличение расхода краски при использовании офсетной бумаги Дата Копи и увеличении вязкости краски на те же 47% составляет 30%, а для бумаги офсетной № 1 — 32%. Для двух рассматриваемых сортов газетной бумаги (обычной и цветной газетной бумаги Балахнинского ЦБК) расход краски изменяется на 32%.

Как видно из полученных графиков, для любых сортов бумаги характерен тот факт, что для достижения одной и той же глубины проникновения при использовании менее вязкой краски расход должен быть увеличен. При постоянном расходе глубина проникновения наиболее вязкой краски будет большей, что говорит о повышении ее способности проникать в структуру бумаги. Однако следует отметить, что характер зависимостей для всех сортов бумаги сохраняется.

Исследовав зависимость между давлением, глубиной проникновения и расходом краски, можно отметить, что по характеру кривые для одного сорта бумаги очень близки. Сравнение же этих зависимостей в пределах одного вида бумаги между собой позволяет заключить, что при увеличении давления расход краски возрастает.

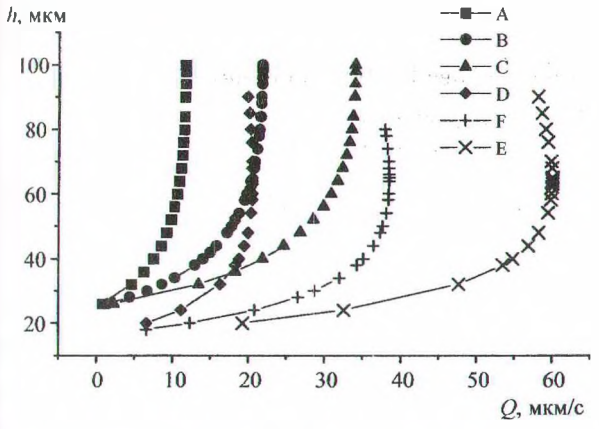

Рис. 8. Зависимость глубины проникновения краски от расхода для мелованной бумаги: A, B, C — бумага Люми Арт при давлении 0,111 МПа, 0,208 МПа и 0,325 МПа соответственно; D, E, F — бумага Люми Силк при давлении 0,111 МПа, 0,208 МПа и 0,325 МПа соответственно

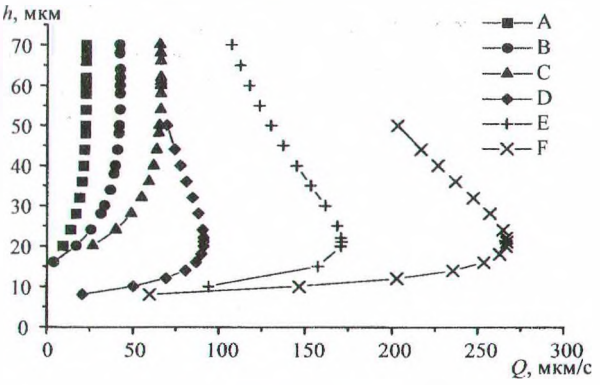

Рис. 9. Зависимость глубины проникновения краски от расхода для офсетной бумаги: A, B, C — бумага офсетная № 1 при давлении 0,111 МПа, 0,208 МПа и 0,325 МПа соответственно; D, E, F — бумага Дата Копи при давлении 0,111 МПа, 0,208 МПа и 0,325 МПа соответственно

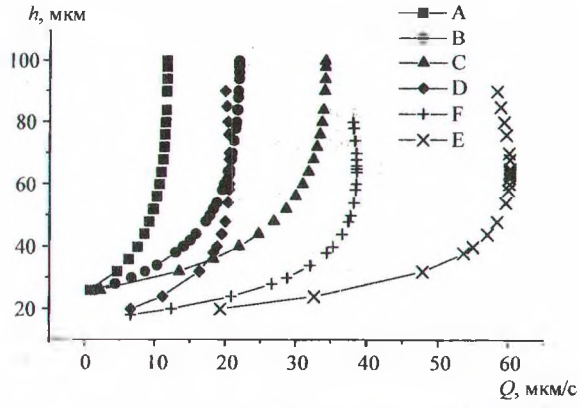

Рис. 10. Зависимость глубины проникновения краски от расхода для газетной бумаги: A, B, C — газетная бумага Балахнинского ЦБК при давлении 0,111 МПа, 0,208 МПа и 0,325 МПа соответственно; D, E, F — цветная газетная бумага Балахнинского ЦБК при давлении 0,111 МПа, 0,208 МПа и 0,325 МПа соответственно

Необходимо отметить также различие в глубине проникновения краски. В условиях изменения давления при печатании для достижения определенной глубины проникновения печатной краски при увеличении давления расход также необходимо увеличивать.

Так, например, для офсетной бумаги Дата Копи (см. рис. 9) для достижения глубины проникновения краски 20 мкм при давлении печатания 0,111 МПа необходимо, чтобы расход составлял 91,07 мкм/с. При увеличении давления до 0,208 МПа при той же глубине проникновения расход равен 170,65 мкм/с, при 0,325 МПа — 266,64 мкм/с.

Происходит это потому, что при увеличении давления печати краска заполняет и более мелкие поры бумаги. В результате возрастает объем порового пространства, занятого краской. Аналогичным образом ведут себя при изменении режима печатания и все остальные сорта бумаги.

Таким образом, проведенные исследования и расчеты еще раз продемонстрировали значимость фрактальной размерности как интегральной характеристики поверхностной структуры бумаги. Предложенная в работе модель позволяет более полно представить механизм закрепления краски на оттиске, а также может быть полезна для контроля качества печати.

Литература

1. Старченко О. П. Влияние неоднородности структуры поверхностей печатного контакта на распределение давления и расход краски // Труды БГТУ. Сер. IX. Издат. дело и полиграфия. — 2004. — Вып. XII. — С. 51–54.

2. Старченко О. П. Фрактальная модель распределения давления в зоне печатного контакта // Труды БГТУ. Сер. IX. Издат. дело и полиграфия. — 2005. — Вып. XIII. — С. 68–72.

3. Кулак М. И., Старченко О. П. Перколяция типографской краски в пористой структуре бумаги // Сб. Теоретическая и прикладная механика. — Мн.: БНТУ, 2005. — Вып. XIX. — С. 192–197.

4. Хейфец Л. И., Неймарк А. В. Многофазные процессы в пористых средах. — М.: Химия, 1982. — 320 с.

5. Бернадинер М. Г., Ентов В. М. Гидродинамическая теория фильтрации аномальных жидкостей. — М.: Наука, 1975. — 200 с.

6. Пиотух И. Г., Кулак М. И., Боброва О. П. Влияние фрактальных особенностей структуры на физико-механические свойства печатной бумаги // Труды БГТУ. Сер. VI. Физико-математические науки. — 2000. — Вып. VIII. — С. 73–81.

7. Кулак М. И., Боброва О. П., Пиотух И. Г. Взаимосвязь параметров структуры бумаги и давления печатного контакта // Труды БГТУ. Сер. VI. Физико-математические науки. — 2000. — Вып. VIII. — С. 82–92.