

Кулак М. И., профессор (БГТУ); Старченко О. П., ассистент (БГТУ);
Маслакова И. А., аспирант (БГТУ)

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА КРАЕВОЙ УГОЛ СМАЧИВАНИЯ БУМАГИ ПЕЧАТНОЙ КРАСКОЙ

В статье рассмотрено экспериментальное исследование температурного воздействия на краевой угол смачивания бумаги печатной краской. По результатам обработки эмпирических данных построены аппроксимирующие функции зависимости косинуса краевого угла смачивания от температуры краски для различных образцов бумаги и краски. Полученные результаты могут быть использованы для моделирования поведения краски в процессе сушки оттиска.

In the article it is considered the experimental research of the temperature influence on a limiting wetting angle of paper with printing ink. By means of processing of the empirical data approximating functions of cosine of limiting wetting angle depending on temperature of ink for various samples of paper and ink are constructed. The received results can be used for the modelling of ink behaviour in the drying process of print.

Введение. Взаимодействие бумаги и печатной краски, служащее основой печатного процесса, заключается в восприятии краски бумагой благодаря смачиванию, адгезии и ее проникновению в поровое пространство. Проникновение происходит в два этапа: 1) быстрое (10^{-2} с) заполнение краской внешних пор поверхности листа под давлением печатного контакта; 2) впитывание, т. е. самопроизвольная фильтрация краски через тонкие поры бумаги после выхода листа из зоны контакта.

Условия длительного взаимодействия бумаги и краски после получения оттиска определяют скорость и характер закрепления полученного изображения, распределение краски в приповерхностных и объемных слоях листа, явление просачивания краски на его обратную сторону.

В теории печатных процессов первостепенное значение имеет не только изучение физико-химических процессов, сопутствующих закреплению краски, но и анализ факторов, влияющих на продолжительность этого процесса, а также представление о возможностях ускорения процесса закрепления и предотвращения появления дефектов.

Поведение краски непосредственно в процессе получения оттиска определяется главным образом совокупностью ее реологических свойств. Реологические характеристики оказывают решающее воздействие на поведение краски и после получения оттиска, т. е. на этапе ее закрепления.

В механизме закрепления краски важную роль играют процессы тиксотропного структурообразования, т. е. соединения частиц и агрегатов пигмента в пространственную структурную решетку, или каркас. В процессе закрепления краски на первый план выступает взаимосвязь интенсивности процесса тиксотропного структурообразования и температуры краски, которая обусловила разработку и внедрение в практику печатания методов теплофизического воздействия на свежотпечатанный оттиск.

При выходе бумажного листа из зоны печатного контакта начинается период активного впитывания и фильтрации краски в поровом пространстве бумаги. Для ускорения закрепления

красок на этой стадии используется температурное воздействие, осуществляемое различными излучающими устройствами. Наибольшее применение в практике работы полиграфических предприятий находят тепловыделяющие устройства, в которых используются в качестве промежуточных теплоносителей нагретый воздух, горячая вода или открытое газовое пламя.

Капиллярное впитывание краски, отражающее кинетику проникновения жидкости в капилляр, определяется уравнением Уошборна [1]:

$$l = \sqrt{\frac{\sigma_{\text{ж}} r t \cos \theta}{2\eta}}, \quad (1)$$

где l — длина капилляра; $\sigma_{\text{ж}}$ — поверхностное натяжение краски; r — радиус капилляра; t — время; θ — краевой угол смачивания; η — вязкость краски.

Воздействие температуры влияет на капиллярное впитывание. От температуры зависят такие параметры, как поверхностное натяжение и вязкость краски, а также краевой угол смачивания.

Условием смачивания является превышение сил молекулярного притяжения между жидкостью и смачиваемой поверхностью F_{13} (адгезия) над силами притяжения между молекулами жидкости F_{11} (когезия) (рис. 1).

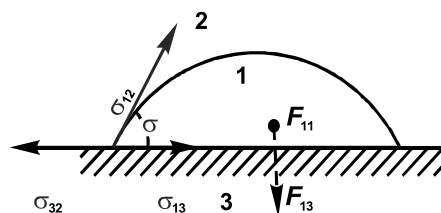


Рис. 1. Краевой угол смачивания: 1 — жидкость; 2 — воздух; 3 — твердое тело; F_{11} — сила притяжения молекул жидкости друг к другу; F_{13} — сила притяжения молекул жидкости к твердому телу

Тогда молекулы вытягиваются из объема жидкости и капля, нанесенная на поверхность, растекается по ней. Если же $F_{11} > F_{13}$,

то молекулы втягиваются внутрь жидкой фазы — капля стягивается и жидкость не смачивает поверхность.

Степень смачивания характеризуется равновесным краевым углом смачивания θ , величина которого определяется соотношением поверхностных натяжений на границе раздела трех фаз: жидкость — воздух σ_{12} , твердое тело — воздух σ_{23} и жидкость — твердое тело σ_{13} [1]:

$$\cos \theta = \frac{\sigma_{23} - \sigma_{13}}{\sigma_{12}}. \quad (2)$$

В исследованиях Л. А. Козаровицкого и Т. И. Гудковой [2] влияние температуры на реологические свойства краски было изучено на образцах быстрозакрепляющейся краски. Наиболее резкое падение вязкости (почти в пять раз) наблюдается при повышении температуры на 30 °С (от 20 до 50°). Дальнейшее такое же повышение температуры на 30° (от 50 до 80°) приводит к относительно небольшому снижению вязкости.

Количественных результатов о температурной зависимости краевого угла смачивания θ нет, поэтому необходимо проведение эксперимента и его статистическая обработка.

Основная часть. В ходе работы проведено экспериментальное исследование. Взятые образцы двух видов краски и четырех видов бумаги. Суть эксперимента заключается в нанесении капли краски на образец бумаги и съемке профиля капли цифровой камерой.

В исследовании использовался зеркальный цифровой фотоаппарат Sony Alpha DSLRA-A100 (светочувствительный элемент CCD, максимальное разрешение 3880×2600 dpi, количество пикселей 10,2 млн., диапазон выдержек 1/4000–30 с) с оптикой, предназначенной для макросъемки.

Примеры снимков представлены на рис. 2 и 3.

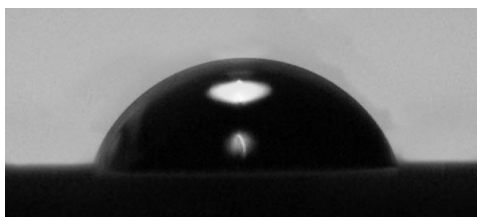


Рис. 2. Смачивание мелованной бумаги Lumi Art краской Rollo Term при комнатной температуре

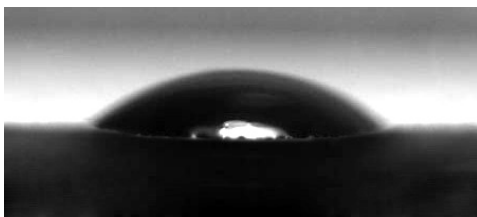


Рис. 3. Смачивание газетной бумаги краской Eхast при 90 °С с сушкой бумаги

Первый опыт проведен для печатной краски и образца бумаги комнатной температуры (23 °С). Поскольку рассматривается процесс сушки оттиска при выходе его из зоны печатного контакта, интерес представляет и температурная зависимость краевого угла смачивания при нагревании бумаги до температуры краски. Для последующих опытов печатная краска и один из двух образцов бумаги нагревались и выдерживались в термостате при определенной температуре, а затем капля наносилась на образец. Серии экспериментов проводились при 23, 40, 60, 80 и 90 °С для каждого образца бумаги.

Эксперименты проводились для образцов бумаги следующих видов: газетная бумага марки О (45 г/м²), офсетная бумага № 1 (80 г/м²), мелованные бумаги марок Lumi Art (100 г/м²) и Lumi Silk (100 г/м²). В качестве печатной краски использовалась офсетная краска Eхast и быстрозакрепляющаяся краска для ролевой газетной печати Rollo Term.

Полученные в результате проведения эксперимента снимки профилей капель краски обрабатывались с помощью инструментов программного пакета Adobe Photoshop с целью увеличения резкости. Затем в пакете CorelDraw были измерены краевые углы смачивания левой и правой стороны капли.

В ходе обработки экспериментальных данных в математическом пакете Mathcad были рассчитаны средние значения краевого угла смачивания образцов бумаги для каждой температуры. Поскольку для определения влияния температуры на капиллярное впитывание краски необходимы значения косинуса краевого угла смачивания, были также определены значения $\cos\theta$.

Данные для красок Eхast и Rollo Term представлены соответственно в табл. 1 и 2.

Таблица 1
Значения косинуса краевого угла смачивания образцов бумаги краской Eхast

Вид бумаги	cos θ				
	Без нагревания бумаги				
Температура, °С	23	40	60	80	90
Газетная	0,838	0,824	0,742	0,712	0,714
Офсетная	0,778	0,774	0,702	0,657	0,610
Lumi Art	0,529	0,554	0,562	0,494	0,574
Lumi Silk	0,570	0,571	0,560	0,550	0,473
С нагреванием бумаги					
Газетная	0,838	0,826	0,712	0,767	0,778
Офсетная	0,778	0,739	0,644	0,698	0,618
Lumi Art	0,529	0,515	0,558	0,458	0,480
Lumi Silk	0,570	0,605	0,642	0,527	0,545

Таблица 2
Значения косинуса краевого угла смачивания образцов бумаги краской Rollo Term

Вид бумаги	cosθ				
	Без нагревания бумаги				
Температура, °C	23	40	60	80	90
Газетная	0,705	0,707	0,615	0,588	0,667
Офсетная	0,633	0,631	0,605	0,559	0,653
Lumi Art	0,492	0,563	0,462	0,351	0,421
Lumi Silk	0,566	0,548	0,478	0,469	0,528
С нагреванием бумаги					
Газетная	0,705	0,719	0,630	0,638	0,677
Офсетная	0,633	0,717	0,603	0,647	0,606
Lumi Art	0,492	0,527	0,448	0,431	0,469
Lumi Silk	0,566	0,536	0,501	0,568	0,511

С помощью метода наименьших квадратов по полученным экспериментальным данным построены аппроксимирующие зависимости, а также рассчитаны коэффициенты регрессии с использованием математического пакета Mathcad. Зависимость влияния температуры на краевой угол смачивания бумаги печатной краской является гиперболической функцией следующего вида:

$$\cos\theta(T) = \frac{1}{a + b \cdot T} \quad (3)$$

Коэффициенты аппроксимирующих функций косинуса краевого угла смачивания бумаги печатными красками Exact и Rollo Term и расчетные критерии Фишера для проверки адекватности модели представлены в табл. 3 и 4.

Из анализа табл. 3 и 4 следует, что расчетные значения критерия Фишера не превышают табличного значения, равного 5,41, что свидетельствует об адекватности полученных моделей.

На рис. 4–7 представлены графики экспериментальных точек и аппроксимирующие температурные зависимости косинуса краевого угла смачивания θ образцов краской Exact с сушкой бумаги и без сушки.

Таблица 3
Аппроксимирующие функции косинуса краевого угла смачивания бумаги краской Exact

Вид бумаги	Аппроксимирующая функция					
	Без сушки бумаги			С сушкой бумаги		
	a	b	F	a	b	F
Газетная	1,124	$3,028 \times 10^{-3}$	0,193	1,179	$1,725 \times 10^{-3}$	2,929
Офсетная	1,121	$5,315 \times 10^{-3}$	0,185	1,205	$4,142 \times 10^{-3}$	0,544
Lumi Art	1,854	$-1,139 \times 10^{-4}$	0,806	1,762	$3,686 \times 10^{-3}$	0,124
Lumi Silk	1,599	$4,201 \times 10^{-3}$	0,213	1,601	$2,359 \times 10^{-3}$	0,064

Таблица 4
Аппроксимирующие функции косинуса краевого угла смачивания бумаги краской Rollo Term

Вид бумаги	Аппроксимирующая функция					
	Без сушки бумаги			С сушкой бумаги		
	a	b	F	a	b	F
Газетная	1,361	$2,916 \times 10^{-3}$	0,075	1,378	$1,890 \times 10^{-3}$	0,210
Офсетная	1,572	$9,416 \times 10^{-4}$	0,269	1,470	$1,638 \times 10^{-3}$	0,373
Lumi Art	1,603	0,011	0,027	1,889	$3,972 \times 10^{-3}$	1,054
Lumi Silk	1,729	$3,638 \times 10^{-3}$	0,050	1,788	$1,388 \times 10^{-3}$	0,136

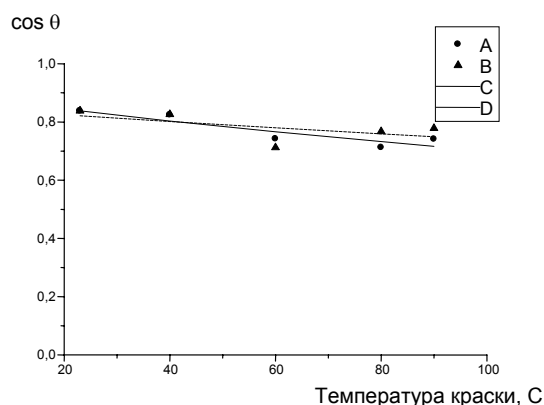


Рис. 4. Температурная зависимость краевого угла смачивания газетной бумаги краской Exact: А — экспериментальные значения для образцов, не подвергавшихся сушке; В — экспериментальные значения для нагретых образцов бумаги; С — аппроксимирующая функция для образцов, не подвергавшихся сушке; D — аппроксимирующая функция для нагретых образцов бумаги

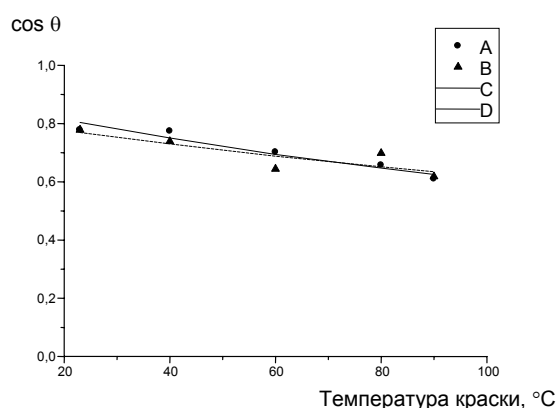


Рис. 5. Температурная зависимость краевого угла смачивания офсетной бумаги краской Exact: А — экспериментальные значения для образцов, не подвергавшихся сушке; В — экспериментальные значения для нагретых образцов бумаги; С — аппроксимирующая функция для образцов, не подвергавшихся сушке; D — аппроксимирующая функция для нагретых образцов бумаги

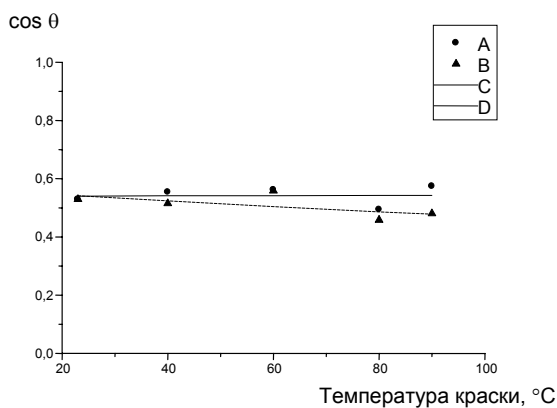


Рис. 6. Температурная зависимость краевого угла смачивания мелованной бумаги Lumil Art краской Exact: А — экспериментальные значения для образцов, не подвергавшихся сушке; В — экспериментальные значения для нагретых образцов бумаги; С — аппроксимирующая функция для образцов, не подвергавшихся сушке; D — аппроксимирующая функция для нагретых образцов бумаги

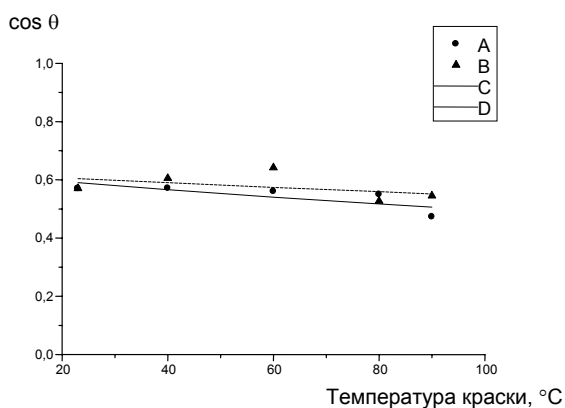


Рис. 7. Температурная зависимость краевого угла смачивания мелованной бумаги Lumil Silk краской Exact: А — экспериментальные значения для образцов, не подвергавшихся сушке; В — экспериментальные значения для нагретых образцов бумаги; С — аппроксимирующая функция для образцов, не подвергавшихся сушке; D — аппроксимирующая функция для нагретых образцов бумаги

Из графиков видно, что с ростом температуры краски косинус краевого угла смачивания уменьшается. При увеличении температуры краски Exact в 2,9 раза $\cos\theta$ уменьшается на 15% без сушки и на 7% с сушкой для газетной бумаги, на 22% и 21% соответственно для офсетной бумаги.

Для мелованных бумаг нагревание краски оказывает меньшее влияние на краевой угол смачивания из-за наличия меловального слоя, препятствующего более глубокому проникновению краски в бумагу. При увеличении темпе-

ратуры краски в 2,9 раза $\cos\theta$ увеличивается на 9% без сушки и уменьшается на 9% с сушкой для бумаги Lumil Art и, соответственно, уменьшается на 17% и 4% для Lumil Silk.

Аппроксимирующие зависимости косинуса краевого угла смачивания θ образцов краской Rollo Term от температуры и значения, полученные в ходе эксперимента, изображены на рис. 8–11.

Для краски Rollo Term при увеличении температуры в 2,9 раза $\cos\theta$ уменьшается на 5% без сушки и на 4% с сушкой для газетной бумаги, увеличивается на 3% и уменьшается на 4% соответственно для офсетной бумаги.

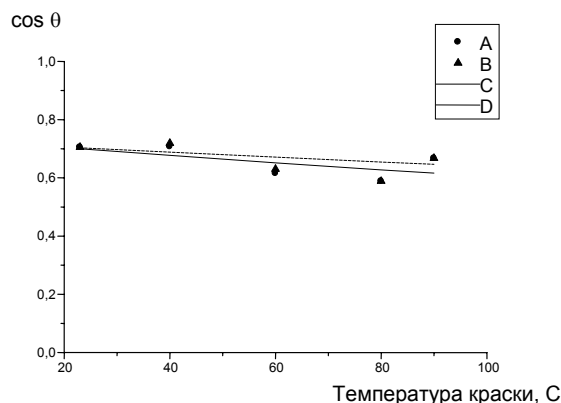


Рис. 8. Зависимость краевого угла смачивания газетной бумаги краской Rollo Term: А — экспериментальные значения для образцов, не подвергавшихся сушке; В — экспериментальные значения для нагретых образцов бумаги; С — аппроксимирующая функция для образцов, не подвергавшихся сушке; D — аппроксимирующая функция для нагретых образцов бумаги

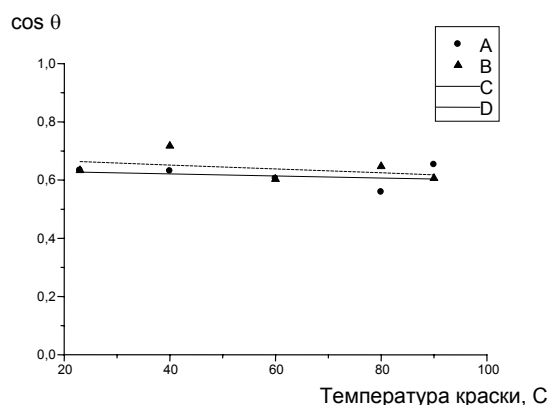


Рис. 9. Зависимость краевого угла смачивания офсетной бумаги краской Rollo Term: А — экспериментальные значения для образцов, не подвергавшихся сушке; В — экспериментальные значения для нагретых образцов бумаги; С — аппроксимирующая функция для образцов, не подвергавшихся сушке; D — аппроксимирующая функция для нагретых образцов бумаги

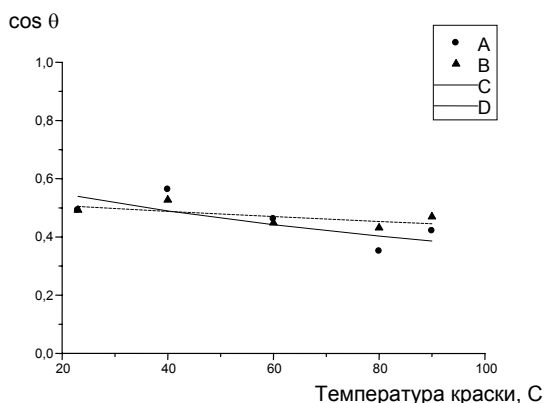


Рис. 10. Зависимость краевого угла смачивания мелованной бумаги Lumi Art краской Rollo Term: А — экспериментальные значения для образцов, не подвергавшихся сушке; В — экспериментальные значения для нагретых образцов бумаги; С — аппроксимирующая функция для образцов, не подвергавшихся сушке; D — аппроксимирующая функция для нагретых образцов бумаги

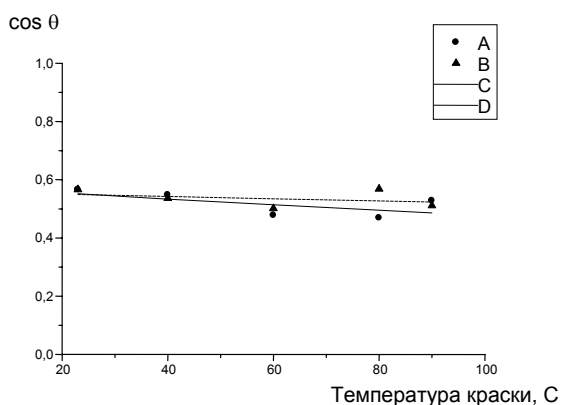


Рис. 11. Зависимость краевого угла смачивания мелованной бумаги Lumi Silk краской Rollo Term: А — экспериментальные значения для образцов, не подвергавшихся сушке; В — экспериментальные значения для нагретых образцов бумаги; С — аппроксимирующая функция для образцов, не подвергавшихся сушке; D — аппроксимирующая функция для нагретых образцов бумаги

Для мелованных бумаг увеличение температуры краски в 2,9 раза дает уменьшение $\cos\theta$ на 14% без сушки и на 5% с сушкой для бумаги Lumi Art и, соответственно, уменьшение на 7% и 10% для Lumi Silk.

Чтобы избежать чрезмерного проникновения краски в бумагу вплоть до перехода ее на оборотную сторону, подбор оптимальной температуры краски, влияющей на капиллярное

впитывание, должен осуществляться в некоторых температурных пределах с учетом используемых запечатываемых материалов.

Для оценки влияния температуры на краевой угол смачивания бумаги печатной краской рассчитываются температурные коэффициенты, представленные в табл. 5.

Таблица 5
Температурные коэффициенты краевого угла смачивания образцов бумаги краской

Вид бумаги	Температурный коэффициент			
	Exact		RolloTerm	
	Без сушки бумаги	С сушкой бумаги	Без сушки бумаги	С сушкой бумаги
Газетная	$1,85 \cdot 10^{-3}$	$8,96 \cdot 10^{-4}$	$5,67 \cdot 10^{-4}$	$4,18 \cdot 10^{-4}$
Офсетная	$2,51 \cdot 10^{-3}$	$2,39 \cdot 10^{-3}$	$2,99 \cdot 10^{-4}$	$4,03 \cdot 10^{-4}$
Lumi Art	$6,72 \cdot 10^{-4}$	$7,31 \cdot 10^{-4}$	$1,06 \cdot 10^{-3}$	$3,43 \cdot 10^{-4}$
Lumi Silk	$1,45 \cdot 10^{-3}$	$3,73 \cdot 10^{-4}$	$5,67 \cdot 10^{-4}$	$8,21 \cdot 10^{-4}$

Анализ температурных коэффициентов показывает, что изменение краевого угла смачивания при увеличении температуры вносит незначительный вклад в изменение капиллярного впитывания краски в бумагу по сравнению с температурными зависимостями вязкости и поверхностного натяжения краски.

Заключение. В результате проведения эксперимента и обработки полученных данных определено, что зависимость косинуса краевого угла смачивания бумаги печатной краской от температуры имеет вид гиперболической функции. Однако малые величины температурных коэффициентов угла смачивания свидетельствует о том, что температурная зависимость краевого угла смачивания оказывает незначительное влияние на первоначальное впитывание краски при сушке оттиска на выходе из зоны печатного контакта.

Проведенные исследования могут в дальнейшем использоваться в моделировании поведения краски на оттиске в процессе сушки, а также моделировании процесса растискивания растровых точек под действием температуры.

Литература

1. Шахкельдян, Б. Н. Полиграфические материалы / Б. Н. Шахкельдян, Л. А. Загаринская. — М.: Книга, 1988. — 328 с.
2. Козаровицкий, Л. А. Бумага и краска в процессе печатания / Л. А. Козаровицкий. — М.: Книга, 1965. — 368 с.

Поступила 22.03.2010