

## ВЗАИМОСВЯЗЬ СТРУКТУРЫ И ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ БУМАГИ

Кулак М. И., Медяк Д. М.

БГТУ, г. Минск, Республика Беларусь  
[kulak\\_m@yahoo.com](mailto:kulak_m@yahoo.com)

Бумага представляет собой сложный композиционный капиллярно-пористый коллоидный материал. Основу листа бумаги составляют специально обработанные волокна различного происхождения (растительные, искусственные, синтетические), подвергнутые химической, термической и механической обработке, а также некоторое количество вспомогательных веществ (наполнителей, красителей, смол и т. д.), которые добавляются в бумагу для придания ей требуемых свойств. В полиграфической промышленности сегодня доминирует офсетный способ печати, который допускает использование широкого спектра печатных видов бумаги: газетной, офсетной, мелованной. Все вышеназванные виды отличаются высоким содержанием целлюлозы растительного происхождения (порядка 99%) преимущественно хвойных пород деревьев.

Бумага, как гетерогенный материал, обладает неоднородностью структуры и свойств, поэтому учет всех факторов, влияющих на конечные свойства бумажного листа, достаточно сложен. Как правило, при описании свойств бумаги используются интегральные характеристики, которые позволяют «сгладить» результаты и получить общую картину свойств бумаги. При этом, учитывая скорость и степень точности работы современного оборудования, необходимо получать достаточно точные данные за очень малые промежутки времени, чтобы обеспечивать оперативность производства бумаги или печатной продукции.

Оптические методы исследования, с указанной точки зрения, являются наиболее прогрессивными и позволяют обеспечить оперативность вмешательства в процесс даже при больших скоростях работы машины. Анализ направлений развития изобретательской деятельности также показал, что наиболее разрабатываемым направлением является воздействие излучений на исследуемый объект, причем приоритет в данной области имеют способы, ориентированные на изучение отраженного излучения. Однако бумага, как достаточно тонкий листовый материал, обладает некоторой степенью прозрачности, что в ряде случаев может затруднить исследование отраженного пучка, например, в газетной технологии печати, где применяется бумага с малыми массами. Кроме того, исследование пропускания бумаги позволяет рационально расположить источник излучения и приемник, в то время как при изучении отражения необходимо достаточно объемное оборудование, позволяющее улавливать все отраженные потоки излучения. Тем не менее, очевидна целесообразность использования именно оптического метода при определении показателя фрактальной размерности. Данный показатель позволяет учесть характер исследуемого пространства, обладающего определенными (фрактальными) свойствами. В современной теории печатных процессов фрактальная размерность печатающей поверхности используется для расчета баланса краски [1].

В оптике пропускание  $T$  представляет собой отношение светового потока, прошедшего через тело,  $I$ , к потоку, упавшему на тело,  $I_0$ :

$$T = \frac{I}{I_0}. \quad (1)$$

Поток, прошедший через тело, определяется согласно закону Бугера-Ламберта по выражению:

$$I = I_0 e^{-\mu h}, \quad (2)$$

где  $\mu$  — коэффициент пропускания;  $h$  — толщина образца.

В соответствии с формулой (1) можно записать пропускание для целлюлозы:

$$T_u = e^{-\mu_u h_u}, \quad (3)$$

Для бумаги следует учесть факт отражения части излучения от ее поверхности, поэтому пропускание будет иметь вид:

$$T'_6 = \frac{I}{I_0 - I_{\text{отр}}}. \quad (4)$$

Учитывая, что отраженный поток излучения входит в выражение для расчета оптической плотности  $D$ :

$$D = -\lg\left(I_{\text{отр}}/I_0\right), \quad (5)$$

отраженный поток может быть определен через нее. Тогда выражение (4) с учетом (2) и (5) примет вид:

$$T'_6 = \frac{e^{-\mu_u h_u}}{(1 - 10^{-D})}. \quad (6)$$

Исходя из теории, изложенной в [1], коэффициент пропускания бумаги  $\mu_6$  можно выразить через коэффициент пропускания целлюлозы  $\mu_u$ :

$$\mu_6 = \mu_u + (\mu_n - \mu_u)(1 - R^{D_v - d}), \quad (7)$$

где  $\mu_n$  — коэффициент ослабления излучения в поровом пространстве материала;  $R$  — полутолщина материала в относительных единицах;  $D_v$  — объемная фрактальная размерность материала;  $d$  — размерность физического пространства, равная 3.

Поскольку поглощение излучения поровым пространством крайне мало, то им можно пренебречь, тогда формула (7) примет вид:

$$\mu_6 = \mu_u R^{D_v - d}. \quad (8)$$

Выразим из формулы (3)  $\mu_u$  и подставим в (8):

$$\mu_6 = \frac{-1}{h_u} \ln(T_u) R^{D_v - d}. \quad (9)$$

Подставив (9) в (6), получим выражение, связывающее пропускание образца и его объемную фрактальную размерность:

$$T'_6 = \frac{T_u \left(\frac{\mu_n R^{D_v - d}}{h_u}\right)}{(1 - 10^{-D})}. \quad (10)$$

Из формулы (10) фрактальная размерность выражается следующим образом:

$$D_v = \frac{\ln\left(\frac{h_u \ln(T'_6(1 - 10^{-D}))}{h_u \ln T_u}\right)}{\ln R} + d. \quad (11)$$

Однако в процессе первоначального восприятия краски непосредственно участвует только верхняя поверхность бумаги, поэтому большую ценность имеет определение поверхностной фрактальной размерности. Объемная и поверхностная фрактальные размерности связаны выражением:

$$D_{\Sigma} = D_V + D_S, \quad (12)$$

где  $D_{\Sigma}$  — предельная суммарная размерность физического пространства и плоскости, равная 5;  $D_S$  — фрактальная размерность поверхности (плоскости).

С учетом (12) выражение (11) можно представить в следующем виде:

$$D_S = D_{\Sigma} - d - \frac{\ln\left(\frac{h_u \ln(T_6(1 - 10^{-D}))}{h_6 \ln T_u}\right)}{\ln R}. \quad (13)$$

Экспериментально определение показателей фрактальной размерности производилось следующим образом. Образцы печатных видов бумаги просвечивались на лабораторной установке, оснащенной лазером с длиной волны 650 нм. Измерялась интенсивность падающего потока излучения и потока, прошедшего через образец. При расчетах также был учтен тот факт, что бумага, как материал, имеющий повышенную поверхностную гладкость, обладает свойством отражать падающее излучение, причем отраженный свет составляет 60–85% от падающего. Для этой цели был проведен эксперимент по исследованию отражения поверхности бумаги в красной области спектра с помощью промышленного спектроденситометра X-Rite-508. Расчеты были алгоритмизированы и производились на компьютере, результаты приведены в табл. 1.

**Таблица 1.** Экспериментальные и расчетные показатели для различных видов бумаги

Вид бумаги	Экспериментальные показатели			$D_S$
	$T_6$ , %	$h_6$ , мм	$D$	
Газетная бумага				
Балахнинского ЦБК	5,567	0,094	0,293	2,774
Цветная бумага Кондопогского ЦБК	7,903	0,087	0,355	2,878
АО «Волга»	7,799	0,089	0,228	2,799
Газетная	7,916	0,090	0,217	2,796
Офсетная бумага				
Офсетная № 1	6,610	0,084	0,097	2,596
Офсетная	7,079	0,090	0,089	2,617
Kaskad	4,780	0,140	0,070	2,639
Мелованная бумага				
Lumi Silk	3,233	0,129	0,075	2,405
Union Silk	3,166	0,138	0,063	2,408
Union Art	3,621	0,114	0,077	2,383
Kym Ex Cote	3,659	0,105	0,077	2,360
Kym Ex Cote Matt	2,764	0,161	0,080	2,450
Bereg Top Gloss	5,191	0,069	0,081	2,247
Bereg Top Silk	3,101	0,128	0,072	2,397
Magnomatt Satin	3,752	0,112	0,067	2,370
Мелованная	3,661	0,095	0,083	2,335
Magnostar	4,256	0,097	0,078	2,351

Анализируя данные, представленные в табл. 1, можно отметить, что наименьшие величины пропускания характерны для мелованной бумаги, затем следуют офсетные, и наибольшие величины — у газетной бумаги. Толщины газетной и офсетной бумаги близки, образцы мелованной имеют наибольшую толщину. Полученные результаты подтверждают теоретические сведения о различном составе и, соответственно, свойствах каждого вида бумаги. Белизна исследуемых образцов, определяемая в данном случае оптической плотностью, соответствует стандартным характеристикам изучаемых видов бумаги: наибольшей белизной обладает мелованная бумага (в результате высокого содержания наполнителей), приближена к ней офсетная бумага (также обладающая высокой степенью отбелики), наименее белая газетная бумага, имеющая высокий процент содержания древесной массы. Полученные расчетным путем показатели поверхностной фрактальной размерности демонстрируют значительную разницу характера поверхности у различных видов печатной бумаги: наименее развитой поверхностью обладает мелованная бумага вследствие большого содержания мелкодисперсных наполнителей, которые снижают порядок размера микронеровностей, более развитая структура характерна для офсетной бумаги. Наиболее развитой поверхностью обладает газетная бумага, содержащая минимальное количество наполнителей и достаточно крупные растительные волокна.

На каждом образце проводилось, как минимум, пять опытов. Для исследования влияния разброса измеряемых значений на конечный результат был проведен расчет дисперсий значений поверхностной фрактальной размерности для нескольких образцов бумаги. Результаты, приведенные в табл. 2, подтверждают допустимость разброса полученных значений.

**Таблица 2.** Дисперсии расчетных значений для трех видов бумаги

Экспериментальные показатели			Расчетный показатель	Дисперсия
$T_6, \%$	$h_6, \text{мм}$	$D$		
АО «Волга»				
7,721	0,089	0,228	2,797	0,00017
7,397			2,787	
8,175			2,810	
8,305			2,814	
7,397			2,787	
Офсетная № 1				
7,008	0,084	0,097	2,608	0,00018
6,943			2,606	
6,618			2,596	
6,164			2,583	
6,229			2,585	
Union Silk				
3,179	0,138	0,063	2,407	0,000003
3,179			2,407	
3,050			2,404	
3,179			2,407	
3,244			2,409	



Для определения показателя фрактальной размерности наиболее точным, но и более трудоемким, признан контактный способ. Он реализуется с помощью профилографа с алмазной иглой, которая движется по поверхности исследуемого материала. Поскольку профилограф высокоточный прибор, позволяющий фиксировать неровности до пятого порядка включительно, то он требует тщательной установки и настройки. Данные высоты микронеровностей поверхности в цифровом виде записываются на компьютер. Далее производится фильтрация данных и расчет показателей. Пока что процесс фильтрации не алгоритмизирован и проводится «вручную» с помощью программных средств, расчет показателя фрактальной размерности выполняется на компьютере по специальной программе [1]. Несмотря на высокую точность значений данный способ может быть использован только в исследовательских целях, так как поточное производство бумаги или печати продукции требует более оперативного и мобильного способа.

Оптический способ исследования обеспечивает необходимую скорость получения данных для своевременного контроля и вмешательства в рабочий процесс, однако точность данных, полученных данным способом, нуждается в проверке. Результаты представления показателей фрактальной размерности, полученных двумя различными способами исследования, представлены в табл. 3.

**Таблица 3.** Сравнительный анализ поверхностных фрактальных размерностей, полученных различными способами

Вид бумаги	$D_S$ оптический способ	$D_S$ контактный способ	Расхождение, %
<b>Газетная бумага</b>			
Балахнинского ЦБК	2,774	2,807	-1,18
Цветная бумага Кондопогского ЦБК	2,878	2,749	4,69
АО «Волга»	2,799	2,893	-3,24
Газетная	2,796	2,726	2,56
<b>Офсетная бумага</b>			
Офсетная № 1	2,596	2,737	-5,16
Офсетная	2,617	2,559	2,26
Kaskad	2,639	2,595	1,69
<b>Мелованная бумага</b>			
Lumi Silk	2,405	2,549	-5,65
Union Silk	2,408	2,382	1,08
Union Art	2,383	2,485	-4,09
Кум Ex Cote	2,360	2,298	2,70
Кум Ex Cote Matt	2,450	2,453	-0,12
Bereg Top Gloss	2,247	2,469	-8,98
Bereg Top Silk	2,397	2,362	1,46
Magnomatt Satin	2,370	2,338	1,37
Мелованная	2,335	2,193	6,46
Magnostar	2,351	2,244	4,76

Анализ расхождения полученных данных в табл. 3 показал, что в большинстве случаев оно не превышает допустимых 5%, что свидетельствует о приемлемой точности оптического метода и что позволяет использовать его в исследовательских целях.

Наряду с образцами бумаги, для которой были известны значения фрактальной размерности, полученные ранее контактным методом, исследовались образцы двух ма-

рок бумаги Magnostar и Bereg Top Silk компании «Берег» с различными значениями массы метра квадратного. По результатам расчетов представилось возможным изучить для этих образцов зависимость пропускания бумаги и поверхностной фрактальной размерности от величины плотности бумаги. Полученные зависимости показаны на рис. 1.

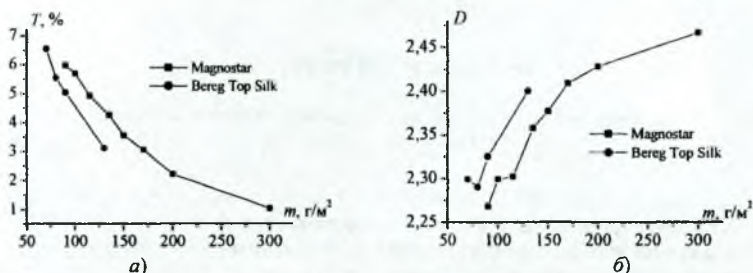


Рис. 1. Зависимости величины пропускания от плотности бумаги (а) и поверхностной фрактальной размерности от плотности бумаги (б).

Анализ рис. 1, а подтверждает результаты, наблюдаемые на практике: при увеличении плотности бумаги величина пропускания снижается. Рис. 1, б демонстрирует рост показателя поверхностной фрактальной размерности при увеличении массы метра квадратного образца, следовательно, чем толще отливаемое полотно бумаги, тем более развитой получается его поверхностная структура, возможно, сказывается определенное возрастание упругости материала и сопротивления сглаживанию с увеличением массы. Однако для бумаги с малой плотностью наблюдается нестабильное поведение зависимости, которое можно объяснить сложностью учета отражения из-за повышенной прозрачности образцов

Использование теории фракталов, современного и перспективного подхода к изучению естественных хаотических структур, и оптической теории, обеспечивающей оперативность при проведении исследований, позволяет изучать классические материалы с принципиально новой точки зрения. Получение показаний производится в несколько раз быстрее, чем при использовании контактного метода; последующая математическая обработка легче поддается алгоритмизации и не требует «ручной» работы, в тоже время, точность конечного результата сохраняется в пределах допустимых 5%.

Получаемый в результате показатель фрактальной размерности поверхности позволяет охарактеризовать характер микроструктуры запечатываемой поверхности бумаги, что дает возможность получать информацию о состоянии поверхности и включать ее в системы управления бумагоделательными и печатными машинами.

#### Список литературы

1. Кулак М. И. Фрактальная механика материалов. — Мн.: Выш. шк., 2002. — 304 с.
2. Жбанков Р. Г. Инфракрасные спектры целлюлозы и ее производных. — Мн.: Наука и техника, 1964. — 340 с.