

# ПОЛИГРАФИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

---

УДК 353.31

Д. М. Медяк, кандидат технических наук, доцент (БГТУ);  
Е. В. Барковский, магистрант (БГТУ)

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРЕЛОМЛЕНИЯ ЛУЧА В МИКРОСТРУКТУРЕ ПОВЕРХНОСТИ БУМАГИ

В статье представлена модель преломления света в печатной бумаге. С помощью полученной модели были исследованы характеристики бумаги и картона. Результаты исследования были представлены в графическом виде. Модель позволяет определить расстояние между точкой входа светового луча в бумагу и точкой выхода из бумаги с учетом преломления. Результат зависит от фрактальной размерности поверхности и глубины проникновения луча. Графическое отображение данной зависимости представлено в статье в виде поверхности. Эта модель может быть использована в модели оптического растискивания растровых точек.

A model of light refraction in printing paper is presented in the article. Paper and board characteristics were studied with the help of the obtained model. Results of the research were presented in the graphic type. The model allows to determine the distance between the entry point of light beam and the exit point considering the light refraction. The result depends on fractal dimension of a surface and depth of penetration of a beam. Graphic display of this dependence is presented in article in the form of surface. This model can be used in the model of optical dot gain.

**Введение.** В существующих методах контроля запечатываемой поверхности, пробных и тиражных оттисков часто используют оптические методы определения их характеристик. Они имеют ряд преимуществ перед другими. Оптический метод достаточно оперативен, т. к. не требует выполнения других операций; используемое видимое излучение позволяет избежать искажения показаний, которое возникает при контакте с исследуемой поверхностью; изучение отраженного от поверхности света существенно расширяет диапазон материалов, которые могут быть проанализированы (бумага, картон и др.) [1].

На границе раздела двух сред световой луч не только отражается, но и преломляется, т. е. часть его энергии переходит из одной среды в другую. При переходе из среды с большей скоростью света в среду с меньшей скоростью света угол преломления меньше угла падения. Преломленный луч приближается к нормали [2].

Бумага является сложной структурой, состоящей в основном из переплетенных волокон, частиц пигментных наполнителей и воздуха. Свет отражается волокном и пигментными наполнителями, как с поверхностного слоя, так и внутри бумаги. Вместе с тем, свет проникает внутрь волокон целлюлозы и пигментов и изменяет свое направление. Человеческий глаз не воспринимает всех многократных отражений и преломлений, происходящих

внутри бумаги, но видит ее как матовую, белую поверхность [3].

Целью данной работы является получение и исследование модели преломления луча в микроструктуре поверхности бумаги.

**Основная часть.** Для достижения поставленной цели следует рассмотреть процесс преломления луча в толще бумаги. При попадании на бумагу луч света отражается и проникает частично в толщу бумаги. Луч света падает под углом  $\alpha$  на поверхность бумаги и проходит внутрь на глубину  $h$ . На границе раздела воздух-бумага световой луч преломляется под углом  $\beta$ . При прохождении свет отражается от целлюлозных волокон, являющихся основным компонентом бумаги. Часть излучения отражается от целлюлозного волокна, а некоторая часть проходит дальше в толщу бумаги. При этом луч продолжает преломляться и угол преломления уменьшается, так как скорость распространения света уменьшается с повышением плотности при увеличении глубины проникновения луча внутрь бумаги. Для исследования принимается, что глубина проникновения излучения равна максимальной высоте микронеровностей поверхности структуры бумаги. Схема преломления луча и его смещение при выходе из толщи бумаги относительно координаты выхода без учета преломления представлена на рис. 1.

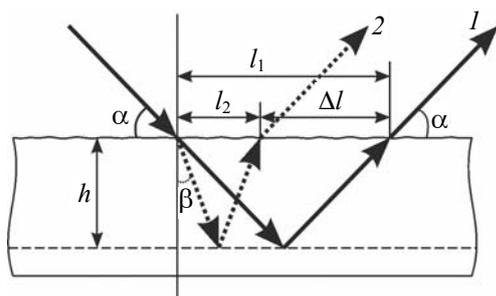


Рис. 1. Преломление луча в бумаге:

$l_1$  – ход луча без учета преломления;

$l_2$  – ход луча с учетом преломления;

$\alpha$  – угол падения;  $\beta$  – угол преломления;

$l_1$  – смещение луча на выходе без учета преломления,

$l_2$  – смещение луча на выходе с учетом преломления;

$\Delta l$  – величина смещения луча относительно координаты выхода без учета преломления из толщи бумаги;

$h$  – глубина проникновения света в толщу бумаги

Для упрощения учета повышения плотности бумаги при прохождении луча вглубь структуры, вся глубина проникновения луча разбивается на слои, толщина которых определяется толщиной волокон целлюлозы и имеет значение 2 мкм.

Смещение луча  $l_1$  и  $l_2$  через геометрические преобразования определяются следующим образом

$$l_1 = 2h \cdot \operatorname{tg}(\alpha), \quad (1)$$

$$l_2 = 2h \cdot \operatorname{tg}(\beta). \quad (2)$$

Зная величину угла падения излучения  $\alpha$ , которая является постоянной, из закона преломления [2] можно определить величину угла преломления  $\beta$  по формуле

$$\beta = \arcsin\left(\frac{\sin(\alpha) \cdot n_1}{n_2}\right), \quad (3)$$

где  $n_1$  – показатель преломления среды падения луча;  $n_2$  – показатель преломления среды преломленного луча.

В данной работе средой падения луча является воздух, показатель преломления которого равен 1, а средой преломления является бумага. Бумага имеет коэффициент преломления больше единицы. Это объясняется тем, что скорость распространения световых волн (фотонов) в физических средах всегда ниже, чем в вакууме. Замедление скорости света происходит благодаря эффекту огибания непроницаемых для фотонов областей. Фотонам низких энергий приходится огибать области пространства, занимаемые электронными оболочками и ядрами атомов. Высокоэнергичные фотоны проникают в области, близкие к ядру [4].

В работе [4] была получена следующая зависимость показателя преломления среды от плотности вещества:

$$n = 1 + 0,2\rho, \quad (4)$$

где  $\rho$  – плотность вещества.

Плотность бумаги можно определить, используя фрактальную размерность поверхности, по формуле [1]

$$\rho = \rho_0 \cdot R^{D_S - d}, \quad (5)$$

где  $\rho$  – плотность слоя бумаги;  $\rho_0$  – плотность волокон бумаги;  $R$  – количество слоев бумаги;  $D_S$  – фрактальная размерность поверхности;  $d$  – размерность физического пространства.

Фрактальная размерность поверхности позволяет учесть влияние пространственной развитости микропрофиля, что достаточно точно характеризует поверхностно-пространственную структуру бумаги и ее печатные свойства. Таким образом, использование теории фракталов и показателя фрактальной размерности для описания поверхностных свойств бумаги в данной работе целесообразно [1].

С учетом выражений (3), (4) и (5) выражение (2) будет иметь вид

$$l_2 = 2h \cdot \operatorname{tg}\left(\arcsin\left[\frac{\sin(\alpha) \cdot n_1}{1 + 0,2\rho_0 R^{D_S - d}}\right]\right). \quad (6)$$

Данная модель позволяет, зная такие характеристики бумаги как плотность волокон бумаги, максимальная высота микронеровности, фрактальная размерность, вычислить абсолютное и относительное смещение луча, не прибегая к трудоемким экспериментам. Таким образом, получается, что модель фактически зависит от фрактальной размерности поверхности и глубины проникновения луча, графическое отображение которой можно представить в виде поверхности. Изменение абсолютного значения смещения луча при изменении показателя фрактальной размерности поверхности и максимальной высоты микронеровности поверхности бумаги представлены на рис. 2.

Анализируя поверхность, представленную на рис. 2, можно отметить, что она является практически плоской.

Исследование влияния фрактальной размерности и глубины проникновения светового луча представлены на рис. 3. Зависимость на рис. 3а построена при постоянстве фрактальной размерности  $D_S = 2,5$  и изменении глубины проникновения излучения от 2 до 26 с шагом 2 мкм, на рис. 3б при постоянстве глубины

проникновения светового луча  $h = 12$  мкм и изменении фрактальной размерности поверхности от 2 до 3 с шагом 0,1.

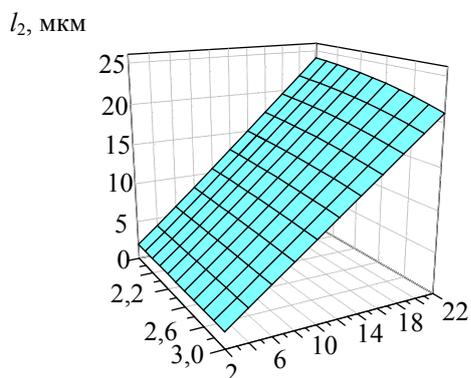
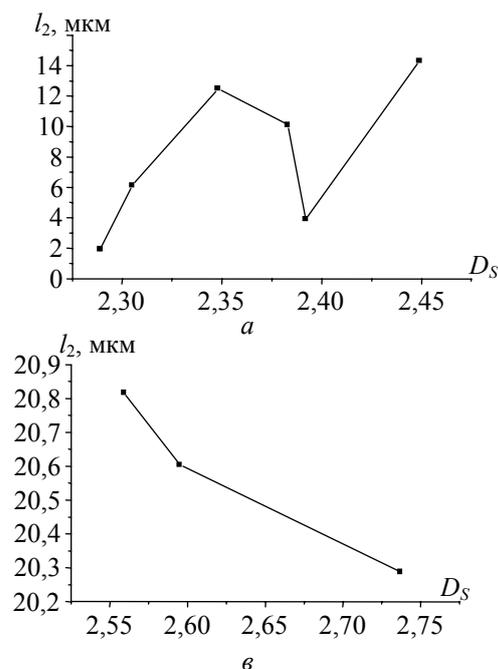


Рис. 2. Зависимости абсолютного значения смещения от глубины проникновения луча и фрактальной размерности поверхности

На рис. 3а зависимость является прямой, т. е. с увеличением максимальной микронеровности поверхности бумаги прямо пропорционально увеличивается и абсолютное значение смещения с учетом преломления. Характер зависимостей соответствует физике данного явления. На рис. 3б зависимость является параболической, абсолютное значение смещения уменьшается. Данное поведение объясняется вхождением луча в более плотную структуру бумаги, которая вызывает увеличение показателя преломления, уменьшение угла преломления и, соответственно, абсолютного значения смещения.



Для анализа применимости модели были выбраны 6 образцов мелованной бумаги, 3 образца офсетной бумаги, 3 образца газетной бумаги и 6 образцов мелованного картона. С использованием программы MathCAD были получены значения смещения луча на выходе из толщи бумаги без учета преломления и с учетом преломления, а также величины смещения луча относительно координаты выхода луча без учета преломления из толщи бумаги.

На рис. 4 представлены результаты исследования выбранных образцов бумаги с использованием модели.

Данные графики характеризуют состояние поверхности и ее влияние на преломление луча. На рис. 4а зависимость, построенная для мелованного картона, имеет возрастающий характер значения смещения луча на выходе с учетом преломления. На рис. 4б для мелованной бумаги также наблюдается увеличение абсолютного значения смещения луча. Для офсетной и газетной бумаги происходит уменьшение абсолютного значения. Это можно объяснить тем, что мелованный картон обладает более гладкой поверхностью структурой, также как и мелованная бумага вследствие большого содержания наполнителей, которые снижают порядок размера микронеровностей и, следовательно, увеличивают плотность материала. Более развитая структура характерна для офсетной бумаги. Газетная бумага, содержащая минимальное количество наполнителей и достаточно крупные растительные волокна, является рыхлой, пористой.

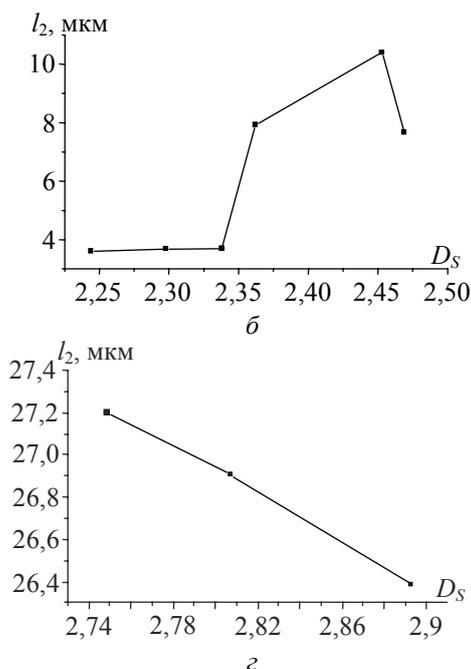


Рис. 4. Зависимости расстояния между входом и выходом луча из толщи бумаги с учетом преломления и от фрактальной размерности поверхности:  
а — мелованного картона, б — мелованной бумаги, в — офсетной бумаги, г — газетной бумаги

Особенность составленной модели заключается в том, что на результирующее значение абсолютного смещения оказывает значительное влияние выделенное количество слоев. Анализируя результаты, представленные на рис. 4а и 4б, можно отметить, что именно разброс количества слоев в группе мелованного картона и мелованной бумаги оказал влияние на нелинейный характер абсолютного значения смещения.

**Заключение.** В результате проведения исследования преломления светового луча в бумаге получена модель, которая учитывает влияние параметров микроструктуры поверхности бумаги на величину смещения луча при выходе из бумаги относительно координаты выхода луча без учета преломления. Кроме того, модель позволяет определить расстояние между точкой входа луча на заданную толщину бумаги и точкой выхода луча из бумаги с уче-

том преломления. Данную модель можно использовать в дальнейшем, например, для моделирования оптического растискивания растровых точек.

### Литература

1. Кулак, М. И. Методы теории фракталов в технологической механике и процессах управления: полиграфические материалы и процессы / М. И. Кулак, С. А. Ничипорович, Д. М. Медяк. – Минск: Белорусская наука, 2007. – 419 с.
2. Кухлинг, Х. Справочник по физике / Х. Кухлинг. – М.: Мир, 1998. – 520 с.
3. Pauler, N. Paper optics / N. Pauler. – Goteborg: Lorentzen & Wettre, 2002. – 94 p.
4. Горбацевич, Ф. Ф. Основы теории непустого эфира / Ф. Ф. Горбацевич. – Апатиты: Милори, 1998. – 48 с.

*Поступила 23.04.2013*