

УДК 676.017

М. А. Зильберглейт¹, Н. П. Мидуков², И. В. Марченко¹, С. К. Грудо¹¹Белорусский государственный технологический университет²Санкт-Петербургский государственный университет
промышленных технологий и дизайна (Российская Федерация)**ТОПОГРАФИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОЦЕНОК НЕОДНОРОДНОСТИ
БУМАГИ В ПРОЦЕССЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КРАСКА – БУМАГА**

В настоящем исследовании проведено топографическое моделирование для оценки неоднородности бумаги, а также возможных результатов взаимодействия бумага – краска. За основу модели было принято положение о поглощении света «черным телом».

Поверхность бумаги рассматривается как текстура с различными углублениями (промоинами), причем с увеличением глубины впадин отражение света, падающего на поверхность, уменьшается. С другой стороны, анализируя просвет бумаги методами оптической микроскопии, можно принять, что уменьшение поглощения света связано с неоднородностью структуры бумаги, обусловленной как технологией изготовления, так и свойствами бумажного волокна. Несмотря на различный механизм взаимодействия света с поверхностью бумаги и бумаги как массива, имеющего дефекты в структуре, методы обработки данных ничем не отличаются. Рассмотрены различные топографические модели неоднородных изображений и способы их контроля. Наряду с таким традиционным показателем, как стандартное отклонение (дисперсия), следует рассматривать и другие параметры: энтропия, распределение неоднородных областей по размерам и их количеству, отклонение геометрического центра изображения от центра масс. Показатель фрактальной размерности требует дальнейшего изучения в качестве способа контроля неоднородности. При рассмотрении модели оценки качества печати использование топографического моделирования предполагает учет среднеквадратичного отклонения, расчет количества областей с одинаковой яркостью по серому и, соответственно, их среднего размера.

Ключевые слова: неоднородность бумаги, краски, просвет, отражение, модель, среднеквадратичное отклонение, энтропия, фрактальная размерность.

Для цитирования: Зильберглейт М. А., Мидуков Н. П., Марченко И. В., Грудо С. К. Топографическое моделирование оценок неоднородности бумаги в процессе взаимодействия краска – бумага // Труды БГТУ. Сер. 4, Принт- и медиатехнологии. 2024. № 2 (285). С. 28–38.

DOI: 10.52065/2520-6729-2024-285-4.

M. A. Zilbergleit¹, N. P. Midukov², I. V. Marchenko¹, S. K. Grudo¹¹Belarusian State Technological University²St. Petersburg State University of Industrial Technology and Design (Russian Federation)**TOPOGRAPHIC MODELING OF ESTIMATES OF PAPER HETEROGENEITY
DURING INK – PAPER INTERACTION**

In this study, topographic modeling was performed to assess paper non-homogeneity, as well as possible results of paper – paint interaction. The model was based on the provision on the absorption of light by the “black body”.

The surface of the paper is considered as a texture with different grooves, and as the depth of the grooves increases, the reflection of light incident on the surface decreases. On the other hand, by analyzing the paper lumen using optical microscopy techniques, it can be assumed that the decrease in light absorption is due to the non-uniformity of the paper structure due to both the manufacturing technique and the properties of the paper fiber. Despite the different mechanism of interaction of light with the surface of paper and paper as an array with defects in the structure, data processing methods are no different. Various topographic models of heterogeneous images and methods of their control are considered. Along with such a traditional indicator as standard deviation (dispersion), such parameters as entropy, the distribution of inhomogeneous regions by size and by their number, the deviation of the geometric center of the image from the center of mass should be considered. The measure of fractal dimension requires further study as a way to control for heterogeneity. When considering the model for assessing print quality, the use of topographic modeling involves taking into account the standard deviation, calculating the number of areas with the same gray brightness and, accordingly, their average size.

Keywords: paper heterogeneity, paints, clearance, reflection, model, standard deviation, entropy, fractal dimension.

For citation: Zilberleit M. A., Midukov N. P., Marchenko I. V., Grudo S. K. Topographic modeling of estimates of paper heterogeneity during ink – paper interaction. *Proceedings of BSTU, issue 4, Print- and Mediatechnologies*, 2024, no. 2 (285), pp. 28–38 (In Russian).
DOI: 10.52065/2520-6729-2024-285-4.

Введение. Взаимодействие краски с бумагой играет ключевую роль при определении качества печатной продукции. Основные аспекты этого взаимодействия традиционно включают следующие показатели: впитываемость, гладкость, белизну, непрозрачность, а также некоторые специфические прочностные свойства.

Впитываемость. Пористая структура бумаги позволяет ей хорошо воспринимать печатную краску, обеспечивая четкость и насыщенность изображения.

Гладкость. Более гладкая поверхность бумаги лучше взаимодействует с печатной формой, что повышает качество изображения. В способах печати, не связанных со взаимодействием с печатной формой, гладкость может вносить и иной вклад в качество печати.

Оптические свойства. Высокая белизна бумаги обеспечивает четкость и яркость изображения. Непрозрачность ее позволяет выполнять двустороннюю печать без просвечивания.

Механические свойства. Прочность и устойчивость к деформации как в сухом состоянии, так и при увлажнении, важны для сохранения качества при некоторых печатных процессах. Бумага должна содержать гидрофобные вещества или быть проклеена для предотвращения деформации при изменении влажности.

В целом правильный выбор бумаги с учетом ее физических, оптических и механических свойств критически важен в процессе получения высококачественной печатной продукции.

При анализе характеристик бумаги для печати часто используется термин «просвет» (ранее обозначаемый как «облачность»). Этот параметр описывает неравномерное распределение волокнистых компонентов в структуре бумаги или картона, которое становится видимым при так называемом донном освещении. Термин «просвет» можно найти в ГОСТ 19088–89 «Бумага и картон. Термины и определения», а также в ОСТ 29.42–98 «Термины и определения дефектов материалов и полуфабрикатов для печати».

В этих документах описывается распределение компонентов бумаги, которое можно визуально оценить при проходящем свете, разделяя его на равномерное, облачное и клочковатое. Требования к просвету бумаги формулируются абстрактно, указывая на необходимость однородности просвета и его соответствия образцу, утвержденному заказчиком.

Значительное количество материалов, посвященных связи неоднородности и прочностных свойств целлюлозных материалов, изложено в литературе [1–17].

Наличие неконтролируемой облачности может привести к двум негативным явлениям: повышенной обрывности и низкому качеству печати.

Поэтому, например, зарубежные печатники при нарушении качества печати рекомендуют просто сменить бумагу. В результате возрастает количество брака, а судьба всего рулона незавидная – либо ждать нового заказа, либо быть проданным в виде бумаги более низкого сорта.

Неравномерное распределение волокнистых материалов в бумаге проявляется в наличии шероховатости поверхности, которая приводит к рассеиванию света и гетерогенности внутренней структуры, что обусловлено неравномерностью упаковки разнородного волокна.

Попытка решить первую проблему в виде оценки шероховатости (гладкости) при определении воздухопроницаемости между стандартной пластиной и образцом бумаги годится только для образцов, характеризующихся резким отличием таких свойств. Существенные неприятности заложены в интегральном характере данного показателя. На рис. 1 приведены два образца бумаги с различной гладкостью. Однако предсказать, какой из них принесет больше проблем при печати, на наш взгляд, совершенно невозможно.

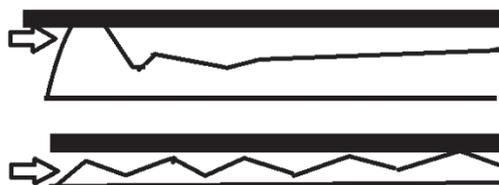


Рис. 1. Схема прохождения воздуха между пластиной и образцами бумаги

В доказательство ненадежности использования показателя гладкости можно привести тот факт, что зависимости между различными методами определения гладкости (шероховатости) носят, как правило, гиперболический характер. Кроме того, хотелось бы упомянуть некоторые нормы стандарта, в которых такие показатели приводятся с очень большой разбегом. Например, гладкость офсетной бумаги по ГОСТ 9094–89 «Бумага для печати офсетная» заявляется в интервале 30–80 (машинной гладкости) или 80–150 (каландрированной) секунд. В этом случае законодатель противоречит выше упомянутому мнению о влиянии гладкости на печатные свойства.

Основная часть. Основные положения, заложенные в эту статью, заключаются в следующем. Если рассмотреть модель абсолютного тела (рис. 2, а), то очевидно, что луч света, попавший в полость сферы, не способен выйти из нее.

Моделирование хода лучей света показывает (рис. 2, б), что реальные полости частично поглощают часть света и, как следует из рис. 2, б, чем глубже полость, тем меньше должна быть вероятность для луча света выйти из него.

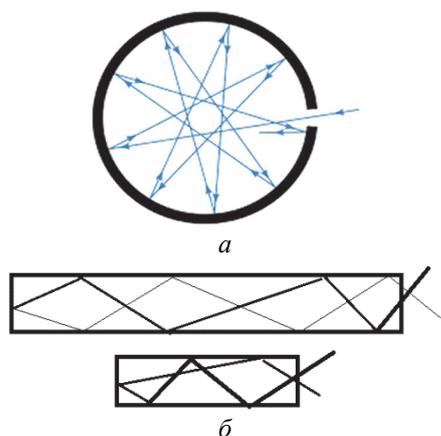


Рис. 2. Схема лучей абсолютно черного тела (а) и лучей в модели пор (б)

На рис. 3, а приведен скан (600 dpi) бумаги с проколотой иглой точкой и нижней подложкой из такого же сорта бумаги. Очевидно, что пятно имеет серый цвет. На рис. 3, б и в показан скан (600 dpi) двух точек, проколотых на картоне толщиной 1,5 мм. Первая точка (3, б) была проколота до глубины примерно 0,7 мм, вторая (рис. в) – насквозь до глубины 1,5 мм. Полученные результаты – диаметр 11 и 21 пиксель, среднее значение яркости 133 и 55 – подтверждают сделанные ранее предположения.

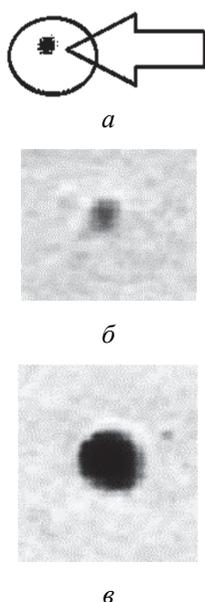


Рис. 3. Скан с плотностью сканирования 600 dpi: а – проколота точка в бумаге толщиной 100 мкм; б – точка прокола глубиной до 0,7 мм; в – точка прокола глубиной до 1,5 мм

Следовательно, рассматривая шероховатость как набор чередующихся неоднородных впадин, можно прийти к заключению, что, чем глубже их величина и больше отношение величины поверхности к величине входного отверстия, тем чернее тело. Поэтому если рассматривать бумагу сверху через оптический прибор, то можно получить нерегулярные оттенки серого, пропорциональные шероховатости (неоднородности). Наше предположение отчетливо может быть продемонстрировано на качественных фотографиях структуры бумаги [18] в электронном микроскопе (рис. 4).

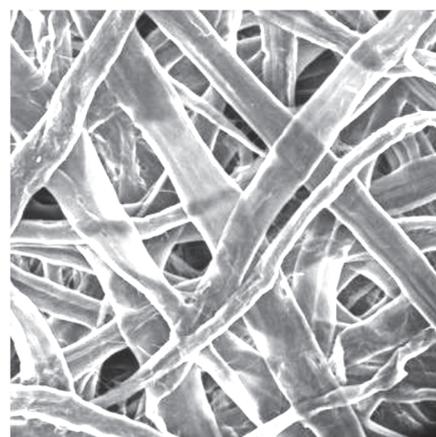


Рис. 4. Электронная фотография структуры бумаги

Второе положение, которое выносится в этой статье, заключается в том, что модель внутренней структуры бумажного листа можно рассматривать как нерегулярно чередующиеся «промоины» и «сгущения».

«Сгущения» образуются из-за того, что бумажное волокно представляет собой структуру, состоящую из волокна технической целлюлозы, имеющей разную длину и толщину, что в условиях работы бумагоделательной машины приводит к образованию нерегулярной гетерогенной внутренней поверхности. Если рассматривать такие «промоины» и «сгущения» через проходящий свет, то мы также будем наблюдать хаотичные оттенки серого различной величины и яркости. При этом более плотные участки – «сгущения» будут иметь меньшую яркость в оттенках серого цвета.

Кроме того, существует один общий фактор, который вносит свой вклад в гетерогенность внутренней и внешней структуры бумаги. Одним из требований к бумаге для печати и письма является непрозрачность. Она необходима для того, чтобы можно было прочитать печать или надпись на одной стороне без помех от другой стороны или последующего листа. Непрозрачность возникает по причине рассеяния света от поверхности листа и поверхности наполнителя.

Частицы наполнителя промышленного производства, такие как карбонат кальция, имеют высокую удельную поверхность для улучшения непрозрачности. Так как толщина стандартного листа бумаги (80 г/м^2) не превышает 100 мкм , то, учитывая толщину волокна, равную $5\text{--}15 \text{ мкм}$, можно считать, что такая бумага содержит порядка $5\text{--}20$ условных светорассеивающих слоев. Трехмерную структуру бумаги можно смоделировать с помощью методов седиментации [19–22], которые рассматривают осаждение волокна на сетку бумагоделательной машины, что, в свою очередь, позволяет систематически изучать структуру стохастической волоконной сети. Седиментационная модель бумаги предполагает, что лист формируется из разбавленной суспензии под действием однородной силы. Все взаимодействия волокон игнорируются. Получающаяся пористая структура является гиперболической: она характеризуется распределением свободных промежутков между волокнами в плоскостном и внеплоскостном направлениях, как показано на рис. 5 [22].

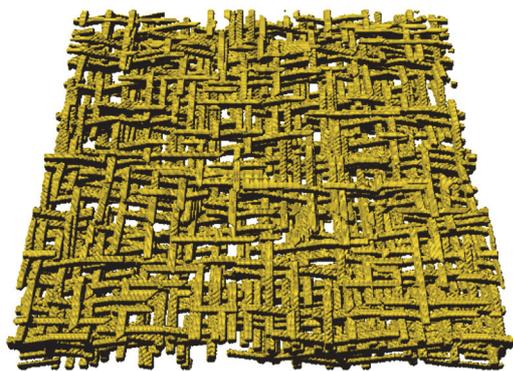


Рис. 5. Плоскостная случайно рандомизированная модель бумаги

Листовая структура реальной бумаги отличается от простой модели случайной седиментации. Результаты моделирования должны зависеть от всех операций процесса изготовления бумаги: осаждения, обезвоживания, прессования, сушки и каландрирования. При обезвоживании волокнистый слой формируется либо на одной проволоке сетки, либо в зазоре между двумя проволоками. Толщина волоконного слоя на сетке увеличивается по мере протекания через нее волокнистой суспензии. Помимо волокон, суспензия содержит мелочь, частицы минеральных наполнителей и коллоидные вещества. Удержание более мелкого материала на поверхности волокон контролируется конкуренцией между захватом и вымыванием. В результате получается профиль концентрации по толщине листа. При производстве бумаги давление, оказываемое на зону обезвоживания, подбирается таким образом, чтобы мелкие частицы не вда-

вливались, а оставались на поверхности листа. Это способствует получению гладкой поверхности, покрытой равномерно распределенными мелкими ($0,1 \text{ мкм}$) порами, что является идеальным вариантом для хорошего качества печати.

Таким образом, в результате действия множества факторов: неоднородность по размерам волокна целлюлозы, неоднородности скорости стесненного осаждения, неоднородности скорости водоотдачи, неоднородности давления прессования, неоднородности скорости сушки структура целлюлозного волокна имеет вид, как было смоделировано на рис. 6 [23].

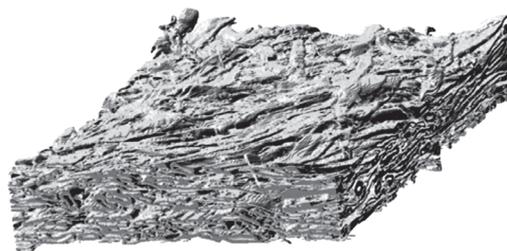


Рис. 6. Трехмерная структура газетной бумаги, полученной с помощью рентгеновской томографии

В представленной статье мы рассматриваем метод топографического моделирования неравномерной структуры бумаги с использованием анализа графических изображений.

Очевидно, что наиболее традиционным методом оценки неоднородностей является дисперсия или все производные от нее. Однако этот метод хорош для рядов данных, но при рассмотрении неоднородности поверхности применение дисперсии далеко не всегда оправдано.

В настоящее время существует достаточно большое число относительно новых методов, опирающихся на исследование поверхности как статистически неоднородного объекта. К ним прежде всего следует отнести энтропийные методы [24] и метод фракталов [25].

В привычном понимании энтропия – это мера хаоса. Ее величина дает нам представление о том, как далеко система находится от упорядоченного, структурированного состояния и как близко – к полностью хаотичному, бесструктурному, однородному виду [26].

Фрактал – величина, обратная энтропии, до сих пор не имеющая строгого определения и являющаяся одним из способов оценки неравномерности [25].

В этом исследовании мы на простых топологических моделях исследуем возможность оценки неоднородностей при помощи описанных выше мер неоднородностей, а также некоторых производных из них.

На рис. 7 показано распределение нескольких типов неоднородностей в виде шахматной доски.

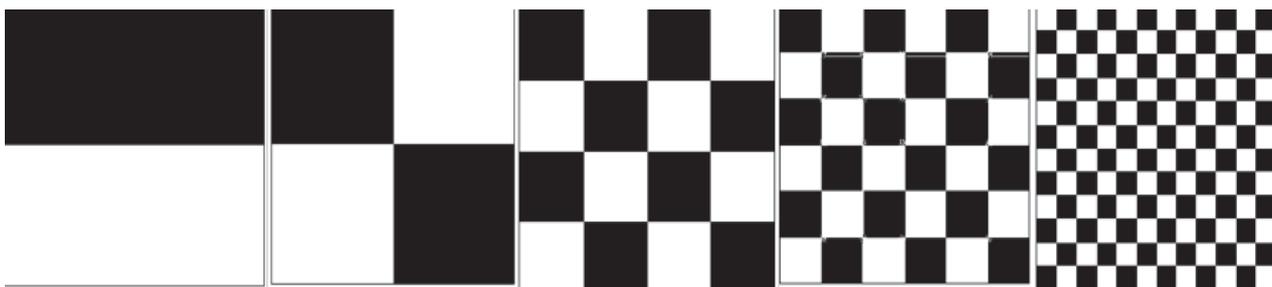


Рис. 7. Модель «Шахматная доска»

Эти фигуры имеют совершенно одинаковое соотношение условных «сгущений» и «промоин», однако их распределение на поверхности различно. На практике такая разница принципиальна. При нанесении краски на поверхность, состоящую из условных «сгущений» и «промоин», переход от первой поверхности к последней должен приводить к улучшению качества восприятия краски.

Если наложить условные «промоины» и «сгущения» на цветное изображение (рис. 8), то очевидно, что при одинаковом стандартном отклонении, но разном числе «промоин» и «сгущений» качество изображения должно отличаться.

В рассматриваемой модели стандартное отклонение (S) одинаковое – 127, а фрактальная размерность снижается в ряду 1,93; 1,87; 1,79; 1,75; 1,77.

Энтропия Шенона ($Entr$) характеризует изменчивость яркости изображения и равняется 0 для области с постоянной яркостью. Она максимальна в случае возрастания флуктуации для энтропии – 1,028; 1,103; 1,303; 1,751; 1,833. Очевидно, что в рассматриваемом случае показатель энтропии Шенона с увеличением количества «сгущений» или «промоин» лучше отражает изменение в просвете на плоскости.

Ввиду того, что показатель фрактальной размерности начал расти в последнем образце «шахматной доски», мы проверили зависимость

показателей энтропии и фрактальной размерности на простой модели. Для этого на изображение с серой заливкой были нанесены последовательно 1, 3, 10, 20, 30, 40 и 102 точки черного и рассчитаны соответствующие величины энтропии и фрактальной размерности. Результаты помещены в табл. 1.

Можем лишь подтвердить предыдущее предположение: показатель энтропии проявляет большую чувствительность к моделируемой неоднородности, а к показателю фрактальности следует относиться с осторожностью. Об этом же и свидетельствуют публикации [27, 28], в которых утверждается, что «исследования фрактального подхода к оценке шероховатости поверхности бумаги (картона) показали невысокую информативность оценки микрогеометрии поверхности различных запечатываемых материалов, характеризующихся разной степенью развитости рельефа поверхности».

При переходе на изображение с фоном (см. рис. 9) среднеквадратичное отклонение находится в интервале 58,3–60,6 и показатель фрактальной размерности не работает – с увеличением числа частиц он даже немного растет 1,83–1,85. Однако показатель энтропии по-прежнему четко показывает рост: 2,832, 3,940, 4,724.

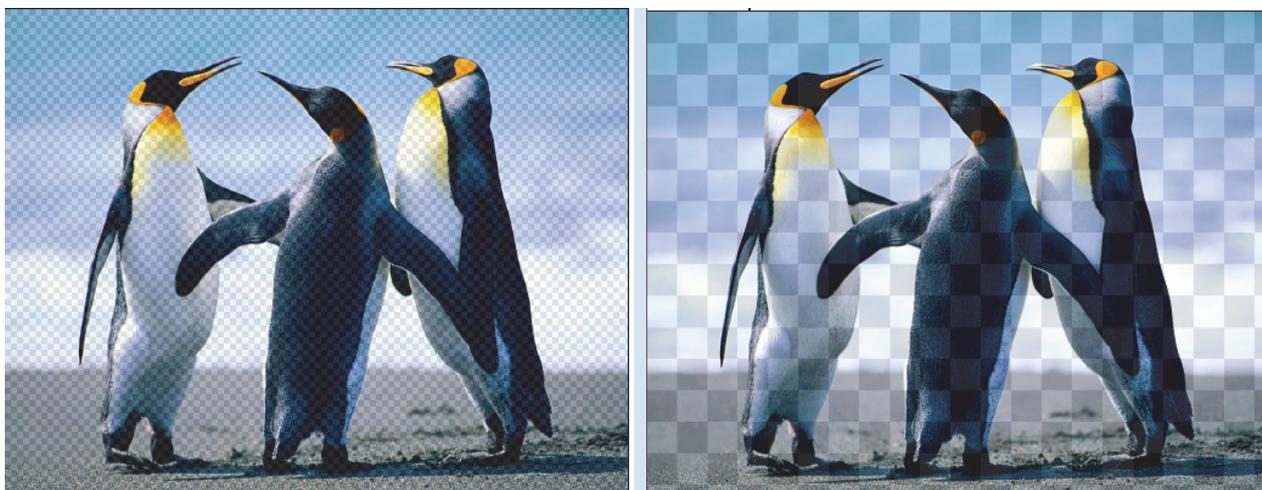


Рис. 8. Неоднородность изображения в результате наложения «шахматной доски»

Таблица 1
Величины энтропии и фрактальной размерности простой модели

Количество точек	Энтропия	Фрактальная размерность
0	0	1,999
1	0,01	1,523
3	0,04	1,370
10	0,166	1,378
20	0,307	1,379
30	0,403	1,347
40	0,512	1,346
102	1,356	1,501

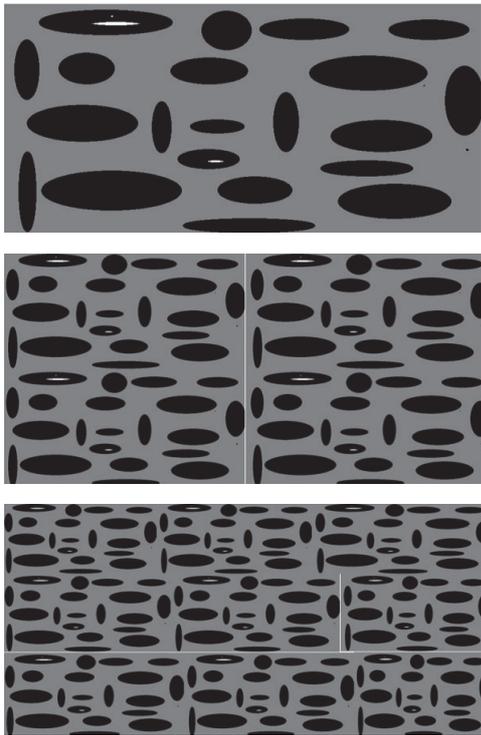


Рис. 9. Изображение с фоном «эллипсы»

Если рассмотреть изображение с разной заливкой (рис. 10), то для среднеквадратичных отклонений 126, 97, 25 при одинаковом числе частиц показатель фрактальности и энтропии, соответственно, стабильны – 1,91, и 1,057.



Рис. 10. Изображение с разной заливкой

Следует обратить также внимание на случай, когда условные «промоины» уменьшают свою долю в изображении и начинает расти доля «сгущений». Очевидно, можно ожидать, что наступит момент, когда рост энтропии прекратится и затем начнет падать. Это предположение легко проверить. На рис. 11 описана модель, которой соответствует следующий набор данных (S/Entr): 36/0,151; 119/0,94; 126/1,025; 127/1,042; 116/0,936; 105/0,813; 94/0,697. Результат с использованием фрактальной размерности разочаровывает: вместо ожидаемого перегиба, что обусловлено ростом числа «сгущений», расчет показывает монотонный рост.

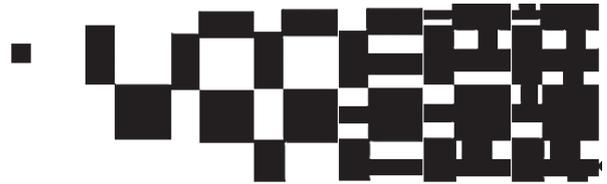


Рис. 11. Переход «промоин» в «сгущения»

На рис. 12 приведены три изображения оттенков серого, полученного из одной шахматной основы с произвольно выбранным распределением.

Для этого распределения фрактальная размерность равна соответственно 1,606; 1,638 и 1,728, а энтропия – 6,667; 7,505 и 7,901.

Далее рассмотрим два гауссовских распределения серого со стандартным отклонением 39,8 и 49,5 (рис. 13).

Для этого распределения фрактальная размерность равна соответственно 1,911 и 1,950, а энтропия – 7,336 и 7,637, что, как и в предыдущих примерах, также не укладывается в привычные представления, так как эти величины противоположны по смыслу.

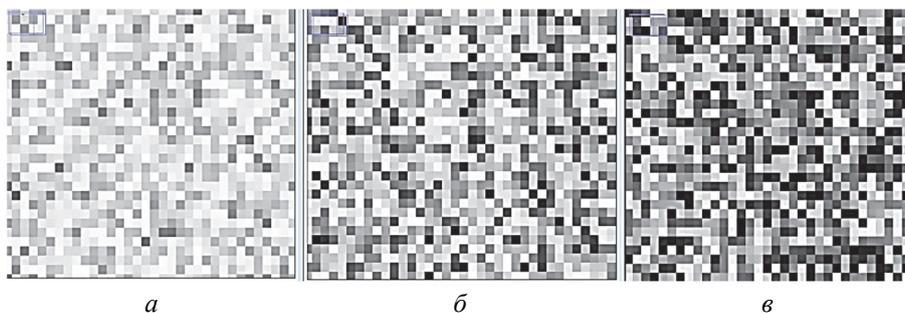


Рис. 12. Случайное распределение исходной модели «шахматная доска» со стандартным отклонением:
 а – 30,0; б – 55,0; в – 69,5

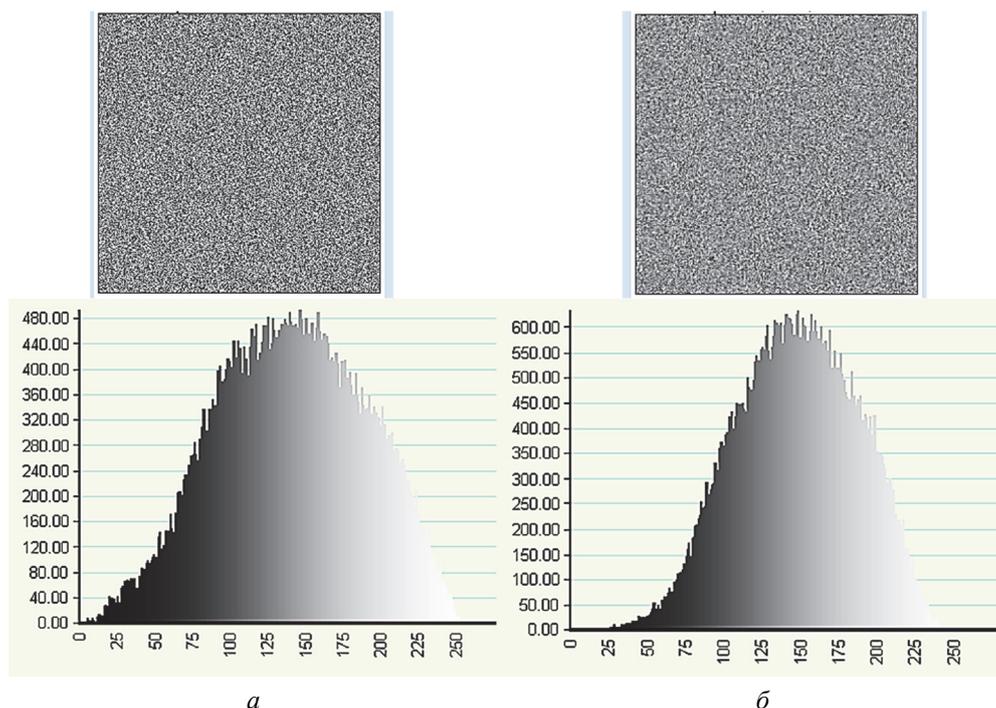


Рис. 13. Гауссовское распределение серого для стандартного распределения 39,8 (а) и 49,5 (б)

Следующее исследование заключалось в изучении отклика рассматриваемых факторов на размеры файла. Для этого исходный файл «камешки» 300×300 пикселей (рис. 14) трансформировали в два файла 400×400 и 600×600.



Рис. 14. «Камешки»

Очевидно, что полученные данные можно было бы признать вполне удовлетворительными, но при оценке площади областей, заня-

тых «сгущениями», их площадь изменяется незначительно (43,89; 43,91; 43,90 %), а число их составляет, соответственно, 215, 195, 172. Для «промоин» – 187, 173, 171. Поэтому при изучении оптических изображений, включающих анализ числа областей, занятых «сгущениями» или «промоинами», следует приводить размеры изображения к одной и той же величине.

Результаты представлены в табл. 2.

Число «сгущений» и «промоин» также не спасает от недоразумений. Так, на рис. 15 продемонстрирован фрагмент изображения с перемычкой и без.

Исследование данной модели показало, что стандартное отклонение, энтропия и фрактальная размерность одинаковы для обоих случаев. Однако, если считать соотношение «сгущений» и «промоин», то в первом случае мы имеем 2, а во втором – 1. В то же время совершенно очевидно, что потери в качестве в обоих случаях одинаковы. Поэтому «увлечение» данных показателей также может привести к неверным результатам.

Таблица 2

Результаты отклика

Площадь, кв. пикс.	Среднее значение яркости	Стандартное отклонение	Минимальное значение яркости	Максимальное значение яркости	Процент «сгущений»	D	Энтропия
90000	125,9	34,39	13	230	43,89	1,763	7,128
160000	125,9	33,82	14	228	43,91	1,728	7,103
360000	125,9	33,52	14	226	43,90	1,728	7,094

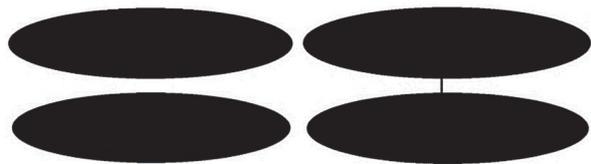


Рис. 15. Модель «перемычка»

Еще одним показателем, на который хотелось бы обратить внимание, является распределение неоднородностей, имеющих одинаковое соотношение «промоины»/«сгущения» (рис. 16). Фактическое их распределение по месту положения различается. Для анализа таких случаев удобно использовать значения отклонения центра масс от геометрического центра. Так, для приведенных изображений геометрический центр масс составляет 349,5 и 154,5. Центр масс для первого образца 330,9 и 155,3, для второго – 349,0 и 155,5. Расчет отклонения от геометрического центра составляет для первого образца 18,6, для второго – 1,12 пикселей. Кроме того, фрактальная размерность таких объектов разная. Для первого случая – 1,7758, для второго – 1,4325 и энтропия, соответственно, 3,651 и 5,400. В этом случае показатели энтропии и фрактальной размерности формально свидетельствуют о согласованном результате – второй образец имеет более равномерную структуру. Аналогичные отклонения геометрического центра от центра масс и показатель средневариационного отклонения также свидетельствуют в пользу второго образца.

Использованные приемы топографического моделирования могут быть применены для оценки конечного результата при анализе отпечатка.

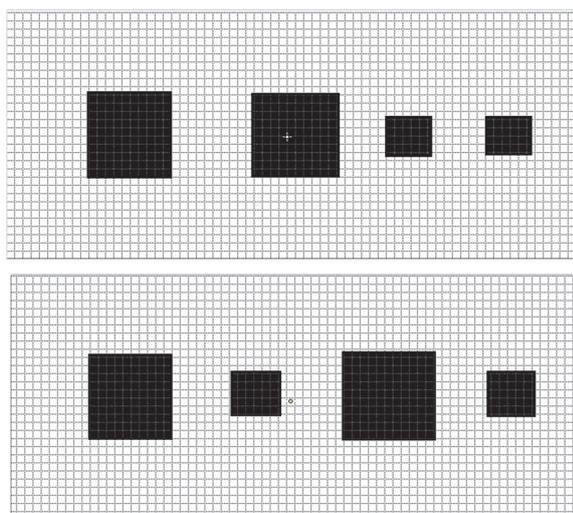
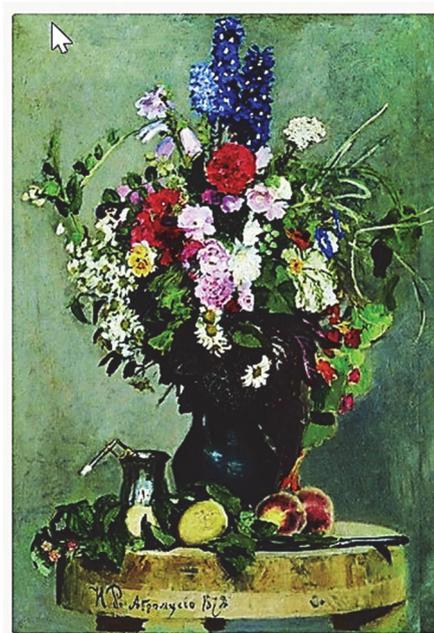


Рис. 16. Изображения с различным распределением центра масс

Ниже представлены два изображения картины И. Репина «Букет цветов» (рис. 17). Вто-

рое было получено путем размытия первоначального.

В оригинальном изображении было найдено 1494 одинаковые области со средним размером 144 кв. пикселя и средневариационным отклонением 57,0. В размытом, соответственно, 650, 318, 60,4. Таким образом, неоднородность изображения в размытом варианте, если судить по средневариационному отклонению, увеличивается при одновременном уменьшении количества одинаковых областей и соответственно увеличении их среднего размера.



а



б

Рис. 17. Картина И. Репина «Букет цветов»: а – исходное; б – размытое

Заключение. На основании изложенного выше мы сформулируем требования к «хорошей структуре» бумаги, обеспечивающей равномерное распределение краски в рамках выбранной нами модели: величина стандартного отклонения в градациях серого и средний размер различных областей серого должны быть как можно меньше, значение энтропии – как можно больше, фрактальная размерность при прочих равных условиях должна уменьшаться с ростом энтропии, отклонение геометрического центра

от центра масс должно быть также как можно меньше.

При анализе отпечатанного изображения для получения более правдоподобного «оттиска» необходимо, чтобы топографические оценки анализа «отпечатка», принятые в данной статье, были как можно ближе к оригиналу.

Настоящая статья опубликована при финансовой поддержке БРФФИИ по договору № X24СП6Г-009 от 01 марта 2024 г.

Список литературы

1. The effect of Localised Dewatering on Paper Formation / B. Norman [et al.] // Proceedings International Paper Physics Conference. Niagara-on-the-lake. Canada. 1995. P. 55.
2. Johansson P., Norman B. Methods for evaluating formation, print unevenness and gloss variations developed at STFI, TAPPI // TAPPI PRESS: Process and Product Quality Conference Proceedings. Atlanta. 1998. P. 139.
3. Kerekes R., Schell C. Characterization of Fiber Flocculation Regimes by a Crowding Factor // J. Pulp Pap. Sci. 1992. 18 (2). P. 32.
4. Kerekes R. Perspectives on fibre flocculation in papermaking // TAPPI PRESS: International Paper Physics Conference Proceedings. Atlanta. 1995. P. 23.
5. Kerekes R., Soszynski R., Tam Doo P. The flocculation of pulp fibres // Mechanical Engineers Publication Ltd: 8th Fundamental Research Symposium Notes. London. 1985. Vol. 1. P. 265.
6. Seth R. Fire Quality Factors in Papermaking. II: The Importance of Fibre Coarseness: materials Interactions Relevant Pulp, Pap. Wood Ind., San Francisco, CA, Mat. Res. Soc. Proc.v.197:143. Physics Conference Proceedings. CPPA. Montreal. 1990. P. 23.
7. Кларк Дж. Технология целлюлозы / пер. с англ. А. В. Оболенской, Г. А. Пазухиной. М.: Лесная пром-сть, 1983. 456 с.
8. Cresson T., Luner P. Characterization of paper formation. Part 3: The use of texture maps to describe paper formation // Tappi Journal. 1991. 74 (2). P. 167,
9. Cresson T., Luner P., The characterisation of paper formation. Part 2: The texture analysis of paper formation // Tappi Journal. 1990. 37 (12). P. 175–184.
10. Nazhad M. M., Karnchanapoo W., Palokangas A. Some effects of fiber properties on formation and strength of paper // Appita Journal. 2003. Vol. 56, no. 1. P. 61–65.
11. Nazhad M. The influence of formation on tensile strength of papers made from mechanical pulps // Tappi Journal. 2000. Vol. 83, no. 12. P. 63.
12. Ramezani O., Mousa M., Nazhad M. The effect of refining on paper formation // Tappsa Journal. Archive 2. 2005.
13. Yan H., Norman B. Fibre Length Effect on Fibre Suspension Flocculation and Sheet Formation // Nordic Pulp and Paper Research Journal. 2006. Vol. 21, no. 1. P. 30–34.
14. Bernie J., Douglas W. A new instrumental determination of solid print nonuniformity. Proc // TAPPI Coating & Graphic Arts Conference. San Diego. 2001. P. 231–242.
15. Вайсман Л. М. Структура бумаги и методы ее контроля. М.: Лесная пром-сть, 1973. 152 с.
16. Кулак М. И., Медяк Д. М. Взаимосвязь структуры и оптических свойств бумаги // Актуальные проблемы прочности: материалы Междунар. науч.-техн. конф. Витебск, 2004. С. 184–189.
17. Казаков Я. В., Зеленова С. В., Комаров В. И. Влияние неоднородности структуры на характеристики жесткости картонов-лайнеров // Лесной журнал. 2007. № 3. С. 110–121.
18. Mikko Alaval, Kaarlo Niskanen. The physics of paper // Rep. Prog. Phys. 2006. 69. P. 669–723. doi:10.1088/0034-4885/69/3/R03.
19. Euler-Poincarè characteristics of classes of disordered media / C. H. Arns [et al.] // Phys. Rev. 2001. E 63 031112:1–13.
20. Hellen E. K. O., Alava M. J., & Niskanen K. J. Porous structure of thick fiber webs // Journal of Applied Physics. 1997. 81 (9). P. 6425–6431. <https://doi.org/10.1063/1.364423>.
21. Niskanen K. and Rajatorja H. Statistical geometry of Paper Cross-Sections // Journal of Pulp and Paper Science. 2002. 28 (7). P. 228–233.
22. Niskanen K. J., Alava M. J. Planar Random Networks with Flexible Fibers // Phys. Rev. Lett. 73, 3475 – Published 19 December 1994. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.73.3475>.

23. The physics of paper. Mikko Alava and Kaarlo Niskanen // *Rep. Prog. Phys.* 2006. 69. 669–723. doi:10.1088/0034-4885/69/3/R03.
24. Габидулин Э. М., Пилипчук Н. И. Лекции по теории информации: учеб. пособие. М.: МФТИ, 2007. 214 с.
25. Балханов В. К. Основы фрактальной геометрии и фрактального исчисления. Улан-Удэ: БГУ, 2013. 224 с.
26. Чумак О. В. Энтропии и фракталы в анализе данных. М.; Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика»: Ин-т компьютерных исслед., 2011. 164 с.
27. Бобров В. И., Варепко Л. Г., Годунов А. В. Применение теории фракталов для описания и моделирования поверхности печатных материалов // *Вестник МГУП*. 2010. № 6. С. 76–81.
28. Годунов А. В., Варепко Л. Г., Ихлазов С. З. К вопросу оценки неоднородности поверхности материалов для печати // *Известия ВУЗов. Северо-Кавказский регион. Технические науки*. 2011. № 6. С. 132–135.

References

1. Norman B., Sjodin U., Alm B., Bjorklund K., Nilsson F. and Pfister J. L. The effect of Localised Dewatering on Paper Formation: *proceedings International Paper Physics Conference*. Niagara-on-the-lake, Canada, 1995. P. 55.
2. Johansson P., Norman B. Methods for evaluating formation, print unevenness and gloss variations developed at STFI. *TAPPI: process and Product Quality Conference Proceedings*. Atlanta, 1998. P. 139.
3. Kerekes R., Schell C. Characterization of Fiber Flocculation Regimes by a Crowding Factor. *J. Pulp Pap. Sci.*, 1992, 18 (2), J 32.
4. Kerekes R. Perspectives on fibre flocculation in papermaking. *TAPPI PRESS: International Paper Physics Conference Proceedings*. Atlanta, 1995. P. 23.
5. Kerekes R., Soszynski R., Tam Doo P. The flocculation of pulp fibres. *Notes, Mechanical Engineers Publication Ltd: 8th Fundamental Research Symposium London, 1985, vol. 1. P. 265.*
6. Seth R. Fire Quality Factors in Papermaking. II: *The Importance of Fibre Coarseness: materials Interactions Relevant Pulp, Pap. Wood Ind., San Francisco, CA, Mat. Res. Soc. Proc.v.197:143. Physics Conference Proceedings*. CPPA. Montreal, 1990. P. 23.
7. Clark J. *Tekhnologiya tsellyulozy* [Cellulose technology]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1983. 456 p. (In Russian).
8. Cresson T., Luner P. Characterization of paper formation. Part 3: The use of texture maps to describe paper formation. *Tappi Journal*, 1992, 74 (2). P. 167.
9. Cresson T., Luner P., The characterisation of paper formation. Part 2: The texture analysis of paper formation. *Tappi Journal.*, 1990, 37 (12), pp. 175–184.
10. Nazhad M. M., Karnchanapoo W., Palokangas A. Some effects of fiber properties on formation and strength of paper. *Appita Journal*, 2003, vol. 56, no. 1, pp. 61–65.
11. Nazhad M. The influence of formation on tensile strength of papers made from mechanical pulps. *Tappi Journal*, 2000, vol. 83, no. 12. P. 63.
12. Ramezani O., Mousa M., Nazhad M. The effect of refining on paper formation. *Tappsa Journal*. Archive 2, 2005.
13. Yan H., Norman B. Fibre Length Effect on Fibre Suspension Flocculation and Sheet Formation. *Nordic Pulp and Paper Research Journal*, 2006, vol. 21, no. 1, pp. 30–34.
14. Bernie J., Douglas W. A new instrumental determination of solid print nonuniformity. *TAPPI Coating & Graphic Arts Conference*. San Diego, 2001, pp. 231–242.
15. Weissman L. M. *Struktura bumagi i metody eye kontrolya* [Paper Structure and Methods of Paper Control]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1973. 152 p. (In Russian).
16. Kulak M. I., Medyak D. M. Interrelationships of the structure and optical properties of paper. *Aktual'nyye problemy prochnosti: materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Current problems of strength: materials of the International scientific and technical conference]. Vitebsk, 2004, pp. 184–189 (In Russian).
17. Kazakov Y. V., Zelenova S. V., Komarov V. I. The influence of structure heterogeneity on the stiffness characteristics of cardboard liners. *Lesnoy zhurnal* [Forest Journal], 2007, no. 3, pp. 110–121 (In Russian).
18. Mikko Alava and Kaarlo Niskanen, The physics of paper. *Rep. Prog. Phys.*, 2006, 69, pp. 669–723. doi:10.1088/0034-4885/69/3/R03.
19. Arns C. H., Knackstedt M. A., Pinczewski W. V., Mecke K. R., Euler-Poincarè characteristics of classes of disordered media. *Phys. Rev.*, 2001, E 63, 031112:1–13.

20. Hellen E. K. O., Alava M. J., & Niskanen K. J. Porous structure of thick fiber webs. *Journal of Applied Physics*, 1997, 81 (9), pp. 6425–6431. <https://doi.org/10.1063/1.364423>.

21. Niskanen K. and Rajatora H. Statistical geometry of Paper Cross-Sections. *Journal of Pulp and Paper Science*, 2002, 28 (7), pp. 228–233.

22. K. J., Alava M. J. Planar Random Networks with Flexible Fibers. Niskanen. *Phys. Rev. Lett.* 73, 3475 – Published 19 December 1994. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.73.3475>.

23. Mikko Alaval, Kaarlo Niskanen. The physics of paper. *Rep. Prog. Phys.*, 2006, 69, pp. 669–723. doi:10.1088/0034-4885/69/3/R03.

24. Gabidulin E. M., Pilipchuk N. I. *Lektsii po teorii informatsii* [Lectures on information theory]. Moscow, MFTI Publ., 2007. 214 p. (In Russian).

25. Balkhanov V. K. *Osnovy fraktal'noy geometrii i fraktal'nogo ischisleniya* [Fundamentals of fractal geometry and fractal calculus]. Ulan-Ude, BGU Publ., 2013. 224 p. (In Russian).

26. Chumak O. V. *Entropii i fraktaly v analize dannykh* [Entropies and fractals in data analysis]. Moscow; Izhevsk, “Regulyarnaya i khaoticheskaya dinamika” Publ.: Institut komp'yuternykh issledovaniy Publ., 2011. 164 p. (In Russian).

27. Bobrov V. I., Varepo L. G., Godunov A. V. Application of fractal theory to describe and model the surface of printed materials. *Vestnik MGUP* [Bulletin of MGUP], 2010, no. 6, pp. 76–81 (In Russian).

28. Godunov A. V., Varepo L. G., Ikhilazov S. Z. On the issue of assessing the heterogeneity of the surface of materials for printing. *K voprosu otsenki neodnorodnosti poverkhnosti materialov dlya pechati* [News of universities. North Caucasian region. Technical sciences], 2011, no. 6, pp. 132–135 (In Russian).

Информация об авторах

Зильберглейт Марк Аронович – доктор химических наук, профессор кафедры технологии неорганических веществ и общей химической технологии. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: mazi@list.ru

Мидуков Николай Петрович – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой инженерной графики и автоматизированного проектирования. Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна (198095, г. Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, 4, В-409, Российская Федерация). E-mail: gturp-igap@bk.ru

Марченко Ирина Валентиновна – магистр, старший преподаватель кафедры полиграфических производств. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: Marchenko_i_v@belstu.by

Грудо Сергей Казимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры полиграфического оборудования и систем обработки информации. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: Grudo@belstu.by

Information about the authors

Zilbergleit Mark Aronovich – DSc (Chemistry), Professor, the Department of Technology of Inorganic Substances and General Chemical Technology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: mazi@list.ru

Midukov Nikolay Petrovich – DSc (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Engineering Graphics and Computer-Aided Design. St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design (V-409, 4, Ivan Chernykh str., 198095, St. Petersburg, Russian Federation). E-mail: gturp-igap@bk.ru

Marchenko Irina Valentinovna – Master, Senior Lecturer, the Department of Printing Production. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: Marchenko_i_v@belstu.by

Grudo Sergey Kazimirovich – PhD (Engineering), Assistant Professor, the Department of Printing Equipment and Information Processing Systems. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: grudo@belstu.by

Поступила 15.07.2024