

УДК 686.126

И. Г. Громыко, И. В. Марченко

Белорусский государственный технологический университет

**ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ МАТЕРИАЛОВ НА ФОРМИРОВАНИЕ
АДГЕЗИОННОГО ШВА И КОГЕЗИОННОЙ ПРОЧНОСТИ
КЛЕЕВОГО СЛОЯ В КОРЕШКЕ БЛОКА**

Статья посвящена исследованию влияния фрактальной структуры бумаги на формирование адгезионного шва в корешке блока, прочность которого зависит от суммарной площади взаимного контакта, определяемой величиной макронеровностей поверхности тела, количеством и размером пор и капилляров, глубиной проникания в них клея. Как показывают представленные рисунки, предельное упрочнение адгезионного шва достигается при максимальном заполнении микродефектов на поверхности бумаги. Наличие воздушных полостей на границе раздела адгезив – субстрат, приводит к концентрации напряжений на данных участках. В результате не только уменьшается фактическая площадь контакта, но и возникают потенциальные очаги разрушения адгезионной связи, происходит потеря прочности и разрушение издания. Данный характер образования адгезионной связи демонстрируют образцы, полученные на мелованной бумаге. Использование оптического способа контроля структуры бумаги позволяет снять профилограмму микропрофиля с последующей процедурой ее оцифровывания. Поскольку шероховатости бумаги являются нерегулярными образованиями, то их можно рассматривать как фрактальные и описывать с помощью соответствующих зависимостей. Использование математического аппарата теории фракталов позволяет учесть характер неоднородности структуры материалов и в сочетании с оптическим способом контроля структуры бумаги обеспечить высокую точность проводимых исследований.

Ключевые слова: адгезионный шов, когезионная прочность, оптический способ контроля, микроструктура бумаги, теория фракталов.

I. G. Gromyko, I. V. Marchenko

Belarusian State Technological University

**THE EFFECT OF THE STRUCTURE OF MATERIALS ON THE FORMATION
OF SEAM ADHESIVE AND COHESIVE STRENGTH
THE ADHESIVE LAYER IN THE SPINE UNIT**

The article is devoted to the study of the influence of the fractal structure of the paper on the formation of the adhesion seam in the back of the block, the strength of which depends on the total area of mutual contact, defined by the value of macroprocesses the surface of the body, the number and size of pores and capillaries, penetration depth in them glue. As the show presents drawings, limit the hardening of the adhesive seam is achieved with maximum filling of microdefects in the surface of the paper. The presence of air cavities at the interface adhesive-substrate leads to stress concentrations in these areas. As a result, not only reduced the actual contact area, but and there are potential foci of destruction of the adhesive bond, loss of strength and destruction of the edition. This character of formation of the adhesive bond demonstrate the samples obtained on coated paper. The use of optical method to control the structure of the paper allows you to remove profilogram white-with the subsequent procedure of digitization. Because of the roughness of the paper are irregular fractals, they can be considered as a fractal and describe with the appropriate dependencies. The use of mathematical apparatus of the theory of fractals allows to consider the nature of the heterogeneous structure of materials and in combination with an optical method to control the structure of the paper to ensure high accuracy of the conducted research.

Key words: seam adhesive, cohesive strength, optical control method, the microstructure of the paper, the theory of fractals.

Введение. В настоящее время широкое распространение в полиграфической промышленности получил способ клеевого бесшвейного скрепления с последующим фрезерованием и дополнительным торшонируванием корешка блока [1].

Основной операцией при изготовлении полиграфических изделий клеевым бесшвейным способом (КБС) является склеивание, при котором получается неразъемное соединение материалов при помощи промежуточного слоя — адгезива.

Основными достоинствами процессов склеивания являются простота технологии получения клеевого соединения, его высокая прочность и долговечность при сохранении гибкости, эластичности, что немаловажно для конструкции книжных изданий. Однако такие недостатки клеевых соединений, как невысокая раскрываемость, ограниченная толщина блоков из-за повышенной жесткости пленки, а также склонность клеевых пленок к старению, ограничивают применение клеевых соединений для скрепления изданий, рассчитанных на длительное и интенсивное использование, в том числе для книг в переплетной крышке [1].

Основная часть. В данной работе рассмотрен Т-образный тип клеевого соединения. Он применяется при клеевом бесшвейном скреплении. Площадь склейки книжного блока по торцам листов весьма мала: в среднем она примерно в 15 раз меньше, чем при склейке тетрадей блока по фальцам. Фрезерование корешка позволяет повысить площадь склейки торцевой поверхности листов с клеевой пленкой и листов друг с другом за счет проникновения клея на некоторую глубину между листами. Общая площадь склейки листов блока при соблюдении режимов фрезерования возрастает в 4–7 раз. Однако прочность и долговечность Т-образного клеевого соединения при этом возрастают в гораздо меньшей степени по следующим причинам: 1) механическое воздействие фрезы приводит к частичному разрушению связей между волокнами бумаги в корешковой зоне; 2) напряжения, возникающие в клеевом слое между листами блока при открывании книги, многократно выше, чем напряжения изгиба в клеевом слое на поверхности корешка [2].

Большие напряжения растяжения, возникающие в клеевом слое между листами блока при раскрывании книги, приводят к его быстрому разрушению, после чего функцию обеспечения долговечности скрепления блока принимает на себя клеевой слой на поверхности корешка. С учетом этого норма расхода клея при КБС примерно в 2 раза выше, чем при заклейке корешка блока, состоящего из тетрадей.

Процесс склеивания протекает в три этапа (прилипание, схватывание, закрепление), в течение которых образуется прочное неразъемное соединение, сохраняющее длительное время свои высокоэластические свойства в готовом изделии.

Для контроля качества клеевого соединения книжно-журнальной продукции, управления процессом склеивания, а также для правильного выбора клея очень важным является механизм физических и химических процессов, сопровождающих операции от нанесения клея до полного затвердения клеевого соединения.

Прочность и долговечность клеевого скрепления зависят от прочности адгезионного шва и

когезионной прочности воздушно-сухого клеевого слоя и бумаги. В настоящее время существует несколько теорий адгезии и склеивания, которые объясняют процесс образования адгезионного шва различными явлениями. К ним относят механическую, химическую, молекулярную, электрическую и диффузионную теории склеивания [3].

В основе данной работы лежит механическая теория. Согласно этой теории, жидкий клей заполняет капилляры, поры и трещины склеиваемых материалов, образуя после затвердевания прочное соединение, которое благодаря внедрению ворсинок в клеевой слой может противостоять усилиям растяжения, сжатия и сдвига. Прочность адгезионного шва по этой теории зависит от суммарной площади взаимного контакта, которая определяется величиной макронеровностей поверхности тела, количеством и размером пор и капилляров, глубиной проникания в них клея.

Целью данной работы является исследование влияния структуры материалов на формирование адгезионного шва и когезионной прочности клеевого слоя в корешке блока.

Исследования проводились на сканирующем электронном микроскопе JEOL JSM-5610 LV с системой химического анализа EDX JED-2201 (JEOL, Япония). В качестве исследуемых образцов были взяты блоки, скрепленные этиленвинилацетатным термоклеем при рабочей температуре 170–180°C. Блок № 1 изготовлен из офсетной бумаги массой 60 г/м², блок № 2 — из мелованной матовой чистоцеллюлозной бумаги Hantsol Paper массой 128 г/м², блок № 3 — из офсетной бумаги массой 80 г/м². Изучение микроструктуры таких материалов, как бумага и термоклей, позволяет получать изображение с реальной поверхностью.

На рис. 1 приведен характер образования адгезионного шва в корешке блока, изготовленного из офсетной бумаги массой 60 г/м².

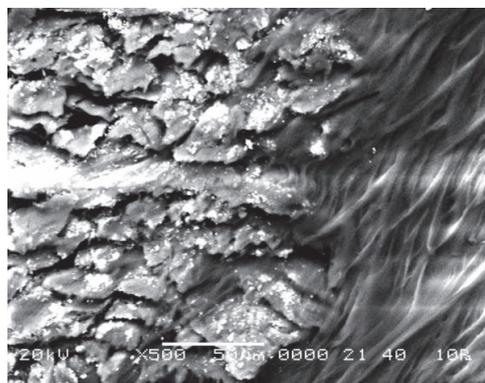


Рис. 1. Характер образования адгезионного шва в корешке блока из офсетной бумаги (60 г/м²)

На рис. 2 приведен характер образования адгезионного шва в корешке блока, изготовленного из офсетной бумаги массой 80 г/м².

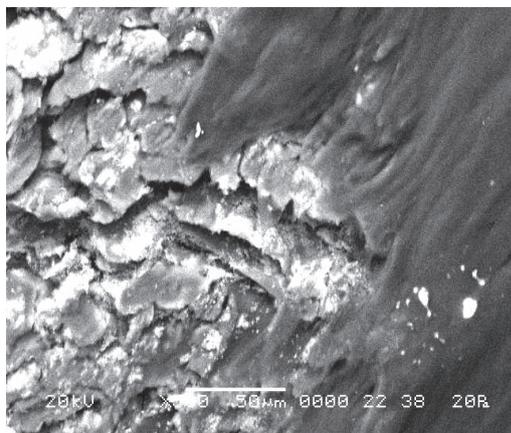


Рис. 2. Характер образования адгезионного шва в корешке блока из офсетной бумаги (80 г/м²)

При формировании многих адгезионных соединений в контакт с поверхностью субстрата вступает высоковязкая масса. В этих случаях для описания процесса формирования контакта адгезива и субстрата важнейшее значение приобретают вязкоупругие характеристики адгезива и условия формирования контакта (давление, температура). Большое внимание уделяется реологическим процессам, происходящим на границе раздела адгезив – субстрат, связанным с заполнением полимером микродефектов поверхности. Предельное упрочнение адгезионного шва достигается при максимальном заполнении микродефектов на поверхности субстрата.

Контакт адгезива с субстратом во многих системах не может быть абсолютным. На границе между адгезивом и субстратом всегда остаются незаполненные адгезивом полости, раковины и другие дефекты. Высокая вязкость адгезива, особенности топографии поверхности, недостаточно продолжительное время пребывания адгезива в пластическом состоянии или в виде низковязкого расплава — каждая из этих причин может привести к тому, что в готовом адгезионном соединении на границе раздела останутся поры и пустоты. В результате не только уменьшится фактическая площадь контакта, но и возникнут потенциальные очаги разрушения адгезионной связи, так как около воздушных полостей на границе раздела происходит концентрация напряжений. Микро-реологические процессы, происходящие на границе адгезив – субстрат, рассматриваются в качестве первой стадии процесса образования адгезионной связи. Межмолекулярное или химическое взаимодействие на границе раздела яв-

ляется основным фактором, обеспечивающим связь между фазами. Первая стадия образования адгезионной связи определяется и такими факторами, как вязкость адгезива, чистота поверхности, а также давление и температура [4].

Как показывают полученные на рис. 3 результаты образования адгезионного шва в корешке блока из мелованной бумаги массой 128 г/м², наличие воздушных полостей на границе раздела адгезив – субстрат приводит к концентрации напряжений на данных участках, потере прочности и разрушению издания.

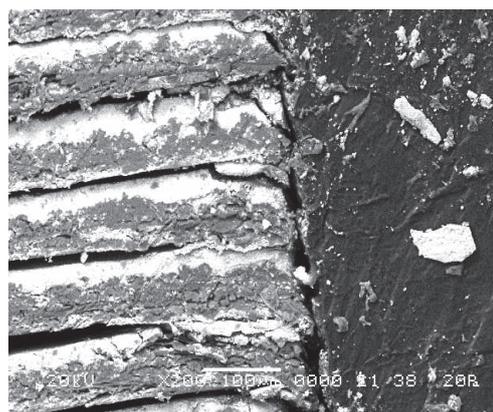


Рис. 3. Характер образования адгезионного шва в корешке блока из мелованной бумаги (128 г/м²)

С целью определения влияния микроструктуры материалов на характер образования адгезионного шва был использован оптический способ контроля структуры бумаги, который характеризуется высокой разрешающей способностью, простотой аппаратного оформления и реализации, бесконтактностью и высокой проникающей способностью. Результаты исследования позволили получить профилограмму микропрофиля бумаги с последующей процедурой ее оцифровывания.

Поскольку бумага характеризуется неоднородностью структуры, то для описания всего многообразия структур в системе был использован математический аппарат теории фракталов. В связи с тем что шероховатости являются нерегулярными образованиями [5], их можно рассматривать как фрактальные и описывать с помощью соответствующих зависимостей [6].

Общий коэффициент отражения шероховатой поверхности можно представить в виде суммы коэффициентов зеркального ρ_s и диффузного ρ_a отражения [7]:

$$\rho = \rho_s + \rho_a. \quad (1)$$

Коэффициент зеркального отражения определяется по формуле [8], согласно которой количество зеркально отраженной энергии явля-

ется экспоненциальной функцией параметров поверхности излучения. Для фрактальной шероховатой поверхности данную формулу можно представить в виде

$$\rho_s = \rho_0 e^{-\left(\frac{\omega_1 \sigma_1}{\lambda}\right)^2}, \quad (2)$$

где ρ_0 — коэффициент зеркального отражения гладкой (полированной) поверхности из того же материала, из которого изготовлена шероховатая поверхность; ω_1 — постоянная, зависящая от условий измерения; σ_1 — среднеквадратическое отклонение от средней линии профиля слабошероховатой фрактальной поверхности; λ — длина волны падающего излучения, нм.

Коэффициент диффузного отражения фрактальной поверхности определяется по формуле

$$\rho_\alpha = \rho_0 e^{-\left(\frac{\omega_2 \sigma_2 \cos \psi}{\lambda}\right)^2}, \quad (3)$$

где ω_2 — постоянная, аналог ω_1 для диффузного отражения; σ_2 — среднеквадратическое отклонение от средней линии профиля развитой диффузно отражающей фрактальной поверхности; ψ — угол падения излучения, град.

Показатель степени χ зависит от вида рассеивающей поверхности. Для бумаги данный показатель определяется из выражения [9]

$$\chi = 4 - D_s, \quad (4)$$

где D_s — фрактальная размерность поверхности.

Поскольку диффузно отраженный свет чувствителен к структуре и геометрии элементов, из которых сформирована поверхность, то фрактальную размерность поверхности можно выразить через объемную и предельную суммарную размерности [6]:

$$D_s = D_\Sigma - D_v, \quad (5)$$

где D_Σ — предельная суммарная размерность; D_v — объемная размерность.

Фрактальную размерность подпространства пересечения двух пространств с размерностью $D_{пр}$ и H можно выразить следующей формулой [10]:

$$D_{пр} = D_s + H - d, \quad (6)$$

где H — топологическая размерность плоскости, пересекающей поверхность бумаги, равна 2; d — топологическая размерность охватывающего пересечения пространства, равная 3.

Тогда фрактальная размерность подпространства пересечения двух пространств

$$D_{пр} = D_s - 1. \quad (7)$$

Соответственно, фрактальная размерность структуры бумаги определяется как

$$D_s = D_{пр} + 1. \quad (8)$$

Определение неоднородности микроструктуры бумаги с помощью фрактальной размерности позволяет получить в результате исследования не систему различных показателей, а единый показатель, отражающий характер микроструктуры. Кроме того, фрактальная размерность позволяет учесть влияние пространственной развитости микропрофиля, что более точно характеризует поверхностно-пространственную структуру бумаги.

Полученные профилограммы с последующей процедурой оцифровывания позволили рассчитать показатель фрактальной размерности бумаги. Также были определены параметры шероховатости [11]: R_a — среднее арифметическое отклонение профиля; R_z — высота неровностей профиля по десяти точкам; R_{max} — максимальная высота профиля. Результаты расчетов были сведены в таблицу.

Параметры шероховатости бумаги

№ измерения	$D_{пр}$	R_a	R_z	R_{max}	D_s
Офсетная бумага массой 60 г/м ²					
1	1,624	1,489	6,137	9,568	2,624
2	1,637	1,511	6,197	9,623	2,637
3	1,629	1,494	6,168	9,587	2,629
4	1,634	1,502	6,181	9,626	2,634
5	1,641	1,517	6,195	9,619	2,641
Офсетная бумага массой 80 г/м ²					
1	1,731	1,856	7,267	10,245	2,731
2	1,746	1,907	7,348	10,342	2,746
3	1,738	1,876	7,295	10,304	2,738
4	1,742	1,890	7,321	10,328	2,742
5	1,739	1,886	7,314	10,341	2,739
Мелованная бумага массой 128 г/м ²					
1	1,334	0,611	2,734	4,312	2,334
2	1,330	0,594	2,717	4,296	2,330
3	1,342	0,623	2,749	4,332	2,342
4	1,337	0,620	2,741	4,328	2,337
5	1,329	0,609	2,720	4,278	2,329

Анализ данных представленной таблицы демонстрирует значительную разницу характера структуры исследуемых видов бумаги. Наименее развитой поверхностью обладает мело-

ванная бумага вследствие большого содержания мелкодисперсных наполнителей, которые снижают порядок размера микронеровностей. Более развитая структура характерна для офсетной бумаги, содержащей меньшее количество наполнителей и более крупные растительные волокна. Также следует отметить, что с увеличением значений фрактальной размерности наблюдается рост значений R_a , R_z и R_{max} .

Необходимость определения фрактальной размерности обусловлена исследованиями в области микроструктуры неоднородных материалов. Влияние микроструктуры на условия проведения процесса клеевого бесшвейного скрепления значительно, и ее вклад в процесс выполнения данной операции определяет качество конечного результата.

Исследование характера образования адгезионного шва в корешке блока, изготовленного из разных видов бумаги, позволяет сделать вывод, что наиболее прочно склеиваются материалы с развитой шероховатой поверхностью, поскольку более шероховатые поверхности лучше смачиваются клеем, имеют большую площадь контакта с адгезивом и, следовательно, большую поверхность склейки, а острые вершины микронеровностей, обладающие повышенным запасом свободной энергии, являются активными центрами притяжения молекул адгезива.

Большинство переплетных материалов имеет достаточно развитую поверхность, поэтому к механической обработке поверхности склейки прибегают лишь при клеевом бесшвейном скреплении с фрезерованием корешковых фальцев, когда малая площадь торцов листов не может обеспечить достаточно надежную склейку [12].

Образование адгезионного шва в корешке блока, изготовленного из мелованной бумаги, характеризуется невысокой прочностью из-за образования значительных по размеру воздушных полостей, препятствующих образованию прочных связей на границе адгезив – субстрат.

Термопластичные клеи-расплавы не вызывают деформации бумаги при их нанесении и

дальнейшем пленкообразовании, поэтому с точки зрения клея направление раскроя бумаги не является столь важным. Более низкая адгезионная прочность этих клеев и быстрое затвердевание клея-расплава при контакте с бумагой увеличивает роль механической теории адгезии — чем больше площадь склеиваемой поверхности, тем выше прочность скрепления. Поэтому для этого типа клеев очень важна механическая обработка поверхности корешка и пористость бумаги. В пористой бумаге клей может затекать в поры на небольшую глубину, ввиду быстрого его затвердевания из-за разницы температур. Большая степень поверхностной проклейки глянцевой мелованной бумаги, отсутствие на ее поверхности пор и значительных микронеровностей, возникновение на кромках листа при срезке фальцев эффекта «заваривания» кромок верхним склеивающим слоем приводит к низкой прочности скрепления этих видов бумаги термоклеем.

Заключение. Результаты проведенных исследований позволяют сделать следующие выводы. Прочно склеиваются материалы с развитой шероховатой поверхностью, так как они имеют большую площадь контакта для склейки с адгезивом, а острые вершины микронеровностей, обладающие повышенным запасом свободной энергии, являются активными центрами притяжения молекул адгезива. Наиболее проблемными для клеевого бесшвейного скрепления с использованием термопластичного термоклея являются мелованные и высокопроклеенные жесткие виды бумаги. Использование клеевого бесшвейного скрепления для мелованных видов бумаги не рекомендуется (допускается бумага с мелованием в массе).

Таким образом, использование теории фракталов в сочетании с оптическим способом, обеспечивающим точность и оперативность при проведении исследований, позволяет оценивать вклад структуры используемых материалов и изучать полиграфические материалы с принципиально новой точки зрения.

Литература

1. Воробьев Д. В. Технология послепечатных процессов. М.: Изд-во МГУП, 2000. 392 с.
2. Корнилов И. К. Контроль качества и новые конструкции книжных блоков. М.: Изд-во МГУП, 1998. 140 с.
3. Корнилов И. К. Проектирование книжных конструкций: монография. М.: Изд-во МГУП, 2001. 212 с.
4. Мир знаний. Полимеры 3 [Электронный ресурс]. URL: <http://mirznanii.com/a/326348/polimery-3> (дата обращения: 14.12.2017).
5. Федер Е. Фракталы. М.: Мир, 1991. 254 с.
6. Кулак М. И., Ничипорович С. А., Медяк Д. М. Методы теории фракталов в технологической механике и процессах управления. Минск: Белорус. наука, 2007. 419 с.
7. Топорец А. С. Оптика шероховатой поверхности. Л.: Машиностроение, 1988. 191 с.

8. Davies H. The Reflection of Electromagnetic Waves from a Rough surface // Proceedings of the Institution of Electrical Engineers. 1954. Vol. 101, no. 3. P. 209–218.
9. Пьетронеро Л., Трозатти Э. Фракталы в физике. М.: Мир, 1988. 670 с.
10. Кулак М. И. Фрактальная механика материалов. Минск: Выш. шк., 2002. 304 с.
11. Шероховатость поверхности. Параметры, характеристики и обозначения: ГОСТ 2789-73. М.: Изд-во стандартов, 1985. 10 с.
12. Марченко И. В., Старченко О. П. Исследование прочности скрепления листов в корешке книжного блока при использовании PUR-клея // Труды БГТУ. 2013. № 8: Издат. дело и полиграфия. С. 34–38.

References

1. Vorob'ev D. V. *Tekhnologiya poslepechatnykh protsessov* [Technology of finishing processes]. Moscow, MGUP Publ., 2000. 392 p.
2. Kornilov I. K. *Kontrol' kachestva i novye konstruksii knizhnykh blokov* [Quality control and new designs of book blocks]. Moscow, MGUP Publ., 1998. 140 p.
3. Kornilov I. K. *Proektirovanie knizhnykh konstruksiy: monografiya* [Projection of book designs. Monograph]. Moscow, MGUP Publ., 2001. 212 p.
4. *Mir znaniy. Polimery 3*. [The world of knowledge. Polymers 3]. Available at: <http://mirznanii.com/a/326348/polimery-3> (accessed 14.12.2017).
5. Feder E. *Fraktaly* [Fractals]. Moscow, Mir, 1991. 254 p.
6. Kulak M. I., Nichiporovich S. A., Medyak D. M. *Metody teorii fraktalov v tekhnologicheskoy mekhanike i processakh upravleniya* [Methods of the theory of fractals in technological mechanics and control processes]. Minsk, Belorusskaya nauka Publ., 2007. 419 p.
7. Toporets A. S. *Optika sherokhovatoy poverkhnosti* [Rough surface optics]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1988. 191 p.
8. Davies H. The Reflection of Electromagnetic Waves from a Rough surface. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, 1954, vol. 101, no. 3, pp. 209–218.
9. P'etronero L., Trozatti Je. *Fraktaly v fizike* [Fractals in physics]. Moscow, Mir Publ., 1988. 670 p.
10. Kulak M. I. *Fraktal'naya mekhanika materialov* [Fractal mechanics of materials]. Minsk, Vysheyschaya shkola Publ., 2002. 304 p.
11. GOST 2789-73. Surface roughness. Parameters, characteristics and symbols. Moscow, Izdatel'stvo standartov Publ., 1985. 10 p. (In Russian).
12. Marchenko I. V., Starchenko O. P. Research of durability of fastening of sheets in a back of the book block when using PUR glue. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2013, no. 8: Publishing and Printing, pp. 34–38 (In Russian).

Информация об авторах

Громыко Ирина Григорьевна — кандидат технических наук, доцент, исполняющая обязанности заведующего кафедрой полиграфических производств. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: gromyko@belstu.by

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

Information about the authors

Gromyko Irina Grigor'yevna — PhD (Engineering), Associate Professor, Acting Head of the Department of Printing Production. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: gromyko@belstu.by

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

Поступила 23.01.2018