

УДК 676.017.55; 681.785.6

В.О. Бушинський, С.О. Воронов, В.Й. Панкратов, В.М. Родіонов

КОРЕЛЯЦІЙНИЙ АНАЛІЗ ХАРАКТЕРИСТИК БЛИСКУ І ГЛАДКОСТІ ПАПЕРОВОГО ПОЛОТНА З МЕТОЮ ЇХ КОНТРОЛЮ В ТЕХНОЛОГІЧНОМУ ПОТОЦІ

Through experiments conducted, we study the characteristics of gloss and smoothness of paper tape to develop the method of their technological control. By utilizing the method of statistical analysis, we prove that there is nonlinear correlation dependence between them. We calculate the parameters of regression equation, which has a parabolic form. Moreover, we find that for certain angles of incidence of light ray 70–80°, the parameter of correlation communication is the correlation relation signifying 0,80–0,85. It allows proposing the optical method of technological control of the parameter smoothness of paper directly in the process of production instead of the existent laboratory pneumatic method of measuring (the Bekks method).

Вступ

Поряд з такими основними технічними характеристиками паперового полотна, як поверхнева густина, білизна, блиск і непрозорість, широко використовується параметр "гладкість", тобто мікрорельєф поверхні паперу, що визначає його друкарські властивості. Гладкість паперу є нормативним параметром [1]. Кінцевого товарного вигляду паперове полотно набуває на останньому етапі виробництва при обробці на каландрах. Тут забезпечуються необхідні якості поверхні: зімкнутість, гладкість, густина, блиск і її однорідність. Дефекти каландрування, такі як нерівномірна гладкість й інші, як правило, призводять до браку продукції або до виробництва низькосортного паперового полотна. В більшості випадків каландри не забезпечені вимірювальною апаратурою для контролю паперу в процесі виробництва. Контроль, як правило, проводиться вибірково, на зразках, що вирізані з рулонного полотна. За цими зразками в лабораторії визначаються такі характеристики, як блиск, гладкість, прозорість, й інші властивості паперу. Режим роботи каландра задається зазвичай на основі суб'єктивних міркувань оператора.

На сьогодні міжнародні нормативні документи з вимірювання гладкості базуються на лабораторному методі вимірювання (методі Бекка) [1], в якому показником гладкості є час проходження повітря об'ємом 1 см³ між поверхнею паперу і полірованим склом при різниці тиску $0,5 \times 10^{-5}$ Па. Використання цього методу для безперервного технологічного контролю практично неможливе через необхідність щільного контакту між поверхнею паперу і скляною пластиною, тобто стаціонарності контролю. Спроби перейти до методів вимірювання в динаміці виявилися невдалими внаслідок техніч-

ної складності пристрою й значних відмінностей між результатами вимірювань гладкості статичним і динамічним методами.

Зрозуміло, що вибірковий лабораторний контроль не може забезпечити оптимальний режим роботи обладнання і оперативне регулювання процесу виробництва зразкового за якістю і рівномірністю полотна паперу. Необхідний безперервний технологічний контроль і перехід до автоматичного регулювання каландрування та всього процесу виробництва паперового полотна. Тому створення системи технологічного контролю процесу виробництва, в якому одночасно визначаються гладкість й інші основні характеристики паперового полотна, є актуальним завданням.

В [2] нами було проведено експериментальні дослідження блиску паперу і запропоновано метод контролю цього параметра в технологічному потоці. Очевидно, що блиск поверхні, як і гладкість, відображає стан поверхні паперового полотна. Якщо між цими параметрами існує певний зв'язок, то важливо дослідити парну кореляційну залежність блиску від гладкості, щоб використати вимірювання блиску для характеристики якості поверхні паперу, отриманого в процесі каландрування. При вимірюванні блиску не потрібні умови стаціонарності, паперове полотно може переміщуватися з будь-якою технологічною швидкістю, і це не впливає на його характеристики відбиття. При цьому найважливішою є відсутність необхідності повного контакту між вимірювальним пристроєм і папером.

Постановка задачі

Метою дослідження є статистичний аналіз сумісних вимірювань блиску і гладкості паперу і створення оптичного методу безперервного

технологічного контролю гладкості паперового полотна в процесі виробництва за допомогою вимірювання його блиску.

Методика досліджень

Відомо, що дзеркальна і дифузна компоненти відбитого від шорсткої поверхні світла і їх співвідношення значною мірою визначаються двома чинниками: розмірами нерівностей поверхні і кутом падіння світла. При нормальному куті падіння світлового променя дзеркальна компонента у відбитому світлі досягає максимуму тільки на ідеально гладкій поверхні з розмірами нерівностей по висоті не більше 0,2 мкм. Папір без спеціальних покриттів, у т.ч. і друкарський, з високими вимогами до гладкості характеризується шорсткостями значно більших розмірів. Це призводить до того, що в такому папері значно переважає дифузна компонента у відбитті порівняно з дзеркальною. Слід очікувати, що зі зменшенням гладкості, тобто зі збільшенням розмірів шорсткостей, величина дзеркально відбитої компоненти світлового потоку, відповідно, зменшуватиметься.

При збільшенні кута падіння світла на поверхню, з одного боку, збільшується повний коефіцієнт дзеркального відбиття згідно з Френелем, а з другого — поступово зменшується кількість світла, розсіяного на нерівностях поверхні, тобто зменшується дифузне відбиття.

Існує критерій, за якого розсіяння на нерівностях відсутнє:

$$h \cos \varphi \leq \lambda_{\text{еф}},$$

де h — розмір нерівностей по висоті, φ — кут падіння, $\lambda_{\text{еф}}$ — ефективна довжина хвилі падаючого світла. Покладаючи $\lambda_{\text{еф}} = 0,65$ мкм, що є характерною величиною для багатьох оптичних приладів, можна знайти критичне значення кута падіння світлового потоку $\varphi_{\text{кр}}$ для різних нерівностей, при перевищенні якого розсіяння на них відсутнє (таблиця).

Таблиця. Критичне значення кута падіння світлового променя залежно від нерівностей поверхні по висоті

h , мкм	$\varphi_{\text{кр}}$
0,30	78°30'
0,65	84°10'
1,00	86°05'
2,00	88°10'
3,00	88°45'

З наведеної таблиці видно, що при вимірюванні показника блиску при куті падіння 88°45' неможливо розрізнити нерівності поверхонь, що мають розміри від 0,3 до 3 мкм. Такі поверхні здаються однаково гладкими (промінь ковзає по поверхні). Оскільки косинус кутів близько 90° швидко змінюється, то для більш шорстких поверхонь залежність блиску від кута падіння має бути сильнішою.

На рис. 1 показано вид теоретично очікуваної залежності блиску від кута падіння для поверхонь різної гладкості.

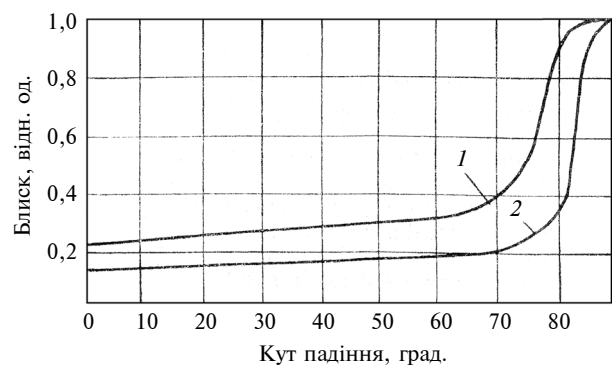


Рис. 1. Залежність ступеня блиску паперу від кута падіння світлового потоку для поверхонь різної нерівності: 1 — 0,65 мкм; 2 — 3 мкм

З рисунка видно, що зв'язок між кількістю дзеркально відбитого від паперу світлового потоку (блиску) і його гладкістю залежить від кута падіння світла на поверхню паперу. Цей зв'язок найсильнішим є в межах значень кутів падіння ~70–80°, що відповідає експерименту [2].

Результати експериментального дослідження

Вивчення взаємозв'язку блиску і гладкості паперового полотна було проведено для широкого діапазону кутів падіння при різному рельєфі поверхні друкарського паперу, а також крейдяного паперу з латексом, що відповідає різному ступеню каландрування. Гладкість паперу визначалася згідно з [1], а для дослідження блиску використовувалася установка, схема якої наведена в праці [2] і яка дає змогу здійснювати вимірювання в діапазоні кутів падіння 15–80°. Блиск і гладкість зразків вимірювалися як з лицевої, так і з сіткової сторони паперу.

Чутливість методу вимірювання блиску при малих кутах падіння світлового потоку мала, а похибка може досягати 50 % [2]. Можливості методу при кутах більше 80° можуть бути

обмежені тільки конструктивно, тобто розмірами джерел випромінювання (світлодіодами) і приймачів (фотодіодами).

Аналіз вимірювань близько 70 зразків друкарського паперу показав, що при невеликих кутах падіння: 15, 30 і 45°, блиск практично не пов'язаний з гладкістю (рис. 2, крива 1). При кутах більше 60° залежність між параметрами блиск і гладкість спостерігається вже сильніша (рис. 2, крива 2).

Значення показника гладкості від зразка до зразка істотно змінюється при однаковому значенні блиску, що на рис. 2 відображено областями розкиду даних відносно ліній середньарифметичних значень гладкості.

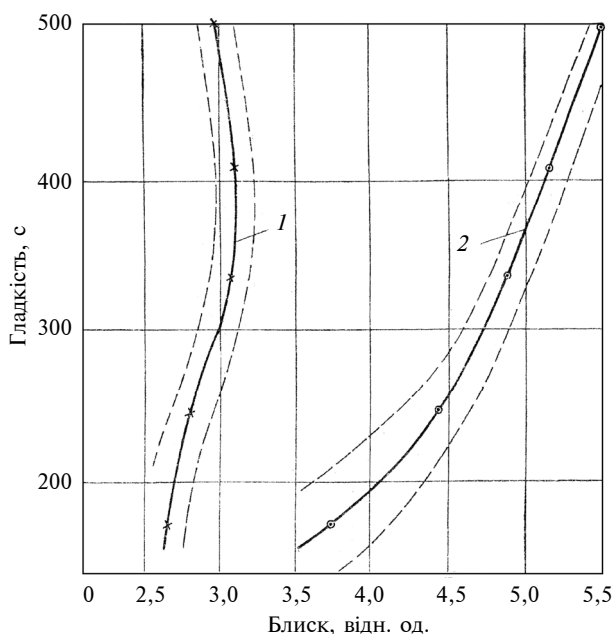


Рис. 2. Експериментальні криві залежності ступеня блиску друкарського паперу від його гладкості при різних кутах падіння світла: 1 – 45°, 2 – 75°. Штрихові лінії вказують на статистичний розкид даних вимірювань

Для більш детального статистичного дослідження було використано близько 350 зразків крейдяного паперу з латексом, блиск якого вимірювався безпосередньо в технологічному потоці з похибкою не більше 2%.

Одночасно з вимірюванням блиску були проведені вимірювання гладкості контрольного паперу за методикою міждержавного стандарту ГОСТ 12795–97 (ISO 5627–84 за Бекком) [1]. Результати вимірювань показано на рис. 3.

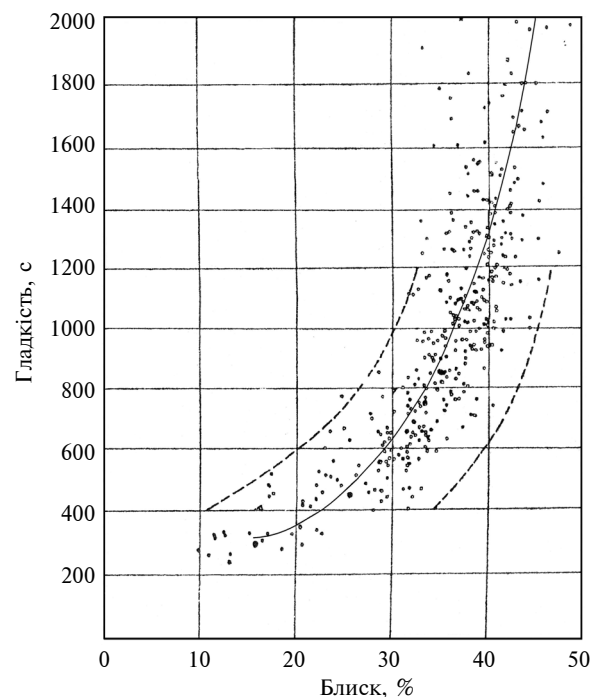


Рис. 3. Кореляційна залежність блиску від гладкості при куті падіння світла 75°. Штрихові лінії вказують на розкид, що відповідає трьом середньоквадратичним відхиленням 3σ [3]

Обговорення результатів

Отримані експериментальні дані (рис. 2, крива 2, і рис. 3), якісно узгоджуються з проведеним вище аналізом: абсолютне значення блиску, а також ступінь залежності при великих кутах падіння світла вищі, ніж при малих.

Незважаючи на великий розкид значень показників блиску і гладкості, між ними спостерігається досить значна кореляційна залежність, принаймні для певного діапазону значень блиску.

Для визначення форми залежності і щільності кореляційного зв'язку експериментальні дані (див. рис. 3) вибірки були піддані статистичній обробці: вони були зведені в кореляційну таблицю, розділені на групи, для кожної з яких було розраховано умовні середні арифметичні значення гладкості [4]. Апроксимація залежності гладкість–блиск припускалася параболічною кореляцією другого порядку:

$$G = a_0 + a_1 B + a_2 B^2,$$

де G – показник гладкості поверхні, B – її блиск, a_0, a_1, a_2 – сталі коефіцієнти. Побудова

лінії регресії здійснювалася методом найменших квадратів. Знайдено, що лінія регресії (рис. 3) може бути описана рівнянням

$$\bar{y} = 0,44x^2 - 1,96x + 4,77,$$

де \bar{y} – умовне середнє значення гладкості. Припускалося, що значення показників блиску і гладкості під час вимірювань розподілені за нормальним законом.

Універсальною характеристикою щільності нелінійного кореляційного зв'язку є коефіцієнт детермінації. Його частинним випадком для парної кореляційної залежності, що спостерігається в нашому аналізі, є кореляційне відношення, яке визначено згідно з [5, 6] виразом

$$\rho^2 = S_{\bar{y}_x}^2 / S_y^2, \quad (1)$$

де $S_{\bar{y}_x}^2 = D_{\bar{y}_x}$ – міжгрупова дисперсія, $S_y^2 = D_y$ – загальна вибіркова дисперсія.

При цьому

$$S_{\bar{y}_x}^2 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^s v_j (\bar{y}_j - \bar{y})^2, \quad (2)$$

де s – загальне число інтервалів групування; v_j – число вибіркового даних в j -му інтервалі групування; \bar{y}_j – умовне середнє значення гладкості в j -му інтервалі групування:

$$\bar{y}_j = \frac{1}{v_j} \sum_{i=1}^{v_j} y_{ji}, \quad (3)$$

де y_{ji} – значення гладкості в j -му інтервалі групування;

$$S_y^2 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^s \sum_{i=1}^{v_j} (y_{ji} - \bar{y})^2, \quad (4)$$

де $\bar{y} = \frac{1}{s} \sum_{i=1}^s \bar{y}_j$ – загальне середнє арифметичне значення гладкості.

Обчислення кореляційного відношення згідно з виразом (1) приводять до результату $\rho = 0,84$ для кута падіння світла 75° .

Така методика обробки даних забезпечила високий рівень достовірності результатів оцінки взаємозв'язку блиску і гладкості поверхні. Розрахунки показали, що кореляційне відношення при куті падіння світла 60° становить не більше $0,45-0,55$, а при куті 75° – $0,80-0,85$.

Це означає, що при куті падіння 75° зміна блиску більш ніж на 80% пов'язана з впливом на показник гладкості паперу розмірів нерівностей поверхні і їх кількості.

Таким чином, вимірюючи показник блиску при оптимальних кутах падіння, які можуть коливатися для різних типів паперу, можна визначити гладкість паперу з похибкою $\pm 15-20\%$ від верхньої границі вимірювань.

Вимірювання гладкості за допомогою блиску поки не може замінити звичний контроль гладкості під час арбітражного контролю якості паперової продукції за методом Бекка. Проте цей метод завдяки його простоті, малій інерційності і відсутності контакту датчика з паперовим полотном може бути успішно використаний для безперервного технологічного контролю. Точність оцінки гладкості, що досягається цим методом, цілком достатня для того, щоб при безперервному контролі інформації про гладкість автоматично підтримувати на заданому рівні або регулювати виробничий процес.

Висновки

Статистичний аналіз результатів сумісних вимірювань показників блиску і гладкості паперового полотна показав, що між ними існує кореляційна залежність, регресійна лінія якої може бути апроксимована параболою, форму якої визначено у статті.

Розрахований параметр щільності кореляційної залежності – кореляційне відношення – для кутів падіння світлового променя $70-80^\circ$ становить $0,80-0,85$. Таке значення кореляційного відношення вказує на можливість використання оптичних вимірювань блиску для визначення основної друкарської характеристики паперового полотна – гладкості, і дає можливість створити метод технологічного контролю цього параметру в процесі виробництва.

Результати роботи планується використати при розробленні систем багатопараметричного контролю паперового полотна в целюлозно-паперовій, меблевій та інших галузях промисловості.

В подальшому планується провести дослідження впливу на механізм формування мікроструктури поверхні паперу розмірів і концентрації целюлозних волокон, а також відносного вмісту наповнювачів, барвників та інших компонентів волокнистої суспензії.

1. *Бумага и картон. Метод определения гладкости (метод Бекка): ГОСТ 12795–97 (ИСО 5627–84).* – Введ. 01.01.2001.
2. *Метод технологічного контролю блиску стрічкових і листових матеріалів / В.О. Бушинський, С.О. Воронів, В.Й. Панкратов, В.М. Родіонов // Наукові вісті НТУУ “КПІ”.* – 2010. – № 1. – С. 130–134.
3. *Основи метрології та вимірювальної техніки: Навч. посіб. / М. Дорожовець, Б. Стадник, В. Мотало та ін. Т. 1.* – Львів: Львівська політехніка, 2005. – 532 с.
4. *Гмурман В.Е. Введение в теорию вероятностей и математическую статистику.* – М.: Высшая школа, 1966. – 380 с.
5. *Айвазян С.А., Мхитарян В.С. Прикладная статистика. Основы эконометрии: в 2-х т. Т. 1: Теория вероятностей и прикладная статистика.* – М.: Юнити-Дана, 2001. – 656 с.
6. *Айвазян С.А. Прикладная статистика. Основы эконометрии: в 2-х т. Т. 2: Прикладная статистика.* – М.: Юнити-Дана, 2001. – 432 с.

Рекомендована Радою
фізико-математичного факультету
НТУУ “КПІ”

Надійшла до редакції
6 вересня 2011 року