

МЕТОДИ ТА ПРИЛАДИ КОНТРОЛЮ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ

УДК 532.137:681.2

ГІДРОДИНАМІЧНІ ВИМІРЮВАЛЬНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ РЕОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПОЛІГРАФІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ

© Пістун Є. П., Крих А. Б., Близняк Т. В., 2002
Національний університет "Львівська політехніка"

Обґрунтовано необхідність вимірювання реологічних параметрів друкарських фарб та матеріалів в широкому діапазоні швидкостей зсуву. Розглянуто принципи побудови гідродинамічних вимірювальних перетворювачів цих параметрів. Наведено приклад визначення реологічних параметрів друкарської фарби за експериментальними значеннями вихідних сигналів вимірювальних перетворювачів.

Як відомо, реологічні властивості друкарських фарб суттєво впливають на якість і продуктивність процесів друку. За фізико-хімічною природою друкарські фарби належать до колоїдних систем, в яких пігмент розподілений у в'язкому середовищі. На різних стадіях технологічного процесу друку фарба зазнає різних за величиною напружень зсуву (відповідно і швидкостей зсуву), що досягають 10^6 Па. На кожній стадії необхідно мати фарбу з певними реологічними властивостями [1...5], що зумовлює її достатню складну реологічну поведінку.

В паперовій промисловості для вимірювання реологічних параметрів поліграфічних матеріалів застосовуються ротаційні та капілярні віскозиметри [3]. Максимальна швидкість зсуву існуючих ротаційних віскозиметрів становить 40000 с^{-1} , що приблизно в 50 разів нижче, ніж швидкість зсуву, наприклад в шаберному пристрої або між розподільчими валиками в машині. Найбільш придатними для вимірювання реологічних параметрів поліграфічних матеріалів в широкому діапазоні швидкостей зсуву є капілярні віскозиметри. Їх принцип роботи оснований на залежності характеристик руху досліджуваної речовини в дросельних (капілярних) елементах від її реологічних характеристик.

Експериментальними дослідженнями встановлено, що покривні суміші та друкарські фарби не підлягають закону руху Ньютона [6, 7]. Для опису їх реологічних кривих застосовують різні реологічні моделі Оствальда, Кессона, Кессона-Шульмана. Кожна з перелічених моделей з різним ступенем наближення описує істинну реологічну поведінку поліграфічних матеріалів у визначеному діапазоні швидкостей зсуву. При високих швидкостях зсуву покривна суміш поводить себе як псевдопластична

рідина. Для опису поведінки такої рідини застосовують модель Оствальда. Згідно з нею рідина характеризується двома параметрами: показником консистенції K , який є аналогом в'язкості, і параметром нелінійності n , який називається індексом течії. Залежність дотичного напруження τ від швидкості зсуву $\dot{\gamma}$ має такий вигляд:

$$\tau = K\dot{\gamma}^n. \quad (1)$$

Значення n , які відмінні від одиниці, вказують на відхилення властивостей матеріалу від характеристики ньютонівської рідини. Величина n для покривної маси звичайно є меншою одиниці [6].

Друкарські фарби належать до в'язкопластичних рідин [7, 8], які характеризуються граничним напруженням зсуву τ_0 , тобто напруженням, при якому рідина починає рухатися з положення рівноваги, і пластичною в'язкістю η . Деякі фарби при напруженнях, менших від граничного, мають постійну в'язкість внаслідок того, що структурні зв'язки, які руйнуються при зсуві, встигають тиксо트로пно відновлюватися в процесі течії. З підвищенням навантаження і швидкості в'язкість зменшується в результаті руйнування структури і орієнтації частинок структури в потоці. Інтенсивність зменшення в'язкості визначається особливостями структури даної фарби, але, як правило, при швидкостях біля 400 с^{-1} і вище досягається практично граничне постійне значення [8]. Таким чином, друкарські фарби мають спільні з іншими дисперсними системами закономірності і їх поведінку можна описати трипараметричною моделлю Кессона-Шульмана [8]

$$\tau^{1/n} = \tau_0^{1/n} + (\eta \cdot \dot{\gamma})^{1/n}, \quad (2)$$

в якій параметр нелінійності n приймає цілочисельні значення, що дорівнюють 1, 2, 3, 4, 5. При $n=2$ отримуємо таку модифіковану модель Кессона:

$$\tau^2 = \tau_o^2 + (\eta \cdot \dot{\gamma})^2. \quad (3)$$

Пластична в'язкість є дуже важливою характеристикою робочих властивостей друкарських фарб, оскільки до моменту друку фарба надходить зі зруйнованою внаслідок інтенсивної дії розкатувальних валків структурою. Вважають, що перенесення фарби і чіткість зображення залежать від того, чи відповідає в'язкість фарби при зруйнованій структурі даним конкретним умовам друку.

Теоретичні витратні характеристики капілярних трубок для вказаних моделей мають такий вигляд:

$$\Delta P = \frac{2lK}{R} \left(\frac{3n+1}{4n} \right)^n \left(\frac{4F}{\pi R^3} \right)^n, \quad (4)$$

$$q = \frac{4n}{\beta} \sum_{k=0}^n C_n^k \frac{(-1)^{3n+k}}{3n+k} \cdot \left(\beta^{1-\frac{k}{n}} - \beta^4 \right), \quad (5)$$

де $q = \frac{4\eta F}{\pi R^3 \tau_o}$, $\beta = \frac{2l\tau_o}{\Delta PR}$ - безрозмірні комплекси;

ΔP - перепад тиску на капілярній трубці; F - об'ємна витрата рідини; R, l - радіус і довжина капілярної трубки; $C_n^k = \frac{n!}{k!(n-k)!}$ - кількість сполучень.

Відомо, що при протіканні рідин через капіляри кінцевої довжини в зоні входу виникає додатковий, порівняно з усталеним режимом, перепад тиску [9], який залежить від швидкості рідини, діаметру каналу, а також від параметрів рідини. При високих швидкостях зсуву додатковий перепад тиску в капілярних трубках може спричинятись і пружними властивостями рідин. Для в'язкопружних рідин загальний перепад тиску від входних ефектів в капіляр ΔP_{ex} можна умовно розділити на дві складові: в'язку складову $\Delta P_{v'язк}$ і високоеластичну складову $\Delta P_{ел}$, тобто

$$\Delta P_{ex} = \Delta P_{v'язк} + \Delta P_{ел}.$$

При надвисоких швидкостях зсуву в'язкісна складова $\Delta P_{v'язк}$ у в'язкопружних рідинах складає менше 5% від загального значення ΔP_{ex} і більша частина втрат тиску на вході обумовлена високоеластичністю, а не в'язкістю системи.

Існує декілька методик врахування входних ефектів на капілярі. Так, зокрема, Беглі вважав, що високі значення перепаду тиску на вході в капіляр можна розглядати як фіктивне збільшення довжини капіляра, а також те, що при фіксованій швидкості

зсуву залежність загального тиску від довжини капіляра повинна бути лінійною [9]. Якщо екстрапулювати ці залежності до нульового перепаду тиску, то отримаємо фіктивне значення довжини капіляра при певній швидкості зсуву. Виходячи з цього, можна записати наступне рівняння для визначення дійсного напруження зсуву τ_c на стінці капіляра:

$$\tau_c = \frac{\Delta P}{2(l/R + n_B)}, \quad (6)$$

де ΔP - загальний перепад тиску в капілярі, l/R - відношення довжини капіляра до його радіуса, n_B - вхідна поправка Беглі при фіктивному видовженні капіляра. Поправку Беглі можна визначити, знайшовши відношення фіктивного напруження зсуву до дійсного, тобто

$$\frac{\tau_\phi}{\tau_c} = \frac{\Delta PR}{2l} \cdot \frac{2(l + Rn_B)}{\Delta PR} = \frac{(l + Rn_B)}{l} = \frac{\mu_\phi}{\mu}, \quad (7)$$

де μ_ϕ, μ - фіктивне та дійсне значення ефективної в'язкості. З рівняння (7) можна визначити поправку Беглі:

$$n_B = \left(\frac{\mu_\phi}{\mu} - 1 \right) \frac{l}{R}. \quad (8)$$

Щоб розділити високоеластичні та в'язкісні ефекти при русі рідин в капілярах було запропоноване наступне рівняння для обчислення вхідної поправки Беглі [9]:

$$n_B = n_c + \frac{\tau}{2G}, \quad (9)$$

де n_c - поправка Куетта, G - модуль високоеластичності.

В літературі вказується, що поправка Беглі для високоеластичних рідин значно перевищує поправку Куетта [9]. Величина входних ефектів може складати до 50% перепаду тиску на капілярі. Особливо великою вона є при високих швидкостях зсуву в еластичних рідинах. Таким чином, для побудови вимірювальних перетворювачів реологічних параметрів рідин необхідно враховувати або компенсувати втрати тиску від входних ефектів.

В гідродинамічних вимірювальних перетворювачах реологічних характеристик ньютонівських рідин пропонується застосовувати схеми на двох та більше дросельних елементах. Такі схеми дозволяють автоматично компенсувати втрати тиску на входні ефекти капілярів.

Розглянемо яким чином це здійснюється. Запишемо різниці тисків, що виникають на кожному з двох послідовно з'єднаних капілярів однакового радіусу R довжиною l_1 і l_2

$$\Delta P_{l1} = \frac{4F}{\pi R^3} \frac{2l_1}{R} \mu_{\phi1} = \frac{8F}{\pi R^4} \mu(l_1 + n_B R), \quad (10)$$

$$\Delta P_{l_2} = \frac{4F}{\pi R^3} \frac{2l_2}{R} \mu_{\phi 2} = \frac{8F}{\pi R^4} \mu(l_2 + n_B R). \quad (11)$$

У результаті віднімання рівняння (11) від (10) отримаємо, що

$$\Delta P_{l_1} - \Delta P_{l_2} = \frac{8F}{\pi R^4} \mu(l_1 - l_2). \quad (12)$$

Отже, як видно з рівняння (12), при вимірюванні різниці перепадів тиску на капілярах втрати тиску на вході ефекти взаємокомпенсуються і, таким чином, за результатами вимірювання перепадів тиску на капілярах різної довжини можна отримати дійсне значення в'язкості при певній швидкості зсуву.

Якщо по капілярах тече речовина, що підпорядковується моделі Оствальда, то для автоматичного вимірювання показника консистенції та індексу течії необхідно здійснити вимірювання перепадів тиску на капілярах при різних значеннях витрати

$$\begin{cases} \Delta P_1 = \frac{2(l_1 - l_2)K'}{R} \left(\frac{4F_1}{\pi R^3} \right)^n, \\ \Delta P_2 = \frac{2(l_1 - l_2)K'}{R} \left(\frac{4F_2}{\pi R^3} \right)^n, \end{cases} \quad (13)$$

де ΔP_1 , ΔP_2 – різниці перепадів тиску на капілярах довжиною l_1 і l_2 відповідно при витратах F_1 і F_2 ;

$$K' = K((3n+1)/4n)^n.$$

Для визначення реологічних параметрів K і n необхідно розв'язати отриману систему рівнянь (13) відносно цих величин. Поділимо перше рівняння системи на друге і в результаті отримаємо, що

$$\begin{aligned} \frac{\Delta P_1}{\Delta P_2} &= \frac{2(l_1 - l_2)K'}{R} \left(\frac{4F_1}{\pi R^3} \right)^n \times \\ &\times \frac{R}{2(l_1 - l_2)K'} \left(\frac{\pi R^3}{4F_2} \right)^n = \left(\frac{F_1}{F_2} \right)^n. \end{aligned} \quad (14)$$

Після логарифмування отриманого рівняння індекс течії n можна визначити за формулою

$$n = \lg \left(\frac{\Delta P_1}{\Delta P_2} \right) / \lg \left(\frac{F_1}{F_2} \right), \quad (15)$$

а показник консистенції K знайдемо, наприклад, з першого рівняння системи (13)

$$K = \frac{\Delta P_1 R}{2(l_1 - l_2)} \cdot \left(\frac{\pi R^3}{4F_1} \right)^n \left(\frac{4n}{3n+1} \right)^n. \quad (16)$$

Згідно з вище викладеного, для побудови віскозиметра, схема якого зображена на рис.1, необхідно застосувати послідовно з'єднані капіляри 1 і 2 різної довжини однакового діаметру, а різні витрати рідини в капілярі забезпечити зміною швидкості переміщення поршня 4 в циліндрі 3, до якого під'єднуються ці капіляри.

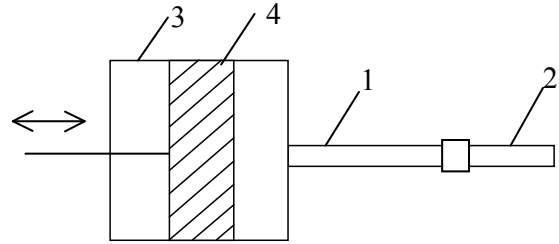


Рис. 1. Схема віскозиметра

Особливістю такого віскозиметра є можливість забезпечення надвисоких швидкостей зсуву рідини в капілярах (вона може досягати 10^6 c^{-1}). Такі швидкості зсуву досягаються вибором якомога меншого діаметра капіляра, а також швидкістю переміщення поршня. Для заданого діапазону вимірювання в'язкості ($\mu = 80 \dots 120 \text{ мПа}\cdot\text{с}$) і досягнення зазначених швидкостей зсуву вибрані капіляри з внутрішнім діаметром 0,5 мм і довжинами $l_1 = 30 \text{ мм}$ і $l_2 = 50 \text{ мм}$. Швидкість переміщення поршня в циліндрі з внутрішнім діаметром $D = 0,05 \text{ м}$ при ефективній швидкості зсуву 10^5 c^{-1} складає 0,6125 м/с. Така швидкість переміщення поршня при вибраному діаметрі капілярів забезпечує ламінарний (структурний) режим руху в капілярі.

Більші можливості мають дросельні вимірювальні схеми, які будуються на базі дросельних матриць, найпростіша з яких містить чотири капілярні трубки, що утворюють мостову гідродинамічну схему [10].

Для вимірювання реологічних параметрів друкарських фарб пропонується гідродинамічна вимірювальна система, що складається з двох послідовно з'єднаних мостових перетворювачів. Кожний з них містить чотири капіляри однакового внутрішнього діаметру: два однакових коротких і два однакових довгих. Капіляри однакової довжини знаходяться в протилежних плечах мостової схеми (рис. 2).

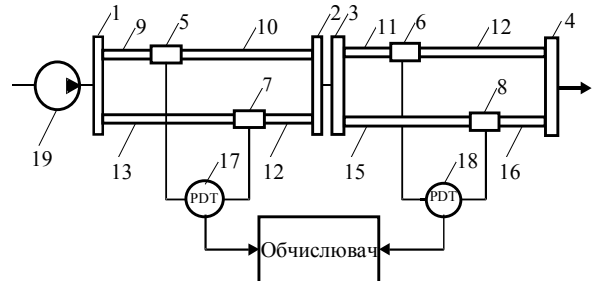


Рис. 2. Принципова схема гідродинамічної вимірювальної системи реологічних параметрів друкарських фарб

Перший мостовий перетворювач обмежений вхідною 1 і вихідною 2 камерами, а другий – вхід-

ною і вихідною камерами 3 і 4. Короткі капіляри 9 і 12 довжиною $l_{к1}$ і довгі капіляри 10 і 13 довжиною $l_{о1}$ в першому мостовому перетворювачі з'єднані міжросельними камерами 5 і 7. Короткі капіляри 11 і 16 довжиною $l_{к2}$ і довгі капіляри 12 і 15 довжиною $l_{о2}$ в другому перетворювачі з'єднані міжросельними камерами 6 і 8. До міжросельних камер підключені дифманометри 17, 18. Для забезпечення незмінної витрати через капіляри перед мостовим перетворювачем встановлений задавач постійної витрати 19.

Вихідними сигналами мостових перетворювачів є перепади тиску у міжросельних камерах, в яких відсутні втрати тиску від входних ефектів [11]. Ці перепади тиску, що вимірюються за допомогою дифманометрів, далі використовуються для вибору реологічної моделі і її параметрів.

Як зазначено вище, друкарські фарби в широкому діапазоні швидкостей зсуву задовільно описуються моделлю Кессона-Шульмана. Параметри цієї моделі а саме: пластична в'язкість η та граничне напруження зсуву τ_o визначаються за витратними характеристиками (5). Ці рівняння відповідають стабілізованому руху в'язкопластичної рідини з різними показниками нелінійності n . За дійсні значення η, τ_o, n приймаються такі, які забезпечують мінімум функції [12]

$$I = \sum_{i=1}^2 (\Delta P_i^e - \Delta P_i^p)^2, \quad (17)$$

де $\Delta P_i^e, \Delta P_i^p$ – експериментальні та розрахункові значення перепаду тисків, виміряні у вихідних ді-

гоналях мостових перетворювачів; i – номер мостового перетворювача.

Згідно алгоритму вибору реологічної моделі і розрахунку її параметрів спочатку задаються експериментальні значення перепаду тисків, витрати, конструктивні характеристики капілярів, а також вектор початкових значень параметрів η, τ_o , при яких обчислюється значення функції I з розрахунковими значеннями перепадів тиску за рівнянням (5) при $n=1$. Потім значення η, τ_o змінюються в напрямку зменшення I . Після знаходження η і τ_o , що забезпечують мінімальне значення функції I для рівняння з $n=1$, аналогічно розраховуються η і τ_o для наступних рівнянь (5) з показником нелінійності $n=2, 3, 4, 5$. Таким чином, отримується вектор значень функції I , з яких знаходять найменше числове значення I і відповідні йому значення n, η і τ_o . Так встановлюється модель досліджуваної рідини і її параметри. За цим алгоритмом складено програму в середовищі Matlab, робота якої була перевірена за результатами експериментального дослідження друкарської фарби марки Water Based Black 478-72532, реологічна крива якої зображена на рис. 3. [13]. З графіка залежності розрахованих значень цільової функції I від показника нелінійності n (рис. 4), видно, що найменше числове значення функція I приймає при $n=4$. В результаті виконання програми отримані такі реологічні параметри досліджуваної друкарської фарби: $\tau_o = 0,9050$ Па, $\eta = 0,0049$ Па·с, $n = 4$.

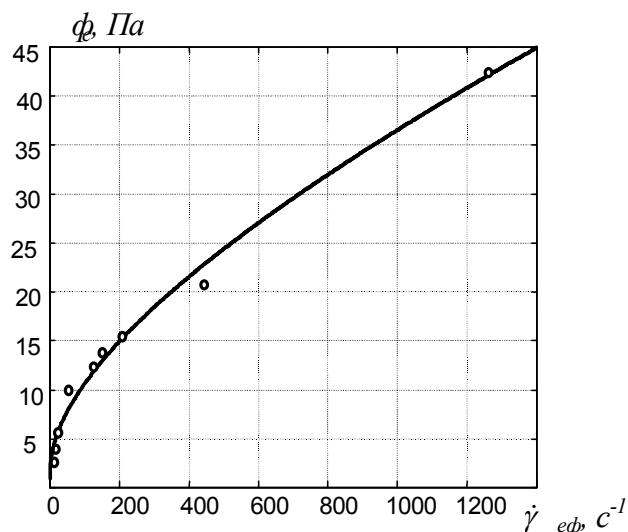


Рис. 3. Експериментальна та розрахункова залежності напруження зсуву на стінці капіляра від ефективної швидкості зсуву для друкарської фарби

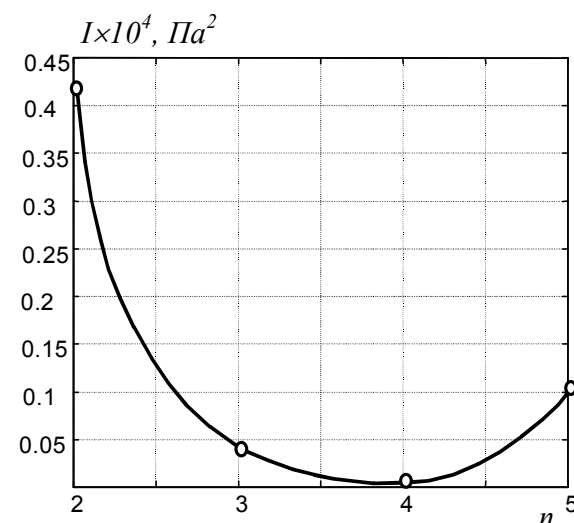


Рис. 4. Залежність значень цільової функції від показника нелінійності моделі Кессона-Шульмана

Отримані математичні моделі вимірювальних гідродинамічних перетворювачів та розроблені алгоритми обробки їх вихідних сигналів можуть бути застосовані для вирішення задач контролю реологічних характеристик друкарських фарб і покривних сумішей.

1. Grön J., Molarius-Mäyränen S., Änäs P.-H. Improving the Process Runnability and FCO Quality by Optimizing the Coating Color Composition // TAPPI Proceedings 1997 Coating Conference. 2. Salminen P., Roper III J., Urscheler R., Chase D. Optimizing the Coating Formulation to Reduce Misting in High-Speed Film Coating // TAPPI Proceedings 1996 Metered Size Press Forum. 3. Hilden K. K., Mustonen I. UltraHigh Shear Viscometer application data sheet // August 1995, Vol. 1.2 4. Практика офсетного друку – Львів: Палітра друку, 2001. – 264 с. 5. Тюриков Д., Вассерман И., Лялина Э. О реологических свойствах печатных красок // Полиграфическое производство. – 1961. - № 1. – С. 27-29. 6. Canard P. Rheological Properties of Coating Colors at High Shear Rates and Their Behavior on Blade Coaters // Tappi Journal. – 1974. - Vol. 57. - № 11. 7. Анісімова С. Властивості

друкарських фарб і їх вплив на якість відбитків // Палітра друку. - 1988. - № 3. – С. 38-45. 8. Смольский Б. М., Шульман З. П., Гориславец В. М. Реодинамика и теплообмен нелинейно вязкопластичных материалов. – Минск: Наука и техника, 1970. – 448 с. 9. Чанг Дей Хан. Реология в процессах переработки полимеров. – М.: Химия, 1979. – 368 с. 10. Пістун Є. П., Крих Г. Б. Принципи побудови гідродинамічних вимірювальних перетворювачів на базі дросельних матриць // Методи та прилади контролю якості. - 2000. - № 5. - С. 56-59. 11. Крых А. Б. Гидродинамические измерительные системы физико-механических параметров неньютоновских жидкостей // Теплоэнергетические системы и устройства. Вісник Львів. політехн. ін-ту. – 1984. – № 208. - С. 36-38. 12. Крих Г. Б. Методика оброблення сигналів гідродинамічних вимірювальних перетворювачів реологічних параметрів неньютоновських рідин. // Теплоенергетика. Інженерія довілля. Автоматизація. Вісник ДУ “Львівська політехніка”. – 1999. - № 378. - С. 86-88. 13. Розум Т., Дорош А.. Реологічні характеристики фарб флексографічного друку // Поліграфія 2000. – 2000. - № 5. - С. 48-49.

УДК 622.243:681.513.6:519.216

ТОЧНІСТЬ МЕТОДУ ВИЯВЛЕННЯ МЕЖІ ПЛАСТІВ

© Горбійчук М. І., 2002

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Показано, що точність алгоритму виявлення межі пластів визначається двома величинами – часом затримки і дисперсією випадкової послідовності G_k в кожний дискретний момент часу. Наведена методика їх обчислення і показано їх вплив на процес знаходження межі пластів.

В роботі [1] запропонований метод виявлення зміни межі пластів, що розбурюються, в основі якого лежить спостереження за K_ϵ - показником. Цей показник визначається як швидкість зміни оцінки озброєння долота.

Оцінка озброєння долота ϵ – це відношення початкової швидкості буріння v_0 до її поточного значення v_t . При бурінні в однорідних породах K_ϵ залишається постійним, а після того, як долото перейшло в інший пласт, він стрибкоподібно змінює своє значення.

Оскільки на вимірюване значення K_ϵ - показника накладається значна перешкода, то момент зміни фізико-механічних властивостей порід маскується цією перешкодою. Тому для надійного визначення межі пластів був запропонований метод, в основі якого лежить наступне ітераційне співвідношення:

$$G_k = \sqrt{1 - \frac{1}{k} G_{k-1} + \frac{g_k - 1}{\sigma_k \sqrt{2k}}}, \quad (1)$$

де $g_k = \frac{1}{\sigma_{K_\epsilon}^2} (K_\epsilon - \bar{K}_\epsilon)^2$; $\sigma_{K_\epsilon}^2$ - дисперсія перешкоди,

яка підпорядковується нормальному закону розподілу; \bar{K}_ϵ - математичне сподівання випадкової величини.

Нехай k_0 – момент переходу долота із одного пласта в інший, які відрізняються своїми фізико-механічними властивостями. Тоді [1]

$$M[G_k] = 0, \quad 0 \leq k \leq k_0.$$

Після того, як долото перейшло в інший пласт,

$$M[G_k] = \frac{1}{(2k)^{1/2}} S_M (k - k_0), \quad (2)$$