

УДК 681.5.08:655.3

МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ВИМІРЮВАННЯ В'ЯЗКОСТІ ДРУКАРСЬКИХ ФАРБ

У. П. Пановик, О. М. Сорочинський

*Українська академія друкарства,
вул. Під Голоском, 19, Львів, 79020, Україна*

Проаналізовано методи віскозиметрії для дослідження реологічних властивостей фарб, що використовуються в поліграфії. Розглянуто будову та принцип роботи найбільш використовуваних віскозиметрів для визначення в'язкості друкарських фарб різного способу друку. Здійснено аналіз конструктивних особливостей чашкових віскозиметрів. Досліджено залежності кінематичної в'язкості від часу витікання рідини для групи стандартних моделей віскозиметрів, що побудовані на основі емпіричних рівнянь для перерахунку умовної в'язкості. Визначено причини суттєвих відмінностей у значеннях часового вимірювання для чашок із різною геометрією та діаметром сопла за однакової в'язкості фарби. Розглянуто ротаційний метод вимірювання в'язкості. Визначено галузь застосування ротаційних віскозиметрів із вимірювальною системою конус-плита та коаксіальні циліндри. У середовищі Matlab-Simulink побудовано імітаційну модель ротаційного віскозиметра, яка відтворює взаємозв'язок між геометричними параметрами рухомого органу та в'язкістю. За результатами моделювання та двофакторного аналізу визначено умови використання валів та конусів за їхніми геометричними розмірами під час вимірювання в'язкості фарби.

Ключові слова: *друкарські фарби, в'язкість, віскозиметр чашка, ротаційний віскозиметр, коаксіальні циліндри, конус-плита, імітаційна модель.*

Постановка проблеми. Якість друкованої продукції переважно залежить від взаємодії фарби та матеріалу, що задруковується. Відтворення зображення на відбитку потребує правильного вибору задруковуваного матеріалу, використання відповідних фарб, чіткого налаштування та експлуатації друкарської машини тощо. Очевидно, що одним із головних факторів формування відбитка є вибір фарби для обраного способу друку та матеріалу, що задруковується. На сьогодні великий асортимент друкарських фарб із різноманітними технічними параметрами, які необхідні для виготовлення поліграфічної продукції, представлено різними зарубіжними та вітчизняними фірмами-виробниками, наприклад, Sun Chemical, Flint Group, Toyo Ink тощо. В умовах жорсткої конкуренції та необхідності виробництва високоякісної продукції до сучасних фарб висувають високі вимоги. Вони повинні мати цілий комплекс властивостей: міцність до стирання, висока швидкість закріплення на папері, висока в'язкість і низька липкість, стабільність фарби в друкарській машині. Сукупність цих особливостей і визначає властивості друкарських фарб,

які мають відповідати визначеному способу друку та друкарському обладнанню, особливостям конкретного друкарського завдання та властивостям матеріалу, що задруковується. Вони визначають поведінку фарби в процесі друкування та умови отримання високоякісного відбитка.

Отже, посеред вимог до друкарських фарб є відповідність їхнім реологічним властивостям, одним із важливих показників яких є в'язкість. Визначення в'язкості фарби є досить важливим етапом при підготовці та й у процесі друкування високоякісної поліграфічної продукції. В'язкість фарби характеризує її придатність до використання та визначає її характеристики – насиченість кольору, рівномірність покриття, яскравість тощо. Для контролю та визначення параметрів в'язкості друкарських фарб використовуються віскозиметри, які розроблені за конкретним методом віскозиметрії. Тому доцільно було б розглянути всі методи віскозиметрії та засоби вимірювання, які використовуються під час визначення в'язкості друкарських фарб для різних способів друкування.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Реологічні властивості друкарських фарб суттєво впливають на якість та продуктивність процесу друкування. На різних стадіях технологічного процесу друкарська фарба зазнає різних змін, тобто на кожній стадії необхідно мати фарбу з певними реологічними властивостями [10, 11]. Встановлено, що якість відбитка багато в чому залежить від стабільності в'язкості фарб, на яку суттєво впливає зміна температури та тиску. Чим вища температура, тим нижча в'язкість фарби. У роботах [1, 4] представлені результати дослідження в'язкості офсетних фарб під час зміни температури, а публікації [6, 9] висвітлюють цю ж проблему для флексографічних фарб. Проте у цих роботах не висвітлено процес визначення в'язкості фарби.

У поліграфії для вимірювання реологічних параметрів друкарських фарб застосовуються ротаційні та капілярні віскозиметри. Особливості методів визначення в'язкості фарб для різних способів друку представлені в роботах [5, 15], а загальні принципи побудови та роботи віскозиметрів – працях [2, 3, 8]. Проте загалом інформації щодо процесу визначення в'язкості друкарських фарб украй мало.

Мета статті – аналіз сучасного стану та галузь застосування віскозиметрів для вимірювання в'язкості фарб різного способу друкування.

Виклад основного матеріалу дослідження. В'язкість є найважливішою друкарсько-технічною характеристикою фарби, оскільки її значення визначає рівномірність накочування фарби, якість відтворення зображення та багато інших параметрів друкарського процесу [13]. За умови використання фарби з дуже низькою в'язкістю шар фарби може мати нерівномірну товщину і гладкість. Хоча нерівномірність шару фарби буде спостерігатись і при занадто високій в'язкості через налипання фарби на форму. Чим вища в'язкість, тим менше фарба розтікається по поверхні матеріалу, що задруковується, а отже, вища роздільна здатність друку й менша величина розтискування. В'язкість фарби має відповідати швидкості друкування: чим вища швидкість, тим меншою є в'язкість фарби. Крім того, в'язкість залежить від способу друку та типу друкарської форми.

В'язкість офсетних фарб вимірюють у Пуазах (П), або Паскаль-секундах (Па·с). Для офсетного друку використовують пастоподібні друкарські фарби високої в'язкості (динамічна в'язкість $\eta=16 \dots 100$ Па·с). Фарба має не висихати на валиках фарбового апарата, а також під час переносу з друкарської форми на офсетне полотно. Так, для аркушевого офсетного друку зі швидкістю друкарської машини до 7000 об/год в'язкість кольорових фарб не має перевищувати 150–180 пуаз (15–18 Па·с), а чорних фарб – 220–280 пуаз (22–28 Па·с) [14].

На відміну від офсетних фарб для глибокого друку використовують друкарські фарби низької в'язкості $\eta=0,05 \dots 0,2$ Па·с, а в ілюстраційному глибокому друці – навіть із в'язкістю 0,01 Па·с, яка за високої швидкості друку могла б заповнювати комірки форми. Для флексографічного друку використовують фарби з в'язкістю, яка схожа до фарб глибокого друку ($\eta=0,05 \dots 0,5$ Па·с).

Для досягнення високої якості відбитків особливо важливим є регулювання під час друкування в'язкості, зміна якої зумовлена механізмом перенесення, циркуляції фарби, підвищенням температури та випаровуванням розчинника. Якщо на друкарській машині не передбачено автоматичне регулювання в'язкості, необхідно періодично контролювати в'язкість вручну. Відповідно чим частіше будуть проводитися вимірювання, тим менша ймовірність появи некондиційної продукції. Здебільшого тестування в'язкості фарби проводиться для рідких фарб, оскільки вони постачаються друкарням із високим показником в'язкості, а пастоподібні друкарські фарби постачаються «готовими до вживання».

Головним інструментальним засобом для визначення в'язкості є віскозиметр. Для визначення в'язкісних характеристик рідини користуються віскозиметрами трьох основних типів, побудованими за принципом падаючого тіла, витікання рідини і зсуву в кільцевому зазорі. У поліграфії загалом розрізняють два основні типи віскозиметра – ротаційний та гравітаційний. Перший тип віскозиметра використовується під час роботи з в'язкими фарбами для офсетного та трафаретного друку. Другий тип – найпростіший інструмент, що широко застосовується на поліграфічному виробництві для флексографічного та глибокого друку.

Для відносних вимірювань в'язкості фарб із низькою в'язкістю на основі гравітаційного методу віскозиметрії використовують так званий проточний віскозиметр – прецизійно виготовлену «чашку» з каліброваним нижнім отвором певного діаметра (сопла). Час витікання фарби з наповненої до верхнього краю чаші встановлює умовну в'язкість, яка вимірюється в секундах (с).

Загалом у світі налічується приблизно 40 різновидів таких приладів, що мають різну площу та величину отвору, геометрію та об'єм. Найпоширеніші віскозиметри – ISO, DIN, Shell, Zahn, B3-234. Зазвичай для флексографії застосовують чашкові віскозиметри: B3 – 246 (стандарт ГОСТ 9070–75) та ISO (стандарт ISO 2431). Для вимірювання в'язкості фарб глибокого друку використовують чаші: DIN (стандарт DIN 53211) та Zahn cup, Shell cup (стандарт ASTM 4212). На рис. 1 наведено кілька різновидів чашок, відповідно до різних стандартів.

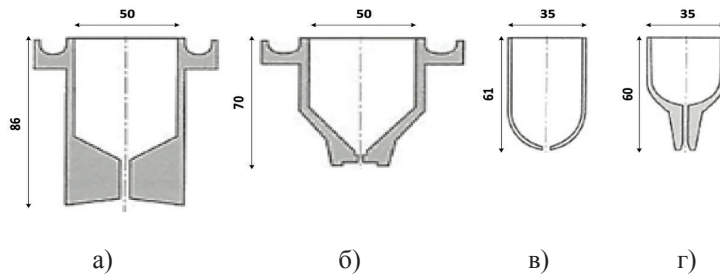


Рис. 1. Різновиди чашкових віскозиметрів: а) ISO 2431; б) DIN 53211; в) Zahn; г) Shell

Отже, чашкові віскозиметри регламентуються відповідно до міжнародних або національних стандартів, велика кількість яких вносить плутанину під час визначення в'язкості. Загалом кінематична в'язкість за цим методом визначається:

$$\nu = K_C \cdot t, \quad (1)$$

де K_C – капілярна константа, яка визначається під час калібрування, тобто при вимірюванні еталонної рідини з відомою в'язкістю, $\text{мм}^2/\text{с}^2$; t – час витікання, с.

Зазвичай перерахунок часу витікання в кінематичну в'язкість для різних типів чашок здійснюється за емпіричними формулами або графіками та таблицями, які представлені стандартами. Відповідно до європейського стандарту ISO 2431 під час визначення в'язкості використовуються чотири чашки № 3, № 4, № 5 та № 6 з однаковим значенням діаметра циліндричної частини (50 мм), об'ємом (100 мл) та висотою сопла (20 мм), але з різними діаметрами – 3, 4, 5, 6 мм відповідно. Кінематична в'язкість визначається емпіричним рівнянням:

$$\nu = A \cdot t - B/t, \quad (2)$$

де A ($\text{мм}^2/\text{с}^2$), B (мм^2) – константи для конкретного типу чашки, які визначаються її геометричними характеристиками (табл. 1).

Таблиця 1

Конструктивні параметри чашки ISO

№ чаші	D, мм	A, $\text{мм}^2/\text{с}^2$	B, мм^2
3	3	0,443	200
4	4	1,370	200
5	5	3,280	220
6	6	6,900	570

Відповідно до стандарту ASTM D4212 для чашок Shell та Zahn це рівняння набуває іншої форми:

$$\nu = K \cdot (t - C), \quad (3)$$

де K ($\text{мм}^2/\text{с}^2$), C (с) – константи для конкретного типу чашки, які визначаються її геометричними характеристиками та представлені в табл. 2.

Таблиця 2

Конструктивні параметри чашок Zahn та Shell

Віскозиметр Zahn					Віскозиметр Shell				
№ чаші	D, мм	V, мл	K, мм ² /с ²	C, с	№ чаші	D, мм	V, мл	K, мм ² /с ²	C, с
2	2,7	44	3,5	14	2	2,4	23	0,576	5
3	3,8		11,7	7,5	3	3,1		1,51	2
4	4,3		14,8	5	4	3,8		3,45	1
5	5,3		23	0	5	4,6		6,5	1
					6	5,8		16,2	0,5

Відповідно до стандарту ISO 2431 незалежно від діаметра сопла час витікання фарби встановлено межею 30–100 с. Побудуємо відповідно до рівнянь (2–3) для обраного часового діапазону залежності кінематичної в’язкості від часу витікання фарби під час використання чашок ISO, Zahn та Shell з різними діаметрами (рис. 2).

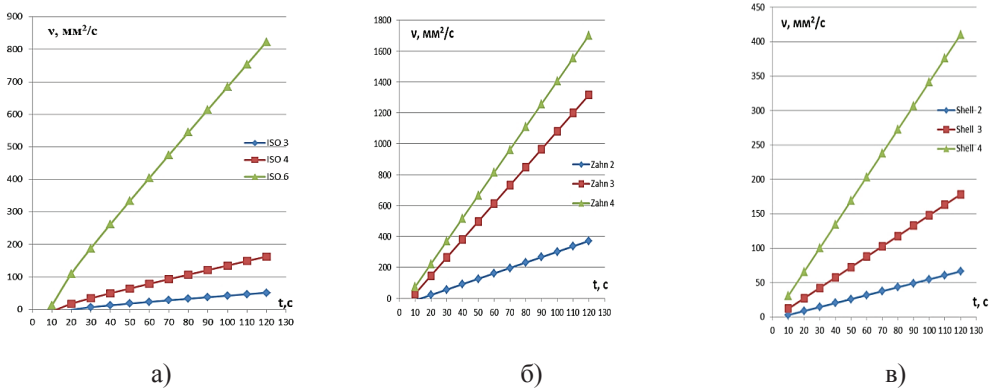


Рис. 2. Графічні залежності кінематичної в’язкості від часу витікання для віскозиметрів: а) ISO; б) Zahn; в) Shell

З аналізу графічних залежностей бачимо, що діапазон вимірювальної кінематичної в’язкості для обраних віскозиметрів досить широкий. Якщо врахувати, що в’язкість фарб для флексографії та глибокого друку лежить у межах 50–300 mm^2/c , то оптимальними для заданого діапазону буде вибір чашок ISO 3, ISO 4, Zahn 2 та Shell 2. Проте під час вимірювання в’язкості завжди необхідно уточнювати як діаметр сопла, так і тип чаші. Як бачимо з графіків, за однакової в’язкості час витікання для віскозиметрів одного типу з різними діаметрами сопла не однаковий. Наприклад, при $v=50 \text{ mm}^2/\text{c}$ для ISO 3 він становить 120 с, для ISO 4 – 40 с, а для ISO 6 – 13 с (рис. 2, а). В’язкість також буде відрізнятись і за типом чаші. Так, при вимірюванні в’язкості $v=25 \text{ mm}^2/\text{c}$ чашкою Zahn 2 час витікання становить 22 с, а чашкою Shell 2 – 45 с (рис. 2, б).

Європейські дослідження показали, що більш достовірні результати отримують за допомогою чашок ISO 4, DIN 4, а чашка Zahn 2 не дає достатньої

точності та відтворюваності результатів [12]. Межа основної відносної похибки вимірювання часу витікання рідини (умовної в'язкості) переважно для всіх чашкових віскозиметрів становить $\pm 3\%$ від середнього значення часу. Проте на точність контролю в'язкості впливає ще й суб'єктивна похибка. У кожного оператора своє розуміння вимірювання часу витікання фарби, а якщо врахувати, що на виробництвах зазвичай працюють у кілька змін, то похибка вимірювання в'язкості підвищується під час її контролю кількома операторами, про що свідчать результати досліджень National Printing Ink Research Institute (NPIRI) (табл. 3).

Таблиця 3

Точність вимірювання в'язкості за використання різних систем віскозиметрів

Віскозиметр	Стандарт	Похибка одного оператора, %	Похибка декількох операторів, %
ISO/DIN	ISO 2431	5	10
Shell	ASTM D4212	8	18
Zahn	ASTM D4212	11	33

Отже, вимірювання в'язкості фарби чашковими віскозиметрами – це традиційний підхід, який не вимагає великих витрат. Проте, окрім простоти вимірювань, метод має серйозні недоліки: неможливість безперервних вимірювань; під час вимірювання завжди необхідно вносити корекцію на конкретну чашу – використовувати спеціальні графіки для переведення; наявність суб'єктивної похибки; допустима похибка може досягати 30 %.

Для офсетного друку використовують пастоподібні друкарські фарби високої в'язкості та насиченості, оскільки за цього способу друку яскраве насичене зображення досягається при малій товщині шару фарби. Загалом фарби для плоского офсетного друку поставляються вже робочої в'язкості, тому їх достатньо перед поданням до фарбового апарата добре перемішати шпателем. Проте у разі отримання некондиційних відбитків необхідно проводити контроль в'язкості фарби для усунення причин браку.

Для вимірювання в'язкості густих пастоподібних фарб для офсетного та високого друку немеханічним способом використовують стержньовий віскозиметр (чинний стандарт ISO 12644–2017). Цей прилад дає змогу з достатньою точністю визначати в'язкість на підставі вимірювання часу падіння стержня через вертикальний циліндричний отвір, заповнений досліджуваною фарбою. Задаючи різні навантаження на стержень, можна отримати реологічні криві й оцінити за спеціальними графіками рівень в'язкості. Прикладом такого віскозиметра може бути віскозиметр Ломаржі Ларей від фірми «Lhomargy» (Франція). Діапазон вимірювання від 5,0 до 50,0 Па·с із відносною похибкою вимірювання $\pm 8\%$.

За браком необхідних приладів користуються простішим способом оцінювання в'язкісних властивостей фарб, використовуючи так званий умовний показник [7].

Для визначення умовної характеристики реологічних властивостей застосовують метод вимірювання розтікання фарби ($0,1 \text{ см}^3$), яку поміщують між двома скляними пластинами під тиском постійного вантажу (гирі) у 250 г за температури 25° С . Фарба розтікається під дією заданого вантажу між склом. Через 15 хв визначають усереднене значення діаметра плями фарби, що розтіклася. Похибка вимірювання цього методу – 1 мм . Незважаючи на відносність цих показів, їх усе ж таки використовують у виробництві фарб. Наприклад, для офсетних фарб серії COLDSET для рулонних друкарських машин фірми FLINT GROUP в технічних характеристиках представлено не тільки в'язкість, а й параметр розтікання фарби. Так, з каталожних даних представлено для чорної фарби: в'язкість – $30\text{--}40 \text{ Па}\cdot\text{с}$, липкість – $70\text{--}100$, а розтікання $2,0\text{--}4,0 \text{ см}/15 \text{ хв}$.

Найпопулярнішим пристроєм для контролю в'язкості в поліграфії є ротаційний віскозиметр, а ротаційний метод віскозиметрії вміщено до багатьох міжнародних стандартів та специфікацій. Прикладом може бути віскозиметр Brookfield (ISO 2555), Cone and Plate (ISO 2884, ASTM 4287), Krebs-Stormer (ASTM D 0562). Ці віскозиметри використовують для вимірювання динамічної в'язкості фарб та отримують дані як у Пуазах, так і в Стоксах.

Принцип роботи ротаційних віскозиметрів полягає у вимірюванні обертового моменту M , який виникає під час обертання ротора (циліндра, диска тощо), що занурений у вимірювальне середовище. Зазначений обертовий момент M у загальному випадку описують таким виразом:

$$M = K \cdot \eta \cdot \omega, \quad (4)$$

де K – сталий коефіцієнт, що залежить від конструкції віскозиметра, $\text{м}^3/\text{рад}$; ω – кутова швидкість обертання ротора, $\text{рад}/\text{с}$.

Ротаційні віскозиметри розрізняють за типом вимірювальних систем: коаксіальні циліндри, конус-пластина та пластина-пластина. Можливість легкої зміни геометрії вимірювальних систем дає змогу використовувати цей тип реометра для вимірювання середніх або дуже високих значень в'язкості рідин. У поліграфії під час вимірювання в'язкості фарб для флексографічного та глибокого друку використовують систему коаксіальних циліндрів (рис. 3, а), оскільки їхня в'язкість є низькою, а для фарб високої в'язкості офсетного та високого друку використовують систему конус-пластина (рис. 3, б).

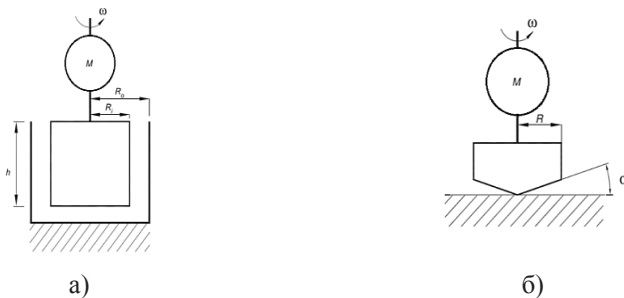


Рис. 3. Вимірювальні системи ротаційних віскозиметрів:

а) коаксіальні циліндри; б) конус-пластина

Система з коаксіальними (концентричними) циліндрами є абсолютною вимірювальною системою, яка відповідає міжнародним стандартам DIN та ISO. Внутрішній циліндр, занурений у в'язке середовище, приводиться в обертання електродвигуном. Ротор віскозиметра, що обертається з постійною швидкістю під час занурення в рідину, зустрічає опір рівномірному обертальному руху, на валу двигуна виникає гальмівний момент, який прямо пропорційний в'язкості середовища, що спричиняє відповідну зміну електричних характеристик двигуна. Абсолютне значення в'язкості:

$$\eta = \frac{M}{\omega} \cdot \frac{R_0^2 - R_1^2}{R_0^2 \cdot R_1^2} \cdot \frac{1}{4\pi h}, \quad (5)$$

де M – обертовий момент, Н·м; ω – кутова швидкість обертання ротора, рад/с; h – глибина занурення внутрішнього циліндра в рідину, м; R_1 – радіус внутрішнього циліндра, м; R_0 – радіус зовнішнього циліндра (резервуара), м.

Тоді момент обертання M рівний:

$$M = 4\pi h \omega \eta (R_0^2 \cdot R_1^2) / (R_0^2 - R_1^2) = k \eta \omega, \quad (6)$$

де $k = 4\pi h (R_0^2 \cdot R_1^2) / (R_0^2 - R_1^2)$ – коефіцієнт, що залежить від геометричних параметрів віскозиметра, м³/рад.

У коаксіальних системах для кожного режиму вимірювання моменту сили є велике різноманіття валів, які дають змогу досліджувати рідини з різною в'язкістю. Оскільки геометрія вимірювального вала та резервуара є точно визначеною, це дає змогу оператору розрахувати абсолютне значення в'язкості.

Для роботи такого пристрою, як ротаційний віскозиметр, застосовується малопотужний двигун постійного струму, коли струм якоря пропорційний моменту на валу. Для відображення принципу роботи віскозиметра побудуємо в середовищі Matlab-Simulink імітаційну модель системи визначення в'язкості фарби (рис. 4), в основі якої є модель малопотужного двигуна постійного струму незалежного збудження (DC Machine). Розрахувавши параметри SPS-моделі DC Machine, проведемо моделювання процесу обертання внутрішнього коаксіального циліндра ротаційного віскозиметра залежно від в'язкості фарби ($\eta=0,05-0,6$ Па·с). Моделювання будемо проводити за різних значень коефіцієнта, що відображає конструктивні параметри елементів віскозиметра (табл. 4). Результати моделювання представлено на рис. 5.

Таблиця 4

Конструктивні параметри елементів віскозиметра з коаксіальною системою

Глибина занурення внутрішнього циліндра h , м	Радіус внутрішнього циліндра R_1 , м	Радіус зовнішнього циліндра R_0 , м	Конструктивний коефіцієнт k , м ³ /рад
0,030	0,017	0,040	0,000133
0,048	0,019	0,040	0,000281
0,080	0,031	0,040	0,002418
0,080	0,038	0,040	0,014881

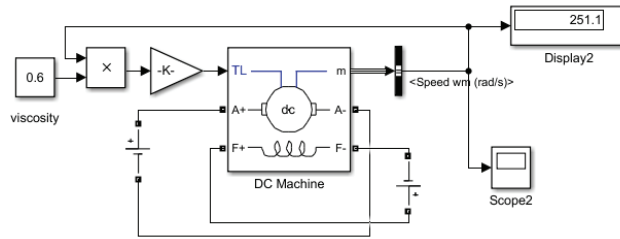
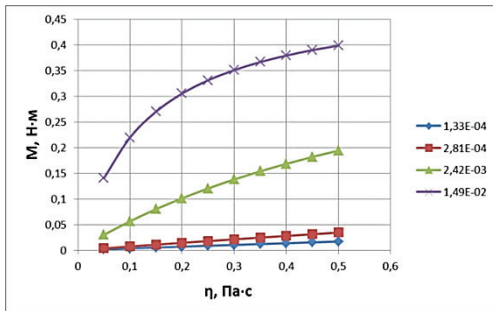
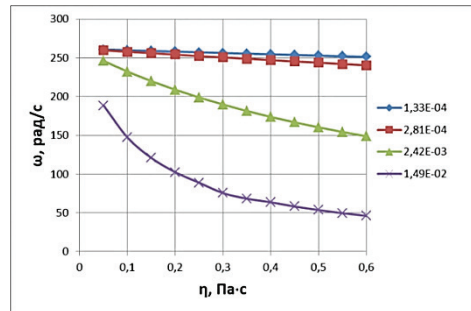


Рис. 4. Імітаційна модель ротaційного віскозиметра



а)



б)

Рис. 5. Графічні залежності для коаксіальної системи ротaційного віскозиметра за різних розмірів внутрішнього циліндра: а) $M=f(\eta)$; б) $\omega=f(\eta)$

За результатами моделювання встановлено, що під час збільшення в'язкості фарби обертовий момент двигуна збільшується, а конструктивні параметри віскозиметра суттєво впливають на швидкість обертання вала. Вочевидь опір рідини збільшується зі збільшенням розміру вала. Так, у діапазоні вимірювальної в'язкості від 0,05 до 0,5 Па·с за малих розмірів вала ($k=0,000133 \text{ м}^3/\text{рад}$) момент зростає на 0,015077 Нм, а за великих розмірів вала ($k=0,01488 \text{ м}^3/\text{рад}$) – на 0,2579 Нм. Відносний перепад кутової швидкості $\Delta\omega$ щодо швидкості ω_0 за зміною навантаження (в'язкості) теж не однозначний. Для в'язкості $\eta=0,1 \text{ Па}\cdot\text{с}$ за використання вала малих розмірів $\Delta\omega$ становить 0,0076, а при збільшенні розмірів вала – 0,44. Для в'язкості $\eta=0,5 \text{ Па}\cdot\text{с}$ відносний перепад швидкості відповідно становить 0,034 та 0,8. Це свідчить про те, що при заданій в'язкості опір рідини залежить від швидкості обертання вала та його розміру. Отже, за малої в'язкості вимірювання варто здійснювати з допомогою найбільшого вала з максимальною швидкістю, а за великої в'язкості вимірювання – з допомогою найменшого вала за найнижчої швидкості.

Для визначення в'язкості пастоподібних фарб застосовуються ротaційні віскозиметри з вимірювальною системою конус-пластина. У таких віскозиметрах фарба наноситься в отвір між фіксованою пластиною, що постійно підігрівається, і конусом із визначеним кутом α , який приводиться в рух механічно. В'язкість визначається за швидкістю обертання конуса:

$$\eta = \frac{M}{\omega} \cdot \frac{3\alpha}{2\pi R^3}, \quad (5)$$

де M – обертовий момент, що діє на конусну поверхню, Н·м; ω – кутова швидкість обертання конуса, рад/с; α – кут між пластиною та конусом, рад; R – радіус конуса, м.

Тоді момент обертання M рівний:

$$M = \omega \eta (2\pi R^3) / (3\alpha) = k \eta \omega, \quad (6)$$

де $k = (2\pi R^3) / (3\alpha)$ – коефіцієнт, що залежить від конструкції віскозиметра, м³/рад.

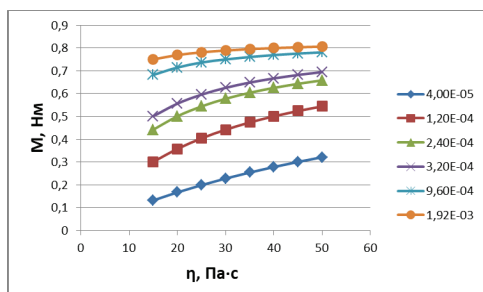
Віскозиметри з геометрією конус-пластина дають змогу визначати абсолютну в'язкість малого об'єму фарби (0,02–2,0 мл), яка залежить від кута конуса та його радіуса. Система конус-пластина виконана з дотриманням стандарту ISO 3219:1993, який точно встановлює затверджену геометрію. Для конусів рекомендується кут 1°–2°, хоча дозволяється використовувати кути < 4° залежно від типу проведених вимірювань. Радіус конуса має бути в діапазоні 10 мм – 100 мм.

На основі виразів (5–6) проведемо моделювання ротаційного віскозиметра з вимірювальною системою конус-пластина, використавши подану вище імітаційну модель (рис. 4). Моделювання будемо проводити за різних геометричних параметрів конуса, які представлені конструктивними коефіцієнтами (табл. 5). Результати моделювання представлено на рис. 6.

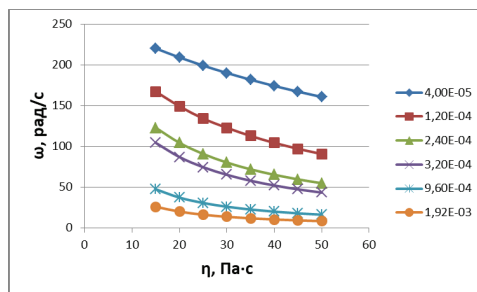
Таблиця 5

Конструктивні параметри конуса віскозиметра конус-пластина

Радіус конуса R , м	Кут конуса α , град	Кут конуса α , рад	Конструктивний коефіцієнт k , м ³ / рад
0,01	3	0,052333	0,00004
0,01	1	0,017444	0,00012
0,01	0,5	0,008722	0,00024
0,02	3	0,052333	0,00032
0,02	1	0,017444	0,00096
0,02	0,5	0,008722	0,00192



а)



б)

Рис. 6. Графічні залежності для системи конус-пластина ротаційного віскозиметра за різних розмірів конуса: а) $M=f(\eta)$; б) $\omega=f(\eta)$

З аналізу результатів моделювання можна сказати, що найбільша динаміка змін обертового моменту та швидкості обертання конуса спостерігається за його радіуса $R=0,01$ м та $\alpha=1^\circ$ ($k=0,00012$ м³/рад). Для встановлення чинників впливу та їхнього взаємозв'язку на визначення в'язкості фарби проведемо факторний аналіз результатів моделювання. Змінними факторами є радіус конуса R та його кут α . Як результативну ознаку обрано момент протидії фарби. Вибір рівнів факторів та їхнє кодування представлено в таблиці 6.

Таблиця 6

Вибір рівнів та кодування факторів

Рівень факторів варіювання	Кодове позначення	Радіус конуса R , м	Кут конуса α , град
		X_1	X_2
Нижній рівень	-1	0,01	0,5
Верхній рівень	+1	0,02	3
Основний рівень	0	0,01	1
Інтервал варіювання	Δx_i	0,005	0,5

Для оцінювання впливу вказаних факторів і математичного опису використано модель першого порядку: $Y=b_0+b_1X_1+b_2X_2+b_{12}X_1X_2$. Для розрахунку коефіцієнтів моделі була побудована матриця планування з урахуванням взаємозв'язку між факторами для низьких та високих значень в'язкості (табл. 7).

Таблиця 7

Матриця планування й результати дослідження

№ дослідження	Фактор				Відгук для $\eta=15$ Па·с	Відгук для $\eta=50$ Па·с
	X_0	X_1	X_2	X_1X_2	Y	Y
1	+1	-1	-1	+1	0,4419	0,6582
2	+1	+1	-1	-1	0,7499	0,8061
3	+1	-1	+1	-1	0,1320	0,3213
4	+1	+1	+1	+1	0,5007	0,6946

У результаті реалізації двофакторної моделі і визначення статистичної значимості коефіцієнтів регресії одержано моделі:

для $\eta=15$ Па·с

$$Y=0,46+0,68X_1-0,56X_2+0,061X_1X_2;$$

для $\eta=50$ Па·с

$$Y=0,62+0,52X_1-0,45X_2+0,23X_1X_2.$$

На основі отриманих результатів і аналізу моделі об'єкта можна зробити висновок, що значимі є не тільки лінійні ефекти, але й їхня парна взаємодія. Лінійно на момент протидії M впливають як радіус конуса R (X_1), так і кут α (X_2). Хоча характер впливу обох факторів не однаковий: збільшення їхніх значень призводить, з одного боку, до збільшення моменту ($b_1>0$), а з другого боку – до його зменшення ($b_2<0$). Вплив цих факторів проявляється й у парній взаємодії,

особливо за великої в'язкості. Оскільки $b_{1,2} > 0$, то до зростання відгуку буде вести одночасна зміна X_1 та X_2 в одну й ту саму сторону, тобто зменшення моменту буде відбуватися при зменшенні X_1 та збільшенні X_2 або навпаки. Отже, за вимірювання в'язкості необхідно вибирати кут конуса α найменшим із можливих. Щодо вибору радіуса конуса, то тут стверджується обернено пропорційне відношення між в'язкістю та розміром конуса. Позаяк $b_1 (\eta=15 \text{ Па}\cdot\text{с}) > b_1 (\eta=50 \text{ Па}\cdot\text{с})$, то за вимірювання низьких значень в'язкості варто вибирати конуси з більшим радіусом, а для рідин із більшою в'язкістю – конус із меншим радіусом. Отже, така геометрія віскозиметра забезпечує зручний доступ до зразка та його очищення, тут потрібна невелика кількість матеріалу залежно від діаметра конуса та кута. Визначення в'язкості проводиться з точністю $\pm 1 \%$ та відтворюваністю $\pm 0,2 \%$, але водночас є можливість виникнення великих похибок у випадках, коли відсутній щільний контакт між конусом і площиною.

Висновки. Контроль в'язкості друкарських фарб для флексографічного та глибокого друку здійснюється при використанні чашкових та ротаційних віскозиметрів. Чашкові віскозиметри визначають час витікання фарби, на основі якого за емпіричними рівняннями можна встановити значення кінетичної в'язкості. Проте ці рівняння є не однаковими для різних типів чашок, тому під час вимірювання в'язкості фарби необхідно чітко дотримуватися рекомендацій фірм-виробників щодо вибору типу чашки та діаметра її сопла. Ротаційний віскозиметр визначає динамічну в'язкість. Для зазначених фарб використовують ротаційний віскозиметр із коаксіальною системою вимірювання, де в резервуарі з фарбою обертається циліндричний вал. За результатами моделювання встановлено, що під час вимірювання фарби з нижчою в'язкістю необхідно вибирати вал із більшими геометричними розмірами, а для вищої в'язкості – навпаки. Під час визначення в'язкості офсетних фарб використовують ротаційний віскозиметр із вимірювальною системою конус-пластина. Результати моделювання та двофакторного аналізу показали, що за використання цієї системи необхідно підбирати конус із найменшим кутом, що дає можливість проводити вимірювання з досить великою точністю $\pm 1 \%$. Радіус конуса вибирається з обернено пропорційного відношення між в'язкістю та розміром. Для офсетних фарб із вищою в'язкістю підбирають конус із меншим радіусом, а для фарб із нижчою в'язкістю – конус із більшим радіусом.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Дорош А. К., Гуцол О. О. Реологічні властивості фарб. Дослідження залежності в'язкості друкарських фарб від робочої температури фарбової секції друкарських машин. Технологія і техніка друкарства. 2007. № 1–2. С. 122–130.
2. Дорош А. К., Шевчук А. В., Гуцол О. А. Моделирование реологической кривой и механизма течения краски в зазоре измерительной ячейки ротационного вискозиметра. Фізика аеродисперсних систем. 2016. № 53. С. 77–89.
3. Крамаренко В. Ю., Сергеева А. В., Нескороженная Г. Д. Корреляционный анализ данных определения условной вязкости при исследовании воронок с различной геометрией сопла. Питання хімії та хімічної технології. 2019. № 1. С. 86–91.

4. Кукура Ю. А., Репета В. Б., Кукура В. В. Дослідження нових серій офсетних газетних фарб. Наукові записки [Української академії друкарства]. 2006. № 9. С. 12–14.
5. Пістун Є. П., Крих А. Б., Близняк Т. В. Гідродинамічні вимірювальні перетворювачі реологічних параметрів поліграфічних матеріалів. Методи та прилади контролю якості. 2002. № 8. С. 62–66.
6. Репета В. Б., Кукура Ю. А., Місюра М. О. Термографічний аналіз фарбового апарату вузькорулотної флексографічної машини. Поліграфія і видавнича справа. 2018. № 1 (75). С. 68–74.
7. Cain Eric. Test methods for offset inks and substrates. MHM Holding GmbH. 2016. URL: <https://silo.tips/download/test-methods-for-offset-inks-and-substrates>.
8. Holdt-Lehmann B., Lehmann J. K., Schuff-Werner P. Comparative evaluation of two newly developed devices for capillary viscometry. *Clinical Hemorheology and Microcirculation*. 2005. № 33 (4). Pp. 379–387.
9. Izdebska J. Printing on Polymers. Fundamentals and Applications. Flexographic Printing. 2016. Chapter 11. Pp. 179–197. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-37468-2.00011-7>.
10. Jakucewicz S. Farby drukowe. Michael Huber Polska, Wrocław, 2001. URL: <http://www.mhp.com.pl/gfx/mhp/userfiles/files/pdf/ksiazka-fd.pdf>.
11. Kipphan H. Handbook of Print Media. Springer, New York, 2001. DOI: 10.1007/978-3-540-29900-4_1.
12. Leach R. H., Pierce R. J., Hickman E. P., Mackenzie M. J., Smith H. G. The Printing Ink Manual. Springer Netherlands. 2014.
13. Eldred, N.R. What the Printer Should Know About Ink. GATFPRESS. 2001.
14. Tryznowska Z. Ż. Printing on Polymers. Rheology of Printing Inks. 2016. Chapter 6. Pp. 871–99. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-37468-2.00006-3>.
15. Viswanath K. Y., Ghosh D. S., Prasad T., Dutt D.H.L., Rani N.V.K. Viscosity of Liquids. Netherlands, Dordrecht: Springer, 2007.

REFERENCES

1. Dorosh, A. K., & Hutsol, O. O. (2007). Reolohichni vlastyvoli farb. Doslidzhennia zalezhnosti v'iazkosti drukarskykh farb vid robochoi temperatury farbovoi sektsii drukarskykh mashyn: Tekhnolohiia i tekhnika drukarstva, 1–2, 122–130 (in Ukrainian).
2. Dorosh, A. K., Shevchuk, A. V., & Hutsol, O. A. (2016). Modelyrovanye reolohycheskoi kryvoi y mekhanyzma techeniya krasky v zazore yzmyrytelnoi yacheiky rotatsyonnoho vyskozymetra: Fyzyka aerodyspersnykh system, 53, 77–89 (in Russian).
3. Kramarenko, V. Ju., Sergeeva, A. V., & Neskorozhennaja, G. D. (2019). Korreljacionnyj analiz dannyh opredelenija uslovnoj vjazkosti pri issledovanii voronok s razlichnoj geometrijej sopla: Pytannia khimii ta khimichnoi tekhnolohii, 1, 86–91 (in Russian).
4. Kukura, Yu. A., Repeta, V. B., & Kukura, V. V. (2006). Doslidzhennia novykh serii ofsetnykh hazetnykh farb: Naukovi zapysky [Ukrainskoi akademii drukarstva], 9, 12–14 (in Ukrainian).
5. Pistun, Ye. P., Krykh, A. B., & Blyzniak, T. V. (2002). Hidrodynamichni vymiriuvalni peretvoriuvachi reolohichnykh parametriv polihrafichnykh materialiv: Metody ta pryklady kontroliu yakosti, 8, 62–66 (in Ukrainian).

6. Repeta, V. B., Kukura, Yu. A., & Misiura, M. O. (2018). Termohrafichnyi analiz farbovoho aparatu vuzkorulonnoi fleksohrafichnoi mashyny: Polihrafiia i vydavnycha sprava, 1 (75), 68–74 (in Ukrainian).
7. Cain, Eric. (2016). Test methods for offset inks and substrates. MHM Holding GmbH. Retrieved from <https://silo.tips/download/test-methods-for-offset-inks-and-substrates> (in English).
8. Holdt-Lehmann, B., Lehmann, J. K., & Schuff-Werner, P. (2005). Comparative evaluation of two newly developed devices for capillary viscometry: Clinical Hemorheology and Microcirculation, 33 (4), 379–387 (in English).
9. Izdebska, J. (2016). Printing on Polymers. Fundamentals and Applications: Flexographic Printing, Chapter 11, 179–197. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-37468-2.00011-7> (in English).
10. Jakucewicz, S. (2001). Farby drukowe. Michael Huber Polska, Wrocław. Retrieved from <http://www.mhp.com.pl/gfx/mhp/userfiles/files/pdf/ksiazka-fd.pdf> (in Polish).
11. Kipphan, H. (2001). Handbook of Print Media. Springer, New York. DOI: 10.1007/978-3-540-29900-4_1 (in English).
12. Leach, R. H., Pierce, R. J., Hickman, E. P., Mackenzie, M. J., & Smith, H. G. (2014). The Printing Ink Manual. Springer Netherlands (in English).
13. Eldred, N.R. (2001). What the Printer Should Know About Ink: GATFPress (in English).
14. Tryznowska, Z. Ž. (2016). Printing on Polymers: Rheology of Printing Inks, Chapter 6, 871–99. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-37468-2.00006-3> (in English).
15. Viswanath, K. Y., Ghosh, D. S., Prasad, T., Dutt, D.H.L., & Rani, N.V.K. (2007). Viscosity of Liquids. Netherlands, Dordrecht: Springer (in English).

doi: 10.32403/0554-4866-2022-1-83-21-35

MODELING AND RESEARCHING THE MEASURING PROCESS OF THE PRINTING INKS VISCOSITY

U. P. Panovyk, O. M. Sorochynskyi

*Ukrainian Academy of Printing,
19, Pid Holoskom St., Lviv, 79020, Ukraine
ulianapanovuk@gmail.com*

The article considers the rheological characteristics of printing inks and substantiates the need to measure the ink viscosity in a wide range for the high-quality printed products manufactured. It carries out the analysis of viscosimetry methods for researching of the ink rheological properties used in the printing industry. The structures and the operation principle of the most used viscometers for determining the printing inks viscosity of different printing methods are considered. The structural features of cup viscometers used following international standards are analyzed. The dependence of kinematic viscosity on the time of fluid leakage is studied for standard viscometers

models that are built based on empirical equations for calculating the conditional viscosity. The reasons for significant differences in measuring time values for cups with different geometries and nozzle diameters at the same ink viscosity are indicated.

The rotational method of measuring viscosity is considered. It is determined that rotary viscometers with coaxial measuring systems are used for liquid flexographic and gravure printing inks, and rotary viscometers with cone-plate measuring systems are provided for inks with high viscosity of offset printing method. Based on the presented mathematical formulas for determining the torque of a moving element, a simulation model of a rotary viscometer in Matlab-Simulink is constructed, which reproduces the relationship between the geometric parameters of a moving element and viscosity. According to the modeling results and two-factor analysis, the conditions of using the shafts and cones by their geometric dimensions are determined.

Keywords: *printing inks, viscosity, cup viscometer, rotary viscometer, coaxial cylinders, cone-plate, simulation model.*

Стаття надійшла до редакції 28.04.2022.

Received 28.04.2022.