

УДК 681.5.08:655.3

АНАЛІЗ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ В'ЯЗКОСТІ ФАРБ ДЛЯ ФЛЕКСОГРАФІЧНОГО ДРУКУ

У. П. Пановик, Р. І. Петрів

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

Розглянуто фізичний зміст поняття в'язкості та фізичні величини, що використовуються для опису в'язкісних властивостей рідини. Проведено класифікацію методів віскозиметрії для поліграфічної галузі. Здійснено аналітичний огляд сучасних засобів контролю та вимірювання в'язкості фарби, які використовуються під час флексографічного друку. Встановлено методи, які отримали найбільше застосування під час визначення в'язкості фарби. Розглянуто будову та принцип дії чашкових та ротаційних віскозиметрів. Досліджено ефективність використання вібраційних та електромагнітних віскозиметрів за оптимізації процесу визначення в'язкості флексографічних фарб. Окреслено перспективність використання нового методу визначення в'язкості за динамічним тиском рідини. У процесі проведеного аналізу віскозиметрів здійснено оцінювання їхніх метрологічних характеристик: діапазон та точність вимірювання. З'ясовано переваги та недоліки використання розглянутих віскозиметрів для забезпечення стабільності якісного флексографічного друку.

Ключові слова: *флексографічний друк, в'язкість фарби, гравіметричні методи, ротаційний віскозиметр, вібраційний віскозиметр, електромагнітний віскозиметр.*

Постановка проблеми. На сьогодні флексографічний друк є найбільш широко використовуваним способом друку. Технологія флексодруку відзначається простотою, низькими витратами і водночас високою продуктивністю. Цей спосіб дає змогу забезпечити високу якість відбитків на найрізноманітніших матеріалах: папір, фольга, картон, поліетилен, поліпропілен тощо.

У флексографії якість друкованої продукції значно залежить від фарби. Для оцінювання та контролю властивостей спиртових та водних флексографічних фарб є багато параметрів, але найважливішим є в'язкість. Визначення в'язкості є досить важливим етапом під час друку насамперед тому, що навіть незначне відхилення від норми в процесі друку тиражу може спричинити помітну зміну кольору на відбитку [4]. Крім того, за збільшення в'язкості витрати фарби значно збільшуються, що не вигідно з економічних міркувань і часто призводить до збільшення часу висихання та закріплення фарби на відбитку. Чим нижча в'язкість, тим більше розбризування фарби в зоні контакту дукторного циліндра та швидше забруднюється друкарська форма. Зміна в'язкості зумовлена механізмом перенесення, циркуляції

фарби та випаровуванням спирту, що в кінцевому результаті призводить до підвищення в'язкості. Збільшення в'язкості знижує глянець на відбитку й може спричинити засихання фарби прямо на друкарській формі, тому доцільно було б розглянути всі методи віскозиметрії та засоби вимірювання, які використовуються під час визначення в'язкості фарб.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. З огляду літературних джерел встановлено, що за останнє десятиріччя створено велику кількість технічних засобів для вимірювання в'язкості рідин – віскозиметрів, які відрізняються способом функціонування, залежністю інформативного параметра від в'язкості, технічними рішеннями, способами відображення інформації. На сайтах фірм-дистриб'юторів можна отримати докладну інформацію щодо метрологічних характеристик віскозиметрів, які використовуються в різних галузях промисловості фірм-виробників: Brookfield (США), A&D (Японія), TQC (Нідерланди), Fungilab (Іспанія), ІКА (Німеччина), Thermo Scientific (Німеччина), ARNDT Frikmag (Німеччина), PCE Instruments (Німеччина), Atago, Novotest (Україна), Омега (Україна), ThermoLab (Україна) тощо [3, 6]. Сфера застосування цих приладів широка. Так, у медицині для вимірювання в'язкості крові, а також у фармацевтиці під час виготовлення лікарських препаратів широко використовують віскозиметри капілярні та з падаючою кулькою. У нафтовій промисловості використовуються як ротаційні віскозиметри системи Brookfield, так і чашкові капілярні віскозиметри, що дають змогу з достатньою точністю визначити в'язкі властивості нафти. У хімічній промисловості та металургії поширені універсальні високотемпературні віскозиметри [7, 12, 13].

Проте інформації щодо застосування віскозиметрів у поліграфічній галузі вкрай мало. Загалом подаються основні теоретичні положення щодо методів визначення в'язкості та загальних принципів побудови й роботи віскозиметрів [5]. З інформації, яка представлена в мережі інтернет, можна почерпнути багато матеріалу, що стосується флексографічних фарб та їхніх властивостей, та одержати інструкції з вимірювання в'язкості фарби традиційним методом капілярного витікання [11, 14]. Інші методи описані доволі мало.

Мета статті – провести аналітичний огляд методів віскозиметрії та метрологічне оцінювання віскозиметрів, які використовують під час визначення в'язкості розчинних флексографічних фарб.

Виклад основного матеріалу дослідження. В'язкість фарби характеризує її придатність до використання та її характеристики – насиченість кольору, рівномірність покриття, яскравість [15]. Під час визначення в'язкості розрізняють:

- динамічну в'язкість, η – описує протидію зсуву сусідніх шарів, які рухаються в паралельних напрямках; одиниця вимірювання в системі СІ [Па·с], а за системою СГС – [П] пуаз або [сП] сантипуаз;
- кінематичну в'язкість, $\nu = \eta/\rho$ – відображає властивість рідини протистояти переміщенню однієї частини відносно іншої, але враховує її масу; одиниця вимірювання в системі СІ [м²/с], а в СГС – [Ст] (Стокс) або [сСт] сантистокс.

Для контролю та визначення параметрів в'язкості використовуються спеціальні аналізатори – віскозиметри, які розроблені за конкретним методом віскозиметрії.

Оскільки в'язкість флексографічних фарб лежить у межах 0,05–0,5 Па·с, то для вимірювання використовують віскозиметри низької в'язкості. Розглянемо найбільш поширені методи віскозиметрії у флексографії, які загалом використовують такі різновиди віскозиметрів: гравіметричні та механічні.

Гравіметричні методи вимірювання в'язкості поділяються на дві групи:

- протікання середовища через канали – метод капілярного витікання;
- рух твердого тіла в середовищі – метод падаючої кульки.

Метод капілярного витікання – це найпоширеніший метод вимірювання в'язкості у флексографії. Прямий капілярний метод вимірювання кінематичної в'язкості базується на рівнянні Пуазейля та встановлює умовну в'язкість – непряму характеристику рідини, що визначається часом витікання конкретного об'єму рідини з віскозиметра. Для вимірювання умовної в'язкості фарби використовують чашкові віскозиметри. Такі віскозиметри виконані у формі воронки або чашки, які вимірюють час, упродовж якого досліджувана речовина, що налита у чашку заданого об'єму, під дією сили гравітації витікає через каліброване сопло віскозиметра. Чим вона гущіша, тим повільніша швидкість витікання. Кінематична в'язкість визначається за емпіричними формулами або за графіками та таблицями залежно від часу закінчення витікання:

$$v = K_c \cdot t, \quad (1)$$

де K_c – капілярна константа, яка визначається під час калібрування, тобто при вимірюванні для еталонної рідини з відомою в'язкістю; t – час витікання, с.

Швидкість витікання рідкої фарби залежить від форми чашки – її типу і діаметра сопла/отвору. Розмір отвору буває від 2 до 8 міліметрів. Усього у світі налічується приблизно 50 різновидів чашок, які мають різну площу, величину отвору, геометрію й об'єм [11]. Найпоширеніші віскозиметри, що використовуються в поліграфії – Shell, Zahn (рис. 1).

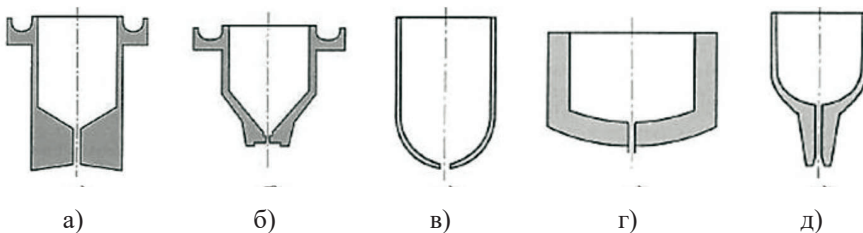


Рис. 1. Різновиди чашкових віскозиметрів:

а) ISO 2431; б) DIN 53211; в) Zahn; г) Engler; д) Shell

Для вітчизняних виробників фарб характерно визначення параметра в'язкості в секундах, натомість імпорتنі матеріали припускають застосування іншого позначення – DIN (Дин/с). Виробник фарби зазвичай вказує на упаковці про те, який показник вважається оптимальним у тих чи інших умовах. Замірний на різних віскозиметрах час закінчення не ідентичний один з одним, а в наявних перерахункових таблицях даються лише приблизні значення. Тому для визначення

в'язкості виробником обов'язково має вказуватися тип чашки та температура вимірювання.

Основною перевагою цього методу є простота, тому він вміщений у багатьох еталонних та стандартизованих методиках. Наприклад, відповідно до чинних в Україні стандартів ДСТУ ISO 2431:2019 [1] і ASTM D 5125 визначення умовної в'язкості проводять віскозиметром ISO 2431 (рис. 2). Віскозиметр являє собою резервуар циліндричної форми, що переходить вниз у порожнистий конус зі знімним соплом, виконаним з нержавіючої сталі. Прилад встановлюється на штативі з регулювальними ніжками.

	Віскозиметр ISO 2431			
	№3	№4	№5	№6
Діаметр сопла, мм	3	4	5	6
Час витікання, с	30-100			
В'язкість, сСт	7-42	35-135	91-325	188-684
Похибка	± 3% (середнього арифметичного значення часу закінчення)			



а)

б)

Рис. 2. Віскозиметр ISO 2431: а) зовнішній вигляд; б) технічні характеристики

Отже, це традиційний підхід, який не вимагає великих витрат. Окрім простоти вимірювань, метод має серйозні недоліки: неможливість безперервних вимірювань; під час вимірювання завжди необхідно вносити корективи на конкретну чашу – використовувати спеціальні графіки для переведення в секунди витікання фарби з конкретної чаші; наявність суб'єктивної похибки, адже кожен друкар має власне розуміння початку й кінця відліку вимірювань; допустима похибка може досягати 5–10 %.

Метод падаючої кульки – це прямий метод вимірювання умовної в'язкості на основі закону вільного падіння твердого тіла в гравітаційному полі. На основі цього методу тверде тіло, що має форму колони або сфери, вільно падає в рідині, причому розміри та щільність цього тіла відомі. Показник в'язкості визначається на основі вимірювання часу, необхідного для падіння кульки під власною вагою через трубку:

$$\eta = K \cdot (\rho_k - \rho_f) \cdot t \quad (2)$$

де K – константа пропорційності; ρ_k – густина кульки, $г/см^3$; ρ_f – густина фарби, $г/см^3$; t – час падіння кульки, $с$.

Віскозиметр із падаючою кулькою являє собою скляну трубку, що наповнюється фарбою. Дія віскозиметра ґрунтується на Законі Стокса. Прилад зручний для дослідження прозорих низьков'язких речовин (рис. 3, а). Виробники: Norcross, Opti-Color Meß- und Regelanlagen GmbH, New Celio Engineering, Flexologic [6].

Незважаючи на простоту конструкції, високу точність (рис. 3, б) та доступність у ціні, такі віскозиметри мають складність дослідження непрозорих середовищ та неможливість постійного моніторингу. Вони також не можуть виводити безперервні вихідні сигнали, що відповідають коефіцієнту в'язкості, або керувати даними.

Тому цей метод використовують у сенсорах циклічної дії, що встановлюються в системах із відведенням фарби (байпасах), яка подається під невеликим тиском у модуль вимірювання (рис. 4, а).



а)

Діапазон в'язкості, мПа·с (сПс)	0,5 - 70 000
Точність в залежності від вибраної кульки	0,5 - 2,0%
Діаметр кульки, мм	11,0 - 15,81
Час падіння кульки при вимірюванні, с	30 - 300
Довжина вимірювальної зони трубки, мм	100
Об'єм проби в трубці, мл	40

б)

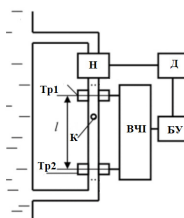
Рис. 3. Віскозиметр з падаючою кулькою компанії Brookfield:

а) загальний вигляд;

б) технічні характеристики



а)



б)

Рис. 4. Сенсор на основі падаючого тіла фірми Flexologic: а) загальний вигляд;

б) схема принципу дії

Вимірювання в'язкості зводиться до відліку часу, упродовж якого кулька проходить фіксовану ділянку шляху в трубці з фарбою через котушки диференціальних трансформаторів, що формують електричні імпульси. За допомогою вимірювача часових інтервалів вимірюється інтервал часу між визначеними імпульсами, значення якого визначає умовну в'язкість. Клас точності такого віскозиметра – 2 [5]. Автоматична система вимірювання в'язкості на основі падаючого тіла може визначати в'язкість із точністю до 0,2 с. Продуктивність – 2–3 вимірювання за хвилину. Проте є кілька особливостей застосування таких систем: сенсори необхідно регулярно та правильно очищувати; необхідний певний об'єм фарби та відповідний тиск потоку фарби для заповнення вимірювальної системи.

Чашковий віскозиметр або віскозиметр із падаючою кулькою не придатні для безперервних вимірювань в'язкості. Для забезпечення автоматичного управління безперервної роботи варто використовувати механічні віскозиметри, до яких належать ротаційні, вібраційні, електромагнітні та інші. Розглянемо віскозиметри, які використовують у флексографії.

Ротаційний віскозиметр – найпопулярніший пристрій для контролю в'язкості у флексографії. Метод вміщений у багатьох міжнародних стандартах та специфікаціях. В Україні за цим методом діє стандарт ДСТУ ISO 2884–2:2015 [2].

Принцип дії цих механічних віскозиметрів побудований на вимірюванні обертового моменту M , який виникає на осі ротора (циліндра, диска тощо), зануреного у вимірювальне середовище, під час взаємного їх переміщення. Зазначений обертовий момент M у загальному випадку описують таким виразом:

$$M = K \cdot \eta \cdot \omega, \quad (3)$$

де K – сталий коефіцієнт, що залежить від конструкції ротора віскозиметра, m^3/pad ; ω – кутова швидкість обертання ротора, rad/c .

Обертовий момент можна виміряти різними способами: визначенням сили струму, яку споживає електродвигун приводу обертового тіла, або визначенням кута повороту пружної підвіски або пружини, що врівноважує [5].

У флексографії найбільш розповсюдженими є електроротаційні віскозиметри (рис. 5, а), в яких внутрішній циліндр, занурений у резервуар із фарбою, приводиться в рух електродвигуном. Обертаючись із постійною швидкістю, ротор віскозиметра під час занурення у фарбу зустрічає опір рівномірному обертовому руху. Отже, на валу двигуна виникає гальмівний момент, який прямо пропорційний в'язкості фарби та викликає зміну електричних характеристик двигуна.

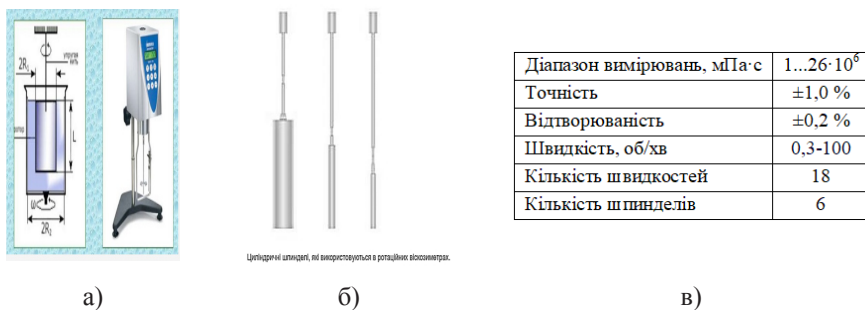


Рис. 5. Ротаційний віскозиметр фірми Brookfield: а) загальний вигляд; б) циліндричні шпindelі віскозиметра; в) технічні характеристики

Для кожного режиму вимірювання моменту сили є різні шпindelі, які дають змогу вимірювати рідини з різною в'язкістю (рис. 5, б). Зазвичай використовуються змінні шпindelі у вигляді дисків та циліндрів. За заданої в'язкості опір рідини залежить від швидкості обертання шпинделя, його форми та розміру. Опір рідини збільшується зі збільшенням швидкості та розміру шпинделя. Отже, у разі малої в'язкості вимірювання здійснюється за допомогою найбільшого шпинделя з максимальною швидкістю, у разі великої в'язкості вимірювання – за допомогою найменшого шпинделя за найнижчої швидкості.

Найвідоміші представники фірм-виробників: Brookfield, Rheotest, Flexologic. Характерною особливістю ротаційних віскозиметрів є широкий діапазон безперервного вимірювання. Класи точності ротаційних віскозиметрів – 1–2,5. Проте

вони вимагають використання кількох видів роторів, щоби забезпечити вимірювання в широкому діапазоні, а заміна роторів спричиняє затрати часу. Окрім того, точність вимірювання може трохи знижуватись, якщо фарба забруднена або має великі частинки домішок. Отже, під час вимірювання в низькому діапазоні в'язкості похибки вимірювань неминучі. Для досягнення високої точності вимірювання необхідно періодично проводити калібрування віскозиметрів, за якого вимірюються одна або кілька спеціальних рідин з уже відомою в'язкістю, після чого отримане значення використовується для калібрування. З усіх встановлених систем контролю в'язкості у флексографії ротаційні віскозиметри становлять до 80 %. Їх можна використовувати як безпосередньо в резервуарах із фарбою, так і в системах із відведенням фарби для вимірювання. За відведення фарби віскозиметр поміщають в окрему ємність, яка заповнюється фарбою. Найчастіше для зручності таку систему розміщують зверху основного фарбового резервуару.

Для контролю в'язкості у флексографії також використовують вібраційний віскозиметр. Цей віскозиметр у найпростішому випадку являє собою резервуар із в'язкою рідиною й деяке тіло (пластину, кулю, циліндр) – зонд віскозиметра, який виробляє вимушені коливання у в'язкому середовищі. Сьогодні для вимірювання динамічної в'язкості широко застосовують електронні вібраційні віскозиметри, в яких зонд здійснює вимушені коливання під впливом імпульсів електромагнітного вібратора з вбудованим датчиком амплітуди, наприклад, віскозиметр A&D серії SV (рис 6, а). Вібровіскозиметр SV10 вимірює величину збуджувального електричного струму для того, щоби забезпечити вібрацію сенсорних пластин із постійною частотою та амплітудою, а потім визначає значення в'язкості за величиною позитивної кореляції між збуджувальним електричним струмом та в'язкістю. Прилад забезпечує вібрацію з частотою 30 Гц, що еквівалентно власній частоті (резонансу) системи виявлення в'язкості [3]. У результаті прилад SV10 працює в динамічному діапазоні від 0,3 мПа·с до 10,000 мПа·с і може виконувати безперервні вимірювання в цьому діапазоні з високою повторюваністю (точністю) та стабільністю. Високоякісні віскозиметри, які побудовані на такому принципі, також випускають компанії Nametre, Brookfield.

Однак бувають обмеження, закладені в конструкції цих пристроїв: чутливість до зовнішньої вібрації, що ставить під сумнів достовірність вимірювань, отриманих на реальному виробництві, тому зазвичай їх застосовують у лабораторіях. Проте є й модифікації, орієнтовані на виробничі умови, наприклад, вбудований вібраційний контролер в'язкості Brookfield AST-100 (рис. 6, б). Контролер AST забезпечує стабільні повторювані показники в'язкості та температури. Він має конструкцію без рухомих частин, яка містить датчик, що забезпечує постійні покази [9]. Потік фарби проходить через нижній патрубок у вимірювальну камеру сенсора і виходить через верхнє горизонтальне відведення, а зонд створює крутильні коливання. За кореляцією в'язкого затухання коливань у рідині вимірюється в'язкість. В'язкість та температура відображаються на контролері.

Для контролю в'язкості у флексографії використовують також електромагнітний сенсор, який вмонтовують зразу після фарбового насоса. Такий сенсор забезпечує високу точність та своєчасність вимірювання. Прикладом може бути

електромагнітний віскозиметр (EMV-віскозиметр) фірми Cambridge Applied Systems (рис. 7, а). Робота електромагнітного віскозиметра ґрунтується на принципі електромагнетизму. Датчик (Cambridge Viscosity 440) складається з вимірювальної камери та поршня з магнітним впливом (рис. 7, б). Під час вимірювання рідина спочатку вводиться у вимірювальну терморегульовану камеру, де розташований поршень. Два соленоїди змушують поршень здійснювати зворотно-поступальні рухи під дією магнітного поля з постійним зусиллям. В'язкість визначається через вимірювання часу переміщення поршня. Параметри конструкції для кільцевого зазору між поршнем і вимірювальною камерою, напруженість електромагнітного поля та відстань переміщення поршня використовуються для розрахунку в'язкості відповідно до закону в'язкості Ньютона. Спеціально розроблена електрична схема аналізує час зворотно-поступального переміщення поршня для розрахунку величини абсолютної в'язкості [10].



Рис. 6. Вібраційний віскозиметр: а) SV-100; б) Brookfield AST-100

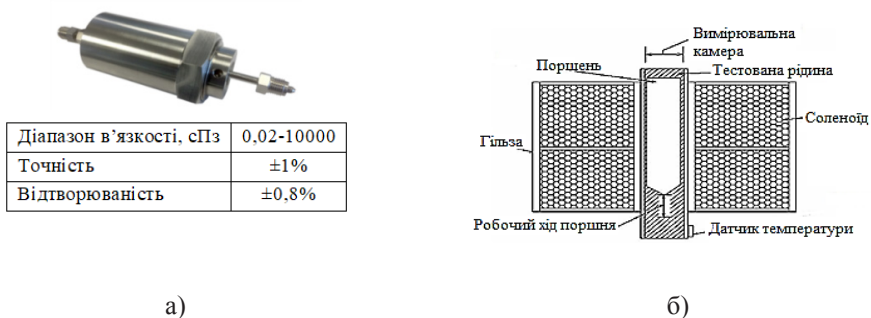


Рис. 7. Електромагнітний віскозиметр Cambridge Viscosity 440: а) загальний вигляд; б) схема принципу дії

Перевагою електромагнітного віскозиметра є абсолютна незалежність показів від вібрації та його орієнтації в просторі. Швидкодія – 6–12 вимірювань за хвилину. Окрім цього, вимірювальний модуль оснащений ще й датчиком температури.

Компанією Anton Paar запропоновано новий підхід до вимірювання в'язкості – *вимірювання за динамічним тиском рідини*. Поточковий віскозиметр L-Vis 510 (рис. 8, а) встановлюється безпосередньо в трубопровід або ємність змішування (байпас не потрібний). Фарба тече через сенсор, в'язкість і температура вимірюються безперервно та відображаються на екрані. Віскозиметр L-Vis 510 використовує новий принцип вимірювання, що ґрунтується на вимірюванні динамічного тиску рідини, який пропорційний її в'язкості. Поточковий віскозиметр складається з частково відкритої трубки з циліндричним валом (рис. 8, б), що обертається всередині. Фарба прямує до системи та тече через зазор між трубкою та валом. Цей зазор стає дедалі меншим і меншим у міру наближення до кінця трубки, що призводить до вигину стінки трубки під тиском рідини, яка протікає через неї. Електричний датчик вимірює величину відхилення та використовує його для обчислення в'язкості. Перепади тиску або витрати не впливають на роботу L-Vis 510 [8]. Недоліком цієї моделі є наявність рухомих елементів. Точність вимірювання віскозиметром може знижуватися через наявність твердих частинок домішок.

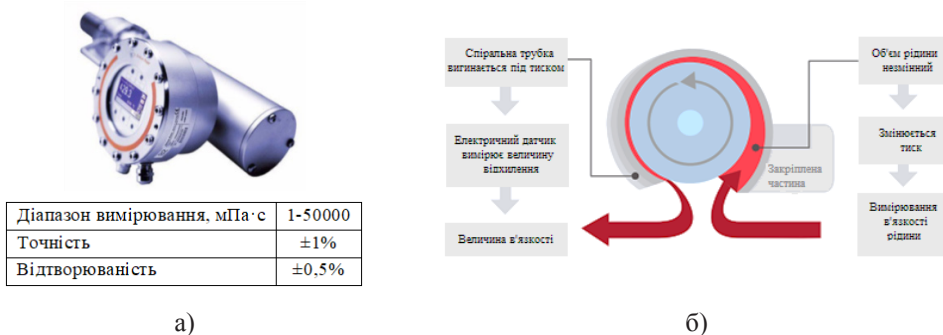


Рис. 8. Віскозиметр L-Vis 510: а) загальний вигляд; б) принцип роботи

Для стабільності якості друку та підтримування в'язкості на заданому рівні у флексографії застосовують автоматичні системи контролю в'язкості. Рішень у цій галузі пропонується дуже багато, й вони охоплюють усі типи фарб та лаків. Зазвичай ці системи встановлюються в ємності з рідиною. Такий контроль відбувається безперервно в реальному часі та дає досить точні результати. Система проводить управління клапаном автоматичного введення добавок та розчинників: час відкриття, мінімальний та максимальний обсяг добавки. Якщо взяти до уваги, що в разі введення розчинника проходить якийсь час на його розподіл за обсягом фарби, то наявність таких регулювань дає можливість повніше керувати процесом. Участь людини в процесі регулювання в'язкістю фарби мінімальна. Система сама приймає рішення щодо введення добавок на основі показів датчиків.

Сучасні автоматизовані системи дають змогу об'єднати безліч датчиків та модулів у єдину мережу, яка автоматично проводить збирання та опрацювання інформації з усіх пристроїв. Перевага полягає в тому, що всі процеси керуються з одного місця з використанням сучасного програмного забезпечення. Зміна налаштувань будь-якої

машини займає ще менше часу й навіть не вимагає появи технолога в друкарському цеху. Головна ж перевага полягає в статистичному аналізі інформації про процес друку тиражу, що дає змогу досягти значної економії фарби та забезпечити стабільний рівень якості. Прикладом таких автоматизованих систем може бути: WinVisc (від Norcross), Opti-color 5000 (від Opti-Color Meß- und Regelanlagen GmbH), Brookfield.

Висновки. У процесі дослідження проаналізовано відомі методи контролю в'язкості рідин, які використовуються у флексографії. Встановлено, що для вимірювання в'язкості флексографічних фарб найпоширенішим є метод капілярного витікання. Чашкові віскозиметри мають досить високу похибку вимірювань, що не завжди задовольняє потреби деяких виробництв. Однак, як показує практика, здебільшого для вимірювання в'язкості такої точності цілком достатньо. Завдяки простоті виготовлення та використання у флексографії також широко застосовуються ротаційні віскозиметри. За метрологічними показниками вони мають широкий діапазон вимірювання з точністю ± 1 %. Їх можна використовувати як безпосередньо в резервуарах із фарбою, так і в системах із відведенням фарби для вимірювання. Доцільним та перспективним є використання вібраційних та електромагнітних сенсорів, які дають можливість оптимізувати процес визначення в'язкості флексографічних фарб. Можливості сучасної процесорної техніки дають змогу автоматизувати процес контролю та регулювання в'язкості фарб, розробляти новітні методи вимірювання параметрів, підвищувати точність вимірювання та розробляти автоматизовані системи оцінювання та підтримування в'язкості на заданому рівні для забезпечення якісної продукції флексографічного друку.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДСТУ ISO 2431:2015. Фарби та лаки. Визначення часу витікання з використанням ліжок (ISO 2431:2011, IDT) [Чинний від 01.01.2016]. Київ, 2015. (Державний Стандарт України). URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=65439 (дата звернення: 10.01.2022).
2. ДСТУ ISO 2884-2:2015. Фарби та лаки. Визначення в'язкості з використанням ротаційного віскозиметра. Частина 2. Дисковий або кульковий віскозиметр, що працює за заданої швидкості (ISO 2884-2:2003, IDT) [Чинний від 01.01.2016]. Київ, 2015. (Державний Стандарт України). URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=78964 (дата звернення: 12.01.2022).
3. Лабтайм. Товари лабораторного та медичного призначення. URL: <https://labtime.ua/uk/produkcija-c2/laboratornye-pribory-c6/oborudovanie-obschelaboratornoe-c31190/viskozimetriy-c8546/> (дата звернення: 20.01.2022).
4. Репета В. Б., Кукура В. В., Місюра М. О. Контроль стабільності друкарського процесу на вузькорулонній уф-флексографічній машині. *Поліграфія та видавнича справа*, 2017. № 1/(73). С. 63–69.
5. Соколов С. В., Соколов О. С., Антоненко С. С. Контроль і вимірювання в технологічних та енергетичних системах : конспект лекцій. Суми : СДУ, 2020. 242 с.
6. Украналітика. Магазин аналітичних приладів для лабораторних досліджень і аналізів. URL: <https://ukranalitika.com.ua/ua/goods/viskozimetriy/programmiruemyy-viskozimetr-s-sensornym-displeem-dv2t> (дата звернення: 01.02.2020).

7. Худолій М. М., Чуб А. М. Низькотемпературний термостат для ротаційного віскозиметра. Вісник НТУ. *Серія «Технічні науки»*. Київ : НТУ, 2017. Вип. 3 (39).
8. Anton Paar. URL:<https://www.anton-paar.com/us-en/products/details/inline-viscometer-l-vis-510/> (дата звернення: 04.02.2020).
9. Brookfield Viscosity. URL: http://www.brookfield-benelux.com/Brookfield_AST100_viscosity_meter.html (дата звернення: 02.02.2020).
10. Cambridge Viscosity. URL: <https://www.cambridgeviscosity.com/lab-process-viscometers-for-fluid-viscosity-measurement> (дата звернення: 30.01.2020).
11. McKelvie A. N. The measurement of paint consistency by flow cups. *Progress in Organic Coatings*. 1978. 6 (1). Pp. 49–64. doi: [https://doi.org/10.1016/0300-9440\(78\)80003-4](https://doi.org/10.1016/0300-9440(78)80003-4).
12. Ratnakar R. R., Dindoruk Birol. Transient measurement and modeling of integrated capillary viscometer for live oils at high temperatures with volumetric constraints. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2021. 201, 108462. doi: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.108462>.
13. Singh P., Sharma K., Puchades I., Agarwal P. B. A comprehensive review on MEMS-based viscometers. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2022. 338. 113456. doi: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2022.113456>.
14. Tryznowska Z. Ž. Rheology of Printing Inks. *Printing on Polymers*. 2016. Pp. 87–99. 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. DSTU ISO 2431:2015. Farby ta laky. Vyznachennia chasu vytikannia z vykorystanniam liiok (ISO 2431:2011, IDT) [Chynnyi vid 01.01.2016]. Kyiv, 2015. (Derzhavnyi Standart Ukrainy). Retrieved from http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=65439 (data zvernennia: 10.01.2022) (in Ukrainian).
2. DSTU ISO 2884-2:2015. Farby ta laky. Vyznachennia v`iazkosti z vykorystanniam rotatsiinoho viskozymetra. Chastyna 2. Dyskovyi abo kulkovyi viskozymetr, shcho pratsiuie za zadanoi shvydkosti (ISO 2884-2:2003, IDT) [Chynnyi vid 01.01.2016]. Kyiv, 2015. (Derzhavnyi Standart Ukrainy). Retrieved from http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=78964 (data zvernennia: 12.01.2022) (in Ukrainian).
3. Labtime. Tovary laboratornoho ta medychnoho pryznachennia. Retrieved from <https://labtime.ua/uk/produkcija-c2/laboratornye-pribory-c6/oborudovanie-obshchelaboratornoe-c31190/viskozimetry-c8546/> (data zvernennia: 20.01.2022) (in Ukrainian).
4. Repeta, V. B., Kukura, V. V., & Misiura, M. O. (2017). Kontrol stabilnosti drukarskoho protsesu na vuzkorulononii uf-fleksografichnii mashyni: Polihrafia i vydavnycha sprava, 1 (73), 63–69 (in Ukrainian).
5. Sokolov, S. V., Sokolov, O. S., & Antonenko, S. S. (2020). Kontrol i vymiriuvannia v tekhnolohichnykh ta enerhetychnykh systemakh : konspekt leksii. Sumy : SDU (in Ukrainian).
6. Ukranalitika. Mahazyn analitychnykh pryladiv dlia laboratornykh doslidzhen i analiziv. Retrieved from <https://ukranalitika.com.ua/ua/goods/viskozimetry/programmiruemyy-viskozimetr-s-sensornym-displeem-dv2t> (data zvernennia: 01.02.2020) (in Ukrainian).

7. Khudolii, M. M., & Chub, A. M. (2017). Nyzkotemperaturnyi termostat dlia rotatsiinoho viskozymetra: Visnyk NTU. Seriiia «Tekhnichni nauky». Kyiv : NTU, 3 (39) (in Ukrainian).
8. Anton Paar. Retrieved from <https://www.anton-paar.com/us-en/products/details/inline-viscosimeter-l-vis-510/> (data zvernennia: 04.02.2020) (in English).
9. Brookfield Viscosity. Retrieved from http://www.brookfield-benelux.com/Brookfield_AST-100_viscosity_meter.html (data zvernennia: 02.02.2020) (in English).
10. Cambridge Viscosity. Retrieved from <https://www.cambridgeviscosity.com/lab-process-viscometers-for-fluid-viscosity-measurement> (data zvernennia: 30.01.2020) (in English).
11. McKelvie, A. N. (1978). The measurement of paint consistency by flow cups. *Progress in Organic Coatings*, 6 (1), 49–64. doi: [https://doi.org/10.1016/0300-9440\(78\)80003-4](https://doi.org/10.1016/0300-9440(78)80003-4) (in English).
12. Ratnakar, R. R., & Dindoruk, Birol. (2021). Transient measurement and modeling of integrated capillary viscometer for live oils at high temperatures with volumetric constraints. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 201, 108462. doi: <https://doi.org/10.1016/j-petrol.2021.108462> (in English).
13. Singh, P., Sharma, K., Puchades, I., & Agarwal, P. B. (2022). A comprehensive review on MEMS-based viscometers. *Sensors and Actuators A: Physical*, 338, 113456. doi: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2022.113456> (in English).
14. Tryznowska, Z. Ž. (2016). Rheology of Printing Inks. *Printing on Polymers*, 87–99. 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: 10.32403/1998-6912-2022-1-64-19-31

ANALYSIS OF INKS VISCOSITY MEASUREMENT INSTRUMENTS FOR FLEXOGRAPHIC PRINTING TECHNIQUE

U. P. Panovyk, R. I. Petriv

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

The article considers the physical meaning of the viscosity concept; physical quantities that are used to describe the viscosity properties of a fluid. The classification of viscosimetry methods for the printing industry is carried out. An analytical review of modern control and measuring instruments of ink viscosity used in flexographic printing process is implemented. The methods that are used the most in determining the ink viscosity are identified.

Capillary leakage is the most common method for measuring the viscosity of flexographic inks. Varieties of cup viscometers, their metrological characteristics, and shortcomings are considered. Rotary viscometers are also widely used in flexography. It is worth noting their ease of manufacture and use. According to metrological indicators,

they have a wide range of measurements with an accuracy of $\pm 1\%$. They can be used both directly in ink tanks and in ink removal systems for measurement. The efficiency of using vibrating and electromagnetic viscometers in optimizing the process of determining the flexographic ink viscosity is studied. The prospects of using a new method for determining the viscosity on the dynamic pressure of the fluid are outlined. In the process of analysis of viscometers, their metrological characteristics are evaluated: range and accuracy of measurement. The advantages and disadvantages of using the considered viscometers to ensure the stability of high-quality flexographic printing are clarified.

The capabilities of modern processor technology make it possible to automate the process of control and regulation of ink viscosity, develop the latest methods of measuring parameters, improve the measurement accuracy and develop the automated viscosity assessment and maintenance systems to ensure quality flexographic printing products.

Keywords: *flexographic printing technique, ink viscosity, gravimetric methods, rotary viscometer, vibrating viscometer, electromagnetic viscometer.*

Стаття надійшла до редакції 11.04.2022.

Received 11.04.2022.