

МЕТОДИ І ПРИЛАДИ ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТИ РІДКОЇ І ГАЗОПОДІБНОЇ ФАЗ

УДК 532.137

УДОСКОНАЛЕННЯ РОТАЦІЙНОГО ВІСКОЗИМЕТРА ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ КОНЦЕНТРАЦІЇ ПАПЕРОВОЇ МАСИ

О.М. Романюк, Г.Б. Крих, Б.А. Кріль, О.В. Кріль*

Національний університет «Львівська політехніка», 79013, м. Львів, вул. С. Бандери, 12

Запропоновано спосіб проведення вимірювань в'язкості неньютонівських рідин за допомогою ротаційного віскозиметра, який дає змогу визначити коефіцієнт консистенції рідини K та індекс течії n у степеневому законі Оствальда де Веле $\sigma = K(\dot{\gamma})^n$. Спосіб також дає змогу усунути вплив моменту сил тертя в ущільненні осі чутливого елемента та у підшипниках на результати вимірювань. Для цього у запропонованому способі проводять вимірювання моменту сили, що діє на чутливий елемент при підході до вибраних для вимірювання частот обертання чутливого елемента зі сторони нижчих частот та зі сторони вищих частот. Отримані значення моменту сили усереднюють. Вимірювання проводять на двох наперед заданих частотах обертання чутливого елемента. Частоту обертання чутливого елемента програмовано змінюють за допомогою частотного перетворювача.

Ключові слова: вимірювання концентрації паперової маси, ротаційний віскозиметр, неньютонівські рідини, вимірювання в'язкості, коефіцієнт консистенції, індекс течії, ефективна в'язкість.

Предложен способ измерения вязкости неньютоновских жидкостей с помощью ротационного вискозиметра, который позволяет определить коэффициент консистенции жидкости K и индекс течения n в степенном законе Оствальда де Веле $\sigma = K(\dot{\gamma})^n$. Способ позволяет также устранить влияние момента сил трения в уплотнении оси чувствительного элемента и в подшипниках на результаты измерений. С этой целью в предложенном способе измеряют момент силы, действующей на чувствительный элемент при приближении к избранной для измерения частоте вращения пропеллера со стороны более низких частот и со стороны более высоких частот. Полученные значения момента силы усредняют. Измерения проводят по очереди на двух предварительно заданных частотах вращения чувствительного элемента. Частоту вращения чувствительного элемента программировано изменяют с помощью частотного преобразователя.

Ключевые слова: измерение концентрации бумажной массы, ротационный вискозиметр, неньютоновские жидкости, измерение вязкости, коэффициент консистенции, индекс течения, эффективная вязкость.

The method of measuring of viscosity of the non-Newtonian liquids by means of rotational viscometer, which gives the possibility to determine the flow consistency index K and the flow behavior index n in Ostwald-de Waele power law $\sigma = K(\dot{\gamma})^n$. The method gives the opportunity to remove the impact of the frictional torque in the sensor shaft sealing and in the shaft bearings on the measuring results. For this purpose in the method proposed the torque acting on the sensor is measured at the approach of the sensor rotation frequency to the selected for carrying out the measurement value on the side of the lower lying frequency, and on the side of the higher lying frequency. The two obtained torque values are then averaged out. The measurements are carried out at two predetermined sensor rotation frequencies. The sensor rotation frequency is programly changed by means of the variable speed drive.

Keywords: pulp consistency measurement, rotational viscometer, non-Newtonian liquids, viscosity measurement, flow consistency index, flow behavior index, apparent viscosity

1. Визначення наукової проблеми, що вибрана для дослідження

Підтримання заданої концентрації паперової маси на різних стадіях її підготовки при виробництві паперу або картону істотно впливає на якість та собівартість продукції. Неперервний контроль концентрації паперової маси найчастіше здійснюють непрямим способом, вимірюючи її в'язкість, оскільки наявні у вторинній сировині неконтрольовані включення домішок роблять проблемним надійне визначення концентрації паперової маси на основі вимірювання поглинання, розсіювання чи зміни поляризації оптичного [1], а також надвисокочастотного електромагнітного випромінювання [2]. Тому у роботі запропоновано спосіб вдосконалення процесу вимірювання концентрації паперової маси за допомогою віскозиметра ротаційного типу.

2. Аналіз останніх публікацій та досліджень, пов'язаних із цією проблемою

Паперова маса належить до неньютонівських рідин, для яких зв'язок між напруженням зсуву σ та швидкістю зсуву $\dot{\gamma}$ є нелінійним та описується степеневим законом Оствальда де Веле (Ostwald de Waele power law) [3]:

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

де K – коефіцієнт консистенції; n – індекс течії (індекс текучості, індекс плинності), значення якого для псевдопластичних рідин, до яких належить макулатурна маса, знаходиться у межах $0.7 < 0 < 1$.

Для опису в'язкості згаданих рідин використовують також ефективну в'язкість (apparent viscosity) [3]:

$$\mu = f(\dot{\gamma}) = \frac{\sigma}{\dot{\gamma}} = K (\dot{\gamma})^{n-1} \quad (2)$$

Зрозуміло, що точне визначення набору двох невідомих величин K та n при проведенні вимірювань у одному режимі неможливе, тому для отримання обох сталих слід провести вимірювання щонайменше у двох різних режимах.

За літературними даними [4] найточніші вимірювання в'язкості рідин у промислових умовах забезпечуються при застосуванні віскозиметрів ротаційного типу із чутливими елементами у формі двох паралельних дисків; один з яких – пропелер обертається. Він зумовлює обертальний рух рідини, а інший диск (імпелер) застосовується для вимірювання

моменту сил в'язкого тертя з боку досліджуваної рідини. Ця конструкція непридатна для паперової маси, оскільки віддаль між дисками має бути малою до 1-2 мм. Тому для паперової маси найчастіше застосовують один дископодібний чутливий елемент або ротор з лопатками, який захоплює паперову масу і по поверхні такого плоского або об'ємного ядра, яке обертається, формується шар, в якому виникає в'язке тертя.

Розглянемо чутливий елемент концентратоміра паперової маси, який має форму диска з радіусом R , на поверхні якого виникає шар з в'язким тертям зі середньою товщиною h (рис. 1). По аналогії з виведенням залежності для визначення моменту сили в'язкого тертя для двох дисків у в'язкому середовищі в [3], з певними допущеннями і поправками при знаходженні експериментальним шляхом значення h , вираз для моменту сили в'язкого тертя M , який діє на плоский диск, який обертається у в'язкій неньютонівській рідині, поведінка якої описується степеневим законом, можна подати у вигляді:

$$\frac{M(3+n)}{4\pi R^3} = K \left(\frac{\Omega R}{h} \right)^n = K (\dot{\gamma}_R)^n \quad (3)$$

Тут $\Omega = 2\pi f$ – кутова швидкість обертання диска, f – частота його обертання n – індекс течії, K – коефіцієнт консистенції та $\dot{\gamma}_R$ – швидкість зсуву рідини на краю диска (на відстані R від геометричної осі обертання).

При роботі віскозиметрів ротаційного типу за виразом (3) вимірюють момент сили в'язкого тертя M , який виникає між рухомим та нерухомим шарами досліджуваної рідини, причому рухомий шар безпосередньо захоплюється і рухається синхронно з чутливим елементом дископодібної форми, що обертається у об'ємі досліджуваної в'язкої рідини з відомою частотою f .

Разом із тим, на вісь чутливого елемента діють також момент сил тертя у підшипниках M_D та момент сил тертя M_S в ущільненні осі, яке захищає вимірювальний блок віскозиметра від проникнення у нього досліджуваної рідини. Ці моменти додаються до вимірюваного моменту сил в'язкості M та спотворюють його значення. Тому виникає проблема зменшення або усунення впливу згаданих моментів сил на результати вимірювання в'язкості досліджуваної рідини. Розглянемо нижче це детальніше.

В приладах лабораторного призначення найчастіше відсутнє ущільнення осі чутливого елемента, оскільки вся конструкція занурена у досліджувану рідину зверху. Вісь, на якій обертається чутливий елемент, просто виходить з поверхні рідини. Досліджувана рідина перебуває у відкритій комірці віскозиметра під атмосферним тиском і утримується від попадання у вимірювальний блок віскозиметра силою тяжіння [5]. Тому проблема усунення моменту сил тертя M_s в ущільненні осі чутливого елемента в таких конструкціях не виникає.

Тому такий вимірювач в'язкості непридатний для роботи безпосередньо у трубопроводі папероробної лінії, у якому макулатурна маса перебуває під досить значним надлишковим тиском. У цьому випадку необхідно пропустити вісь чутливого елемента через ущільнення, яке захистить вимірювальний блок віскозиметра від проникнення у нього паперової маси [6]. Таке вимушене рішення спричиняє появу додаткового моменту сил тертя M_s , який діє на вал чутливого елемента з боку ущільнення, та додається до вимірюваного значення моменту сили в'язкого тертя, який діє на чутливий елемент з боку досліджуваної рідини. Отже, застосування ущільнення осі чутливого елемента призводить до зміни значення моменту сили, який передається від чутливого елемента на вимірювальний пристрій, і спотворює результати вимірювань.

Для зменшення цієї похибки необхідно усунути вплив моменту сил тертя в ущільненні M_s на результат вимірювання. Цього можна досягнути такими способами:

1) Застосувати чутливий елемент достатньо великих розмірів для того, щоб величина моменту сил і в'язкого тертя M була набагато більшою, ніж момент сил тертя в ущільненні M_s . Тоді можна було б знехтувати його впливом. Можливості даного способу обмежують реальні діаметри трубопроводів для подачі паперової пульпи, на яких має встановлюватися прилад.

2) Виміряти експериментально залежність M_s від режиму обертання чутливого елемента та ввести відповідну поправку при обчисленні значення в'язкості паперової маси. Такий спосіб також потребує інформації про зміни значення M_s залежно від тривалості та режимів експлуатації ущільнення.

3) Застосувати ущільнення, яке буде одночасно виконувати роль пружного елемента, і за кутом закручування якого вимірювати діючий на чутливий елемент момент сили в'язкого тертя M . Проблема полягає у тому, що пружні властивості малих ущільнюючих торсіонів у вигляді повздовжньо гофрованої тонкостінної трубки і полімерних ущільнень для їх захисту від забивання змінюються з часом у процесі роботи і функція перетворення приладу також буде змінюватися з часом.

4) Застосувати автоматичну слідкуючу систему, котра буде обертати допоміжний трубчастий вал, всередині якого через пружне ущільнення проходить вісь чутливого елемента, з такою самою кутовою швидкістю. Ущільнення валу чутливого елемента при цьому буде весь час в незакрученому стані, а споживана потужність сервоприводу чутливого елемента буде пропорційна до моменту в'язкого тертя M [7].

5) Застосувати конструкцію вимірювального вузла, у котрій ущільнення забезпечує герметичне нерухоме з'єднання чутливого елемента із системою приводу через пружну тонкостінну трубку, кут закручування якої несе інформацію про момент сили в'язкого тертя, що діє на чутливий елемент [8]. Вказана конструкція є герметичною без ущільнюючої прокладки, однак при роботі з паперовою масою проміжок між вимірювальною трубкою та зовнішньою трубкою – корпусом чутливого елемента необхідно захистити від попадання паперової маси за допомогою кільцевої ущільнюючої прокладки, щоби уникнути відкладення твердих часток та солей.

Отже, в усіх перерахованих способах, придатних для вимірювання в'язкості паперової маси всередині трубопроводу, застосовують ущільнення чутливої обертової осі за допомогою еластичного полімерного кільця, торсійні ущільнення на основі тонкої повздовжньо гофрованої трубки, підшипники для кріплення осі чутливого елемента. Тому мінімізація або усунення впливу моменту тертя в перерахованих елементах на результат вимірювання в'язкості паперової маси має важливе значення для підвищення точності вимірювань за допомогою ротаційних віскозиметрів.

3. Формулювання мети статті

Метою даної статті є вдосконалення способу вимірювання концентрації паперової маси за допомогою віскозиметрів ротаційного типу шляхом проведення вимірювань моменту сили зсуву, що виникає під дією в'язкого тертя

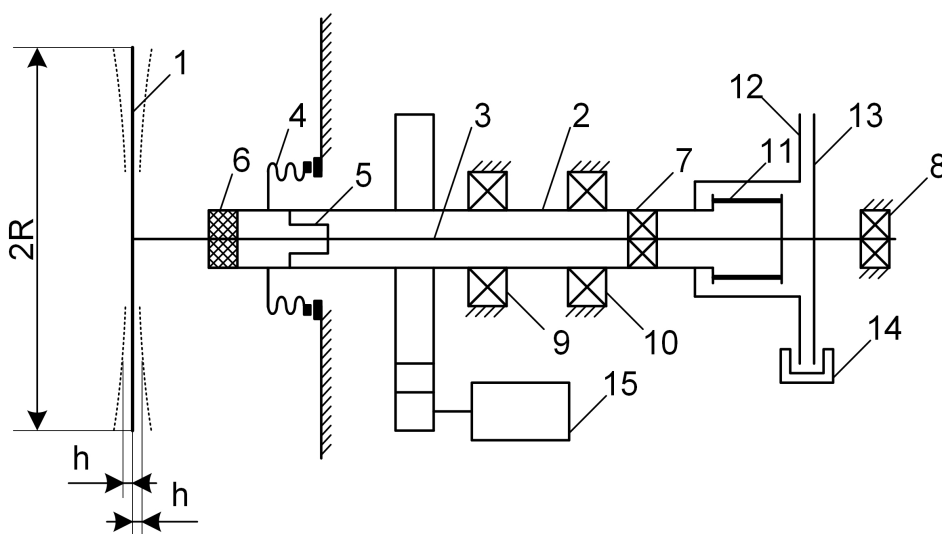
шару досліджуваної макулатурної маси, при двох почергово заданих частотах обертання чутливого елемента дископодібної форми.

4. Запропонована модель віскозиметра та алгоритм обробки результатів вимірювання в'язкості

Досліджувався прилад для вимірювання концентрації паперової маси за в'язкістю, який реалізує ротаційний метод з обертовим елементом дископодібної і симетричної відносно напрямку обертання форми (рис. 1). Основна порожниста вісь за допомогою двигуна, що живиться від частотного перетворювача, обертається із попередньо заданою частотою, і зумовлює обертальний рух макулатурної маси. В ній розміщена ще одна вісь, на якій закріплений чутливий елемент дископодібної форми. На чутливий елемент при обертанні в паперовій масі діє момент сил в'язкого тертя, котрий закручує зв'язаний з цим чутливим елементом пружний торсійний елемент на кут φ . Величина кута несе інформацію про в'язкість і пов'язана з нею концентрацію паперової маси.

4.1. Запропонована конструкція виміральної установки

Ротаційний концентратомір паперової пульпи, який зображений на рис. 1, складається з чутливого елемента 1 дископодібної форми з симетричними відносно напрямку обертання радіальними ребрами; основної порожнистої осі приладу 2, яка обертається в підшипниках 9, 10 від асинхронного двигуна 15 через пасову передачу. Всередині основної порожнистої осі 1 на гнучкому повздожньогофрованому ущільненні 5, під-шипниках 7 і 8 коаксіально розміщена вісь 3, на якій закріплений чутливий елемент 1. Основна порожниста вісь 2 та вісь чутливого елемента 3 з'єднані між собою пружним торсійним елементом 11. Зі сторони паперової пульпи ущільнення 5 закрито еластичним кільцем 6, на основній осі 2 змонтоване ущільнення 4. На осі 2 закріплений диск з прорізами по колу 12. На осі 3 закріплений такий же по конструкції диск 13. Кут повороту дисків 12 і 13 вимірюється оптопарою з відкритим оптичним каналом 14.



1 - чутливий елемент дископодібної форми; 2 - основна порожниста вісь приладу; 3 - вісь чутливого елемента; 4 - ущільнення основної порожнистої осі з сільфону і кільцевих вставок з сплаву карбід вольфраму-кобальт; 5 - гнучке ущільнення з повздожньогофрованої тонкостінної трубки; 6 - еластичне ущільнення для захисту від забивання ущільнення 5; 7, 8 - підшипники осі чутливого елемента; 9, 10 - підшипники основної порожнистої осі; 11 - торсійна пружина з циліндричних стержнів по колу; 12 - диск з прорізами на основній порожнистій осі; 13 - диск з прорізами на осі чутливого елемента; 14 - оптичний давач кута зміщення дисків 12 і 13; 15 - двигун з живленням від частотного перетворювача

Рисунок 1 – Конструкція механічної частини ротаційного вимірювача концентрації паперової пульпи за в'язкістю

При вимірюванні концентрації паперової пульпи основний вал обертається з заданою кутовою швидкістю, яка вибрана для вимірювання. За рахунок в'язкісного тертя, яке буде залежати від концентрації паперової пульпи, виникне момент, який буде діяти на чутливий елемент 1. Під дією цього моменту чутливий елемент повернеться на певний кут відносно основної осі приладу. Цей кут вимірюється за зміщенням диска 12 відносно диска 13, що фіксується за шириною імпульсів, які поступають від оптопари 14. Відхилення кута повороту чутливого елемента буде пропорційним до значення моменту в'язкісного тертя і, відповідно, до значення концентрації паперової пульпи.

4.2. Математична модель пристрою

Для чутливого елемента у формі диска симетричної форми (можуть бути зроблені симетричні радіальні ребра по обох поверхнях диску) відносно напрямів обертання з радіусом R та середньою товщиною шару, в якому відбувається в'язкісне тертя h , момент сили в'язкого тертя M , який діє на диск, що обертається у в'язкій неньютонівській рідині, описаної степеневим законом, визначається з виразу (3).

4.3. Запропонований алгоритм визначення параметрів рідини

Для підвищення точності визначення концентрації макулатурної маси за в'язкістю пропонується провести вимірювання моменту сил в'язкості при двох різних кутових швидкостях обертання чутливого елемента Ω_1 та Ω_2 . У цьому випадку на основі формули (3) отримуємо наступні рівняння

$$M_2 \frac{(3+n)}{4\pi R^3} = K \left(\frac{\Omega_2 R}{h} \right)^n \quad (4)$$

$$M_1 \frac{(3+n)}{4\pi R^3} = K \left(\frac{\Omega_1 R}{h} \right)^n \quad (5)$$

Поділивши окремо ліві та праві частини рівнянь (4) та (5), отримаємо вираз:

$$\frac{M_2}{M_1} = \left(\frac{\Omega_2}{\Omega_1} \right)^n \quad (6)$$

З нього отримуємо значення індексу течії:

$$\frac{M_2}{M_1} = \left(\frac{\Omega_2}{\Omega_1} \right)^n \quad (7)$$

Далі знаходимо коефіцієнт консистенції K :

$$K = M \cdot \frac{(3+n)}{4\pi R^3} \cdot \left(\frac{h}{\Omega R} \right)^n \quad (8)$$

4.4. Зменшення впливу моменту сил тертя в ущільненні осі чутливого елемента на результати вимірювань концентрації паперової маси за в'язкістю

В ротаційних вимірювачах концентрації паперової пульпи за в'язкістю інформація отримується шляхом вимірювання моменту сил в'язкого тертя, який діє на чутливий елемент, що обертається із заданою частотою в шарі досліджуваної паперової маси. Момент сили в'язкого тертя, який діє на чутливий елемент, передається за допомогою пропущеної через герметичне ущільнення осі на вимірювач моменту сили, який може бути побудований із застосуванням пружного елемента – торсіону, кут закручення якого φ буде пропорційним до моменту сил в'язкого тертя M :

$$\varphi = \frac{M}{\psi}, \quad (9)$$

де ψ - коефіцієнт закручування торсіону.

За відомим кутом закручування торсіону φ можна визначити момент сили в'язкого тертя і далі – коефіцієнт в'язкості, який залежить від концентрації паперової маси.

На роботу такого вимірювача концентрації паперової маси впливає той факт, що на чутливому елементі момент сили в'язкого тертя M зрівноважується не лише моментом сили закрученого торсіону M_t , але на нього діє і момент сил тертя в ущільненнях та підшипниках осі чутливого елемента M_s . Оскільки у запропонованому способі вимірювання частота обертання чутливого елемента періодично змінюється, пропонується проводити вимірювання моменту сили, що закручує торсіон, при наближенні частоти обертання пропелера до робочої частоти обертання з боку нижчих частот обертання $M_{\uparrow t}$ (частота обертання чутливого елемента зростає

до робочого значення Ω_1 чи Ω_2) та при наближенні до робочої частоти обертання з боку вищих частот $M_{\downarrow t}$ (частота обертання чутливого елемента зменшується до робочого значення Ω_1 чи Ω_2).

В динамічному режимі кутове прискорення ε обертального руху чутливого елемента та його осі пов'язане з моментом інерції j та іншими згаданими моментами сил виразом, який одержимо нижче. При підвищенні робочої частоти, обертання прискорює момент сил в'язкості M та сповільнює (гальмує) момент сил з боку закрученого торсіону $M_{\uparrow t}$ та момент сили тертя в ущільненнях осі чутливого елемента M_s (момент сил тертя завжди направлений так, що гальмує рух):

$$j \cdot \varepsilon = M - M_{\uparrow t} - M_s \quad (10)$$

При досягненні заданого значення робочої частоти обертання Ω_1 чи Ω_2 кутова швидкість обертання чутливого елемента стає постійною і його кутове прискорення ε стає рівним нулю. Формула (10) спрощується і зв'язок між моментом сили, зафіксованим закрученим на кут φ торсіоном, моментом сили в'язкості, та моментом сили тертя в ущільненнях осі чутливого елемента приймає вигляд:

$$M_{\uparrow t} = M - M_s \quad (11)$$

Якщо частота обертання чутливого елемента наближається до тої ж робочої частоти зверху (з області вищих частот), то чутливий елемент під дією переважаючого моменту сил закрученого на надто великий кут торсіону повертається у напрямі до недеформованого положення торсіону назустріч напрямку обертання чутливого елемента. Момент сил тертя в ущільненні осі чутливого елемента M_s тепер разом із моментом сили в'язкого тертя M протидіє такому обертанню:

$$j \cdot \varepsilon = M - M_{\uparrow t} + M_s \quad (12)$$

В стані стабілізації значення робочої частоти обертання основного порожнинного валу приладу Ω_1 чи Ω_2 кутове прискорення

чутливого елемента ε стає рівним нулю і вираз виглядає так:

$$M_{\downarrow t} = M + M_s \quad (13)$$

Після додавання (11) та (13) видно, що моменти сил тертя в ущільненнях осі чутливого елемента взаємно компенсуються і середнє арифметичне вимірів моменту сили при наближенні до робочої частоти обертання чутливого елемента знизу і зверху стає рівним моментів сил в'язкості, які діють на чутливий елемент на робочій частоті обертання:

$$M = \frac{M_{\uparrow t} + M_{\downarrow t}}{2} = M_{сеп} \quad (14)$$

Очевидно, що у записаних формулах також міг враховуватися і момент сил тертя у підшипниках M_{Π} . При цьому у формулах (10 – 13) слід замінити момент сили тертя в ущільненні M_s на суму моменту сил тертя в ущільненні осі чутливого елемента M_s та моменту тертя у підшипниках M_{Π} :

$$M_s \rightarrow M_s + M_{\Pi} \quad (15)$$

Кінцевий вираз (14) при цьому не зміниться, а значить усереднення значень моменту сили, вимірюваного за кутом закручування торсіону при наближенні частоти обертання основного порожнинного валу приладу до встановленого робочого значення знизу і зверху, дозволяє усунути вплив моментів сил тертя в ущільненнях вимірювальної осі та у її підшипниках на результат вимірювання в'язкості при застосуванні запропонованого методу вимірювань.

4.5. Зменшення впливу моменту сил тертя в ущільненні осі чутливого елемента на результати вимірювань концентрації паперової маси за в'язкістю

Для реалізації вимірювань концентрації паперової маси запропоновано декілька варіантів зміни частоти обертання чутливого елемента приладу в часі.

Загальною особливістю запропонованих вимірювальних циклів є проведення вимірювань моменту сили в'язкого тертя з плавним наближенням частоти обертання чутливого елемента до вибраних для вимірювань значень частот обертання. При зростанні частоти

(наближення “знизу”) вимірюється M_{\uparrow} , а при зменшенні частоти обертання чутливого елемента (наближення “зверху”) до обраної для вимірювань частоти обертання чутливого елемента вимірюється значення M_{\downarrow} . Для цього після завершення вимірювання після підходу до частоти обертання Ω «знизу» частота обертання незначно підвищується, короткий час підтримується постійною; після чого знижується до того ж значення Ω і при цьому вимірюється значення моменту сили M_{\downarrow} . Виміряні значення моментів сил запам’ятовуються та усереднюються за виразом (14). Виміряні при зміні напрямку обертання значення моментів сил в’язкого тертя, які отримані для двох різних частот обертання, усереднюють із результатами, які отримані при обертанні чутливого елемента у прямому напрямку, та використовують для визначення параметрів паперової маси K та n та наступного перерахунку значення в’язкості в одиниці концентрації паперової маси.

Пропоновані цикли зміни частоти обертання чутливого елемента при вимірюванні концентрації паперової маси можуть виглядати так, як це зображено на рис.2.

Отже, послідовність змін частот напруги живлення двигуна приводу чутливого елемента може бути такою:

а) вимірювання проводиться спершу при обертанні чутливого елемента в одному напрямі на нижчій та на вищій частотах обертання з підходами до заданих значень частот обертання “знизу” та “зверху” після деякого перевищення значення заданої частоти. Після цього частота обертання чутливого елемента переходить через нульове значення і далі вимірювання продовжується за тим же алгоритмом в протилежному напрямку обертання.

б) вимірювання проводить аналогічно до описаного в п.а), але не застосовується підхід “зверху” при вимірюванні моменту на нижчій заданій частоті.

в) спочатку проводиться вимірювання моменту сили в’язкого тертя при обертанні чутливого елемента на нижчій частоті обертання у прямому та зворотному напрямках. Далі такі ж вимірювання проводяться на вищій частоті обертання чутливого елемента при обертанні у прямому та зворотному напрямках.

При порівнянні тривалості вимірювальних циклів видно, що найкоротшим є цикл, зображений на рис. 2б. В деяких випадках його

ще можна скоротити, не застосовуючи підходу до вищої заданої частоти обертання з боку перевищення завдання.

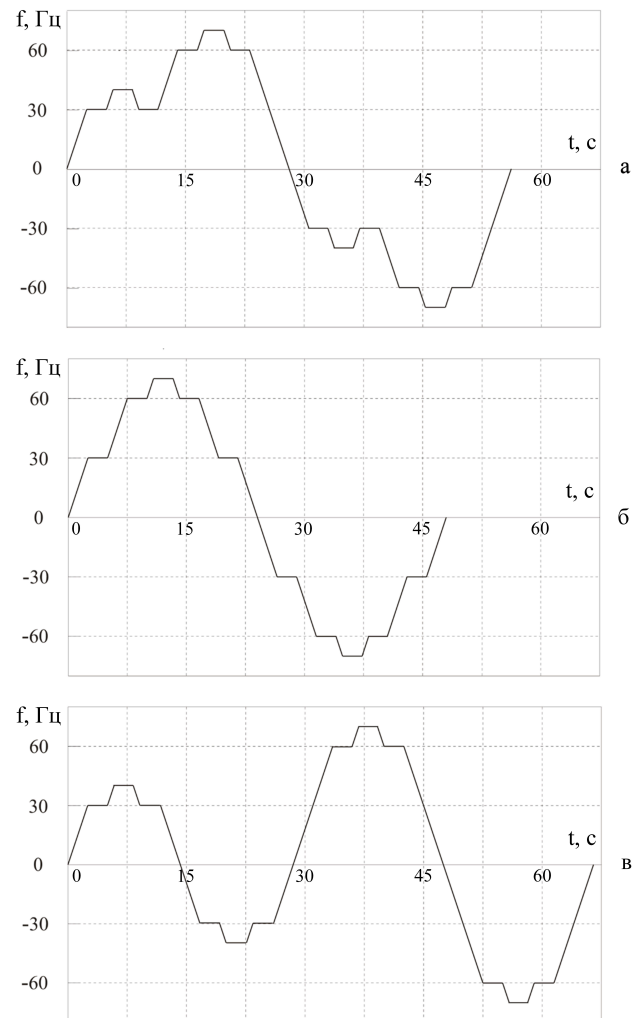


Рисунок 2 – Запропоновані цикли зміни частоти обертання чутливого елемента ротаційного концентратоміра паперової маси за в’язкістю. По осі ординат відображена частота напруги живлення двигуна приводу чутливого елемента f (1/с). Частота напруги живлення двигуна зі знаком мінус вжита для позначення напрямку обертання чутливого елемента в протилежний бік

5. Представлення та обговорення результатів дослідження

Результати дослідження показали, що змінюючи за попередньо запрограмованим законом частоту обертання двигуна приводу чутливого елемента концентратоміра паперової маси за в’язкістю та проводячи вимірювання на

двох різних частотах обертання цього елемента, прилад дає змогу визначити в'язкісні характеристики паперової маси K та n , за допомогою яких визначається ефективна

в'язкість макулатурної маси $\mu = \frac{\sigma}{\dot{\gamma}} = K(\dot{\gamma})^{n-1}$,

котра переводиться у значення концентрації. Запропоновано також усереднювати результати вимірювання моменту сил в'язкого тертя при наближенні частоти обертання чутливого елемента віскозиметра до робочої частоти, вибраної для проведення вимірювань з боку нижчих, та з боку вищих частот. При усередненні результатів таких вимірювань відбувається компенсація моментів сил тертя в ущільненнях, та у підшипниках, які підтримують вісь чутливого елемента віскозиметра, що дає змогу підвищити точність вимірювання в'язкості та концентрації паперової маси. Запропоновано алгоритми зміни частоти обертання чутливого елемента віскозиметра для проведення вимірювань згідно з описаним способом.

Висновки

У роботі показано, що при використанні двох різних частот обертання чутливого елемента ротаційний віскозиметр дає змогу визначити коефіцієнт консистенції та індекс течії, за допомогою яких визначається в'язкість та пов'язана з нею концентрація макулатурної маси. У даній роботі також запропоновано усереднювати результати вимірювання моменту сил в'язкого тертя при наближенні частоти обертання чутливого елемента віскозиметра до робочої частоти, вибраної для проведення вимірювань з боку нижчих та з боку вищих частот обертання. При усередненні результатів

таких вимірювань відбувається компенсація моментів сил тертя в ущільненнях осі чутливого елемента та у підшипниках, які підтримують вісь чутливого елемента віскозиметра. Це дає змогу підвищити точність вимірювання в'язкості та пов'язаної з нею концентрації макулатурної маси.

1. Michael H. Waller (1993) *A tutorial on the measurement of paper stock consistency*. *ISA Transactions* 32, 277-282. 2. Jakkula P., Tahkola E. (2000) *Microwave Sensor System for the Consistency Measurement in the Pulp and Paper Industry*. *Sensors Update* 7, p. 211-232. 3. Steffe J.F. (1996) *Rheological Methods in Food process Engineering*. Second edition. Freeman press, East Lansing, MI, USA 418p. 4. Blanco A., Negro C., Fuente E., Tijero J. (2007) *Rotor Selection for a Searle-Type Device to Study the Rheology of Paper Pulp Suspensions*, " *Chemical Engineering and Processing*, 46(1), pp. 37-44. 5. Katsura T. (1973) *Torsion digital viscometer*. *US Patent No. 3751975*. 6. JT-Tieto Oy & Marjo Nygård (2010) *Metso Rotating Consistency Transmitter. Installation & Owner's Manual K09157 V1.0 EN Metso Automation Inc. Documentation*. 7. Anderson N., Kullander J., Lundberg P., Adrian P. (2012) *Phase Controller for a Dual Motor Torque Detecting Device*. *US Patent No.: US 8171776 B2* 8. Ekhard Preikschat (1997) *Rotating consistency transmitter impeller and method*. *US Patent No. 5684247*

Поступила в редакцію 05.09.2017 р.

Рекомендували до друку: докт.техн.наук,
проф. Олійник А. П., докт. техн. наук, проф.
Семенцов Г. Н.