

# МЕТОДИКА І АВТОМАТИЗОВАНА УСТАНОВКА ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ РЕОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК РІДИННИХ СИСТЕМ

Л.А. Булавін, Т.Ю. Ніколаєнко, Н.Л. Шейко

Київський національний університет імені Тараса Шевченка,  
Україна, проспект Глушкова, 2, корпус 1, 03022  
e-mail: tim\_mail@ukr.net

Запропоновано методику вимірювань та розроблено автоматизовану експериментальну установку для вимірювання реологічних характеристик рідинних систем. Особливістю методики є те, що вона дозволяє проводити вимірювання неперервно в процесі фазових перетворень. Розроблено відповідне програмне забезпечення для автоматизації процесу вимірювань. Проведено експериментальну апробацію установки.

## Вступ

Вимірювання реологічних характеристик (наприклад, в'язкості) рідинних систем у процесі фазових перетворень дозволяє одержати цінну інформацію про параметри релаксаційних процесів у таких об'єктах. Більшість відомих методів (наприклад, методи вимірювання в'язкості [1, 2]) не дозволяють проводити вимірювання протягом усього процесу фазового переходу: коли зразок в ході експерименту змінює свій фазовий стан. Один із методів, позбавлений цього недоліку, описаний в [3]. Однак, через використання у ньому режиму вільних коливань, цей метод виявляється незастосовним для зразків з порівняно великими дисипаціями механічної енергії (коли коефіцієнт затухання коливань  $\beta$  стає порівняним з частотою коливань  $\omega$ ).

## Постановка задачі

З метою усунення цього недоліку було розроблено інший метод вимірювання, який, з одного боку, придатний для досліджень зразка як у твердій, так і в рідкій фазах, а з іншого – забезпечує достатню

точність результатів для зразків зі значними дисипативними властивостями.

## Методика вимірювань

Для досягнення поставленої мети було використано режим вимушених коливань зразка. Зразок являє собою трубку 1 з пружного матеріалу (рис. 1), заповнену досліджуваною рідинною системою 2. Один з кінців трубки (лівий на рис. 1, а) закріплюють нерухомо. Інший (правий) кінець трубки продівають крізь спеціальне циліндричне кріплення на ребрі дрютяної рамки 3, закривають трубку пробкою 4, крізь яку герметично проходять виводи датчика температури 5 і до якої приєднано котушку 6 (рис. 1, б). Сумарна маса  $m_a$  ( $m_a \sim 2$  г) функціональних елементів, приєднаних до вільного (правого на рис. 1) кінця трубки 1, визначається окремо і в подальшому враховується у розрахунках.

Таким чином, трубка 1, заповнена досліджуваною рідинною системою 2, має змогу здійснювати поперечні коливання згину. Суть запропонованого методу вимірювань полягає у визначенні резонансних характеристик (основної власної частоти

$\omega_0$  і коефіцієнта згасання  $\beta$ ) коливальної системи «трубка+наповнення» та подальшому розрахунку на їх основі реологічних характеристик рідинної системи 2. Визначення  $\omega_0$  і  $\beta$  проводиться шляхом вимірювання і подальшої обробки залежності  $a(\omega)$  амплітуди  $a$  коливань незакріпленого (правого на рис. 1) кінця трубки від частоти  $\omega$  прикладеної до нього зовнішньої сили (див. «Обробка результатів»).

Перевагою такого методу визначення реологічних характеристик є однакова його придатність для дослідження речовини, що заповнює трубку 1, як у рідкій, так і в твердій фазі. Окрім того, для до-

сліджень достатньо невеликого (кілька  $\text{см}^3$ ) об'єму речовини, а оскільки остання перебуває в закритій трубці, то пропонується метод придатний для дослідження летких та/або токсичних речовин. Нарешті, порівняно з методом [3], де механічне напруження передавалося стовпу рідини через порівняно малу площу пробок, у пропонованому методі механічне напруження передається через бокову поверхню трубки. Це виключає ризик спотворення результатів вимірювань у разі ненадійного контакту досліджуваної речовини з пробками.

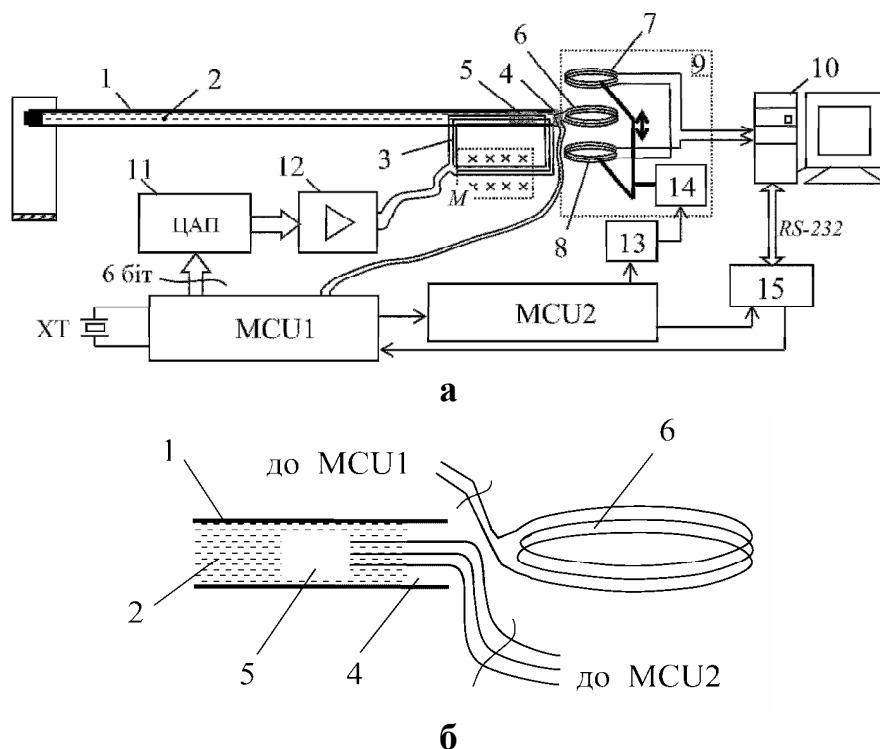


Рис. 1. Блок-схема розробленої експериментальної установки для визначення реологічних характеристик рідинних систем (а) і збільшений її фрагмент (б).

### Система збудження коливань

Для збудження коливань трубки 1 слугує дрютяна рамка 3, яка вміщена в магнітне поле нерухомо закріпленого магніту  $M$ : рамкою пропускається змінний струм, джерелом якого виступає підсилювач 12 (вихідна потужність до 20 Вт). Вхідний сигнал для підсилювача 12 син-

тезується мікроконтролером MCU1 (PIC16F630, [4]) та 6-бітним цифро-аналоговим перетворювачем (ЦАП) 11; частота  $\omega$  цього сигналу задається відповідною командою з ПЕОМ 10. Цифрові стани виходів RC0–RC5 мікроконтролера MCU1, до яких приєднано ЦАП 11, встановлюються і змінюються процедурою об-

робки переривання від таймера 1 (TMR1, [4]).

Підсилювач 12 виконано на базі інтегральної мікросхеми TDA2005, увімкненої за мостовою схемою [5]. Таке рішення дозволяє уникнути використання розділюючих конденсаторів на виході підсилювача (наявність яких суттєво знизила би вихідну потужність підсилювача на низьких (~10 Гц) частотах) і, крім того, дозволяє використовувати однополярне джерело живлення. Мінімумально допустимий опір (на постійному струмі) рамки 3 складає 4 Ом [5]; максимальна вихідна потужність підсилювача 20 Вт.

Геометрична форма і розміри магніту  $M$  вибрано таким чином, щоб в процесі коливань нижнє ребро рамки 3 завжди було перпендикулярне до силових ліній магнітного поля, а останнє було близьким до однорідного.

Така система збудження дозволяє приводити незакріпленій кінець трубки у вимушені коливання у вертикальній площині періодичною у часі силою заданої частоти  $\omega$ . Похибка задання частоти  $\omega$  визначається в першу чергу точністю кварцового резонатора ХТ і не перевищує 0,1 Гц в діапазоні від 2 до 300 Гц.

### Система реєстрації

Реєстрація амплітуди  $a$  коливань незакріпленого (правого на рис. 1) кінця трубки здійснюється диференціальним датчиком зміщення 9: високочастотне (4 кГц) змінне магнітне поле від котушки 6, закріпленої на пробці 4, індукє е.р.с. у котушках 7 і 8, причому різниця цих е.р.с. є однозначною функцією відхилення  $x(t)$  правого кінця трубки від положення рівноваги. Джерелом високочастотного сигналу слугує вихід RA2 мікроконтролера MCU1 (цифровий стан виходу RA2 змінюється процедурою обробки переривання від таймера 0 (TMR0 [4])).

Для калібровки датчика зміщення 9 передбачена можливість переміщення котушок 7 і 8 (вони встановлені на спільному каркасі) вверх і вниз з кроком 0,3 мм

за допомогою крокового двигуна 14. Керування кроковим двигуном здійснюється мікроконтролером MCU2 (PIC16F676) через комутатор 13.

Різницевий сигнал від котушок 7 і 8 подається на вхід звукової плати ПЕОМ і обробляється спеціально розробленою програмою.

Блок 15 забезпечує одночасно гальванічну розв'язку і узгодження рівнів сигналу інтерфейсу RS-232. Він виконаний на базі оптопари TLP521-2.

### Система контролю температури

Робоча ділянка вміщується в повітряний термостат (рис. 2), який дозволяє охолоджувати зразок азотом. Термостат складається з теплоізоляційного кожуха 1, кювети для рідкого азоту 2 і вентилятора 3. Суміш повітря і випаруваного з кювети

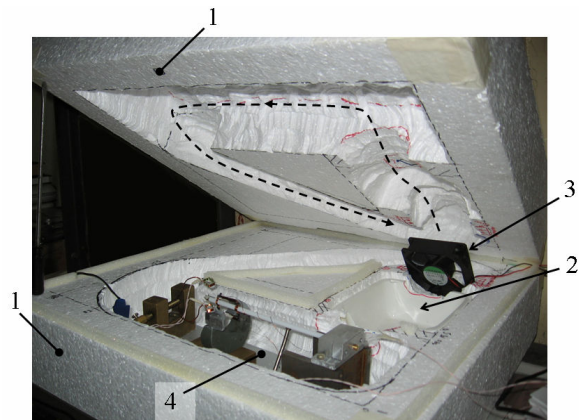


Рис. 2. Повітряний термостат з відкритою кришкою

азоту продувається вентилятором 3 крізь робочу ділянку 4, охолоджуючи зразок до потрібної температури.

Виготовлений термостат дозволяє проводити вимірювання температурної залежності реологічних характеристик рідинної системи в діапазоні температур  $-50^{\circ}\text{C} \div +20^{\circ}\text{C}$  (нижня межа визначається якістю теплоізоляції термостату, верхня – температурою оточуючого середовища).

Для контролю температури досліджуваної рідинної системи використано цифровий датчик температури 5 типу DS18B20 [6], розміщений безпосередньо в об'ємі зразка (рис. 1, б). Точність вимірю-

вання температури не гірша  $\pm 0,25$  °С. Перевагами використаного датчика температури є невеликі розміри (див. [6]), відсутність потреби у додатковій калібровці і цифровий формат вихідного сигналу. Підтримка цифрового інтерфейсу датчика (1-Wire) реалізована у програмі для мікроконтролера MCU2.

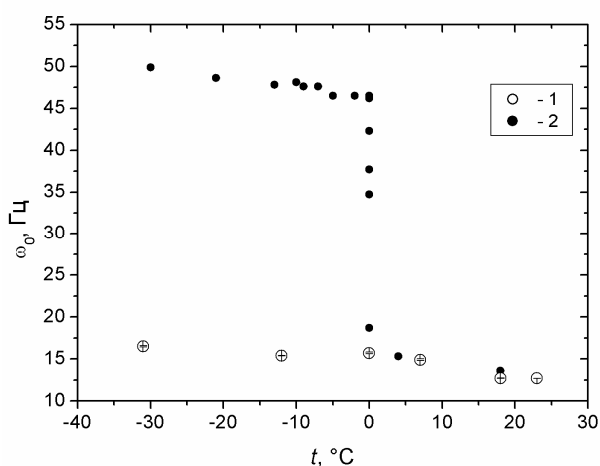
З'єднувальні провідники для підключення дротяної рамки 3, котушки 6 і датчика температури 5 виконані з гнучкого мідного дроту з лаковою ізоляцією діаметром 0,2 мм і тому не спотворюють пружні властивості трубки 1.

### Обробка результатів

Спеціально розробленим програмним забезпеченням автоматизовано проводиться вимірювання амплітуди  $a$  коливань незакріпленого кінця трубки для ряду різних частот  $\omega$ . Далі одержані результати апроксимуються за методом найменших квадратів залежністю

$$a(\omega) = \frac{a_0}{\sqrt{(\omega^2 - \omega_0^2)^2 + 4\beta^2 \omega^2}},$$

в результаті чого визначаються параметри



$\omega_0$  (основна власна частота коливань) і  $\beta$  (коефіцієнт їх затухання).

Вимірювання величин  $\omega_0$  і  $\beta$  проводиться в заданому інтервалі температур спочатку для пустої трубки 1, а потім – для тієї ж трубки, заповненої досліджуваною речовиною 2.

За значеннями  $\omega_0$  і  $\beta$ , вимірними для пустої і заповненої трубки, геометричними розмірами трубки, густиною досліджуваної рідинної системи і значенням маси  $m_a$  в рамках обраної реологічної моделі можна розрахувати реологічні характеристики рідинної системи 2. Такий розрахунок являє собою окрему наукову задачу і не розглядається в даній статті.

### Апробація методики

Для експериментальної апробації розробленої методики і установки було проведено вимірювання температурної залежності власної частоти  $\omega_0$  і коефіцієнта затухання  $\beta$  для води (льоду) в діапазоні температур  $-30^\circ \div +20^\circ\text{C}$ . Отримані залежності наведено на рис. 3.

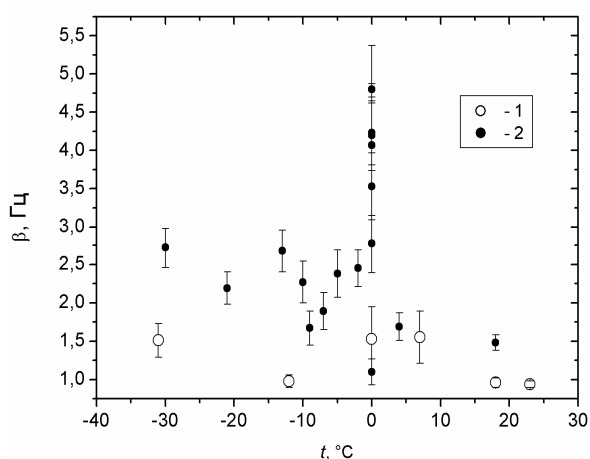


Рис. 3. Одержані температурні залежності основної власної частоти  $\omega_0$  і коефіцієнта затухання коливань  $\beta$  порожньої (1) і заповненої (2) трубки.

Одержані результати засвідчують високу точність пропонованої методики і її чутливість до зміни реологічних характеристик зразка в процесі фазового пере-

творення (плавлення льоду). Точність вимірювання частоти  $\omega_0$  склала 0,2%, а коефіцієнта затухання  $\beta$  – не гірше 6%.

### Висновки

Розроблено методику і автоматизовану установку для визначення температурних залежностей реологічних характеристик рідинних систем, зокрема – в ході фазових перетворень. Експериментальна ап-

робація створеної установки засвідчила високу точність одержуваних результатів. Одержано патент України на корисну модель [7].

### Література

1. R. S. Lakes. Viscoelastic measurements techniques. Rev. Sci. Instrum. vol. 75, № 4, P. 797–810 (2004).
2. L. Bruschi, M. Santini. Vibrating wire viscometer. Rev. Sci. Instrum. vol. 46, № 11, P. 1560–1568 (1975).
3. Патент на винахід №78094 Україна, МПК(2007) G01N11/16 (2007.01) G01N11/10. Спосіб визначення реологічних характеристик концентрованих рідин / Л. А. Булавін, Ю. Ф. Забашта, О. Ю. Актан, Т. Ю. Ніколаєнко. – u200502350; Заявл. 15.03.2005; Опубл. 15.02.2007, Бюл. № 2. – 5 с.
4. PIC16F630/676 Data Sheet. 14–Pin FLASH–Based 8–Bit CMOS Microcontrollers // Microchip Technology Inc. – 2003. – Режим доступу: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/40039E.pdf>.
5. TDA2005. 20W BRIDGE AMPLIFIER FOR CAR RADIO. / STMicroelectronics. – 2003. – Режим доступу: <http://www.st.com/stonline/products/literature/ds/1451.pdf>.
6. DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer. / Dallas Semiconductor, 2002. – Режим доступу: <http://datasheets.maximic.com/en/ds/DS18B20.pdf>.
7. Патент України на корисну модель № 39001, МПК (2009) G01N 1/16, G01N 1/10. Пристій для вимірювання реологічних характеристик рідин та рідинних систем. / Л.А.Булавін, Т.Ю. Ніколаєнко. – 4 с. - Опубл. 26.01.2009. Бюл. № 2. Заявка u200812613 від 28.10.2008 р.

## METHOD AND COMPUTERIZED EXPERIMENTAL SETUP FOR MEASUREMENTS OF RHEOLOGICAL CHARACTERISTICS OF FLUID SYSTEMS

**L.A. Bulavin, T.Yu. Nikolaienko, N.L. Sheiko**

Taras Shevchenko Kiev National University, Ukraine, Hlushkova prosp. 2, build. 1, 03022. e-mail: [tim\\_mail@ukr.net](mailto:tim_mail@ukr.net)

A measurement method is proposed and a computerized experimental setup is designed to determine the rheological characteristics of fluid systems. The method enables continuous measurements to be performed in the course of a phase transition. A corresponding software is developed. The setup was tested experimentally.

