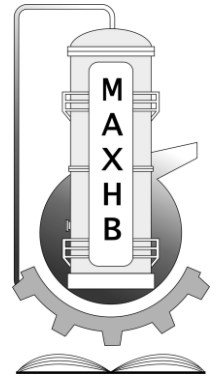


**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ**  
**УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ**  
**"КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ**  
**імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО"**



# **ДОСЛІДЖЕННЯ РЕОЛОГІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ РОЗЧИНІВ ПОЛІМЕРІВ**

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ**

для студентів спеціальності  
133 Галузеве машинобудування  
спеціалізація: Інжиніринг, обладнання та технології хімічних та нафтопе-  
реробних виробництв  
освітньо-кваліфікаційного рівня Спеціаліст  
дисципліна “Обладнання для синтезу і переробки полімерних матеріалів”

Київ-2017

Дослідження реологічних властивостей розчинів полімерів. Методичні вказівки до виконання лабораторної роботи студентів спеціальності: 133 Галузеве машинобудування, спеціалізація: Інжиніринг, обладнання та технології хімічних та нафтопереробних виробництв, освітньо-кваліфікаційного рівня спеціаліст з дисципліни “ Обладнання для синтезу і переробки полімерних матеріалів”: [Електронний ресурс] / „КПІ ім. Ігоря Сікорського”; уклад. М. П. Швед, А. Р. Степанюк. – Київ: „КПІ ім. Ігоря Сікорського”, 2017. 17с.

*Гриф надано Вченою радою  
інженерно-хімічного факультету  
КПІ ім. Ігоря Сікорського  
(Протокол № 2 від 27 березня 2017 р.)*

Навчальне видання

## **ДОСЛІДЖЕННЯ РЕОЛОГІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ РОЗЧИНІВ ПОЛІМЕРІВ**

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ**

для студентів спеціальності  
133 Галузеве машинобудування  
спеціалізація: Інжиніринг, обладнання та технології хімічних та нафтопереробних виробництв  
освітньо-кваліфікаційного рівня спеціаліст  
дисципліна “ Обладнання для синтезу і переробки полімерних матеріалів”

Укладачі: *Швед Микола Петрович*, канд. техн. наук, доцент  
*Степанюк Андрій Романович*, канд. техн. наук, доцент

Відповідальний редактор *В.Л.Дахненко*, канд. техн. наук, доцент

Рецензент *О. Л. Сокольський*, канд. техн. наук, доцент

*За редакцією укладачів*

## **1 МЕТА ТА ОСНОВНІ ЗАДАЧІ РОБОТИ**

Вивчення реологічних властивостей розчинів полімерів дуже важливе для розвитку методу інженерного розрахунку в області тепло- та масообміну, енергетичних витрат при змішуванні та транспортуванні. Знання цих властивостей дасть можливість більш точно підходити до проектування нового високопродуктивного обладнання для виготовлення полімерів.

Метою даної роботи є експериментальне визначення таких реологічних параметрів, як в'язкість, швидкість зсуву, напруга зсуву в залежності від температури та концентрації розчинів полімерів.

У зв'язку з поставленою метою можна сформулювати такі завдання дослідів:

1. Експериментально визначити в'язкість розчинів полімерів у залежності від температури, концентрації полімеру, швидкості зсуву та напруги зсуву.

2. На основі експериментальних даних побудувати криві течії при різних температурах та концентраціях.

3. Апроксимувати криву течії в області нелінійно в'язкої течії степеневим законом, визначити коефіцієнт консистенції та показник неньютонівської поведінки досліджуваних розчинів в залежності від температури та концентрації.

Лабораторна робота викладена за методичними вказівками [1].

## **2 ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА**

Велика кількість реальних речовин, особливо високомолекулярних сполук, мають такі властивості, як нелінійно в'язку течію, пластичність, пружність та ін., що не спостерігається в ньютонівських рідинах. Ці рідини

називаються неньютонівськими рідинами, тобто їх в'язкість не залишається постійною при заданих температурах та тиску, а залежить від інших факторів, таких як швидкість зсуву, конструктивні особливості апарата, в якому знаходиться рідина, та від передісторії поведінки рідини. [2, 3].

В'язкість неньютонівських рідин зменшується по певному закону в залежності від зміни швидкості зсуву (напруги зсуву). Рідина, у яких в'язкість зменшується з ростом швидкості зсуву, називають псевдопластичними. До них належать більшість розчинів полімерів [2, 3].

В'язкісні властивості неньютонівських рідин мають різні способи графічного відображення, а саме:  $j = f(\tau)$ ;  $\mu = f(j)$ ;  $\mu = f(\tau)$ .

Залежності  $\mu = f(j)$  та  $\mu = f(\tau)$  називають в'язко-швидкісними кривими течії, які показують, як змінюється в'язкість в залежності від швидкості зсуву чи напруги зсуву. Слід відзначити, що всі види кривих еквівалентно описують властивості полімерних систем.

Типова повна крива течії псевдопластичних рідин показана на рисунку 1.

При достатньо малих  $j < j_1$  та дуже великих  $j < j_\infty$  швидкостях зсуву спостерігається неньютонівська поведінка псевдопластичних рідин. У кожній з цих областей середовище характеризується постійними, але різними по величині в'язкостями, які відповідно називаються найбільшою  $\mu_0$  та найменшою  $\mu_\infty$  ньютонівськими в'язкостями.

Найбільша ньютонівська в'язкість розчинів полімерів залежить від концентрації, температури, молекулярної маси розчиненого полімера та природи розчинника.

Середня криволінійна ділянка від точки «а» до точки «в» відображає неньютонівську течію рідини та називається структурною в'язкістю або ефективною в'язкістю. Структурно-в'язкі властивості рідин пояснюються

змінами, які відбуваються в структурі рідини внаслідок орієнтації, часткового чи повного руйнування асоціатів макромолекул.

Потрібно відзначити, що аномалія в'язкості розчинів полімерів виявляється більш сильно, тим сильніше, чим більша концентрація розчинів та жорсткість ланцюгів полімерів. Вплив температури на аномалію в'язкості розчинів практично не помітний, якщо інтервал температур не більше 10...15°C. З ростом прикладеної до речовини напруги зсуву зменшується залежність в'язкості від молекулярної маси.

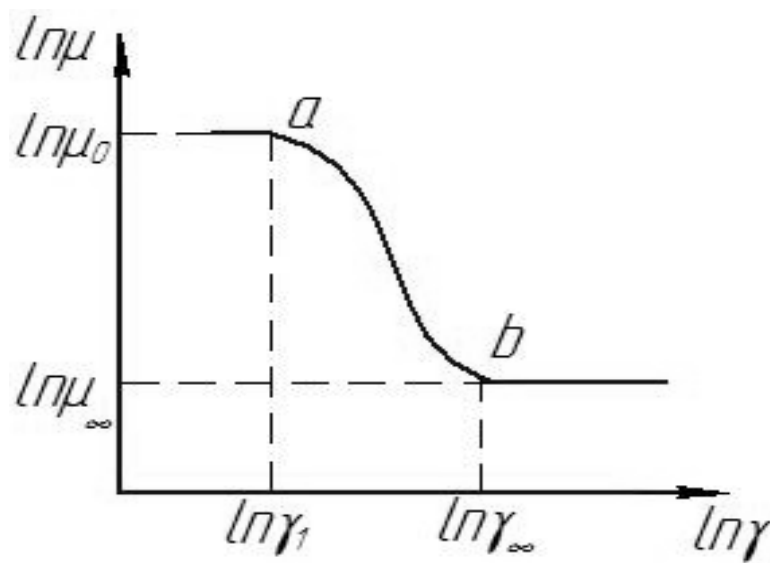


Рисунок 1 – Повна крива течії псевдопластичних рідин.

З великої кількості емпіричних рівнянь (Прандтля, Ейринга-Пауеля, Елиса, тощо) в інженерній практиці для апроксимації кривої течії в області неньютонівської течії широко застосовують реологічне рівняння стану в формі степеневі залежності Оствальда, яке для простого зсуву в квазиньютонівському запису можна представити як:

$$\tau = \left| \frac{\partial U_x}{\partial y} \right|^{n-1}, \quad \frac{\partial U_x}{\partial y} = K(\bar{j})^{n-1}, \quad \bar{j} = \mu_{ef} \cdot \bar{j}_{ef}, \quad (1)$$

де  $\tau$  - напруга зсуву, н/м<sup>2</sup> (Па);

$K$  - коефіцієнт консистентності, нс/м<sup>2</sup> (Па\*с);

$\frac{\partial U_x}{\partial y}$  - швидкість зсуву,  $\text{с}^{-1}$ ;

$n$  - показник ступеня, який характеризує ступінь неньютонівської поведінки;

$n = 1$  - для ньютонівських рідин;

$n < 1$  - для псевдопластичних рідин;

$n > 1$  - для дилатантних рідин.

При дослідженні неньютонівських рідин виникають проблеми кількісної оцінки в'язкості, яка змінюється не тільки при зміні температури, але і градієнта швидкості. Це привело до поняття ефективної в'язкості:

$$\mu_{ef} = \frac{\tau}{j_{ef}} = \kappa |j|^{n-1} \quad (2)$$

Тобто ефективна в'язкість кількісно дорівнює в'язкості умовної ньютонівської рідини, яка при даному градієнті швидкості зсуву на стінці вимірювального елемента мала ту ж саму напругу зсуву.

Коефіцієнт консистентності  $K$  є в'язкість в координатах  $\ln \mu_{ef} = f \ln(j)$  при швидкості зсуву, рівній  $1 \text{с}^{-1}$ , він може бути визначеним графічним шляхом з кривої течії або з відношення:

$$\tau = K \cdot j^n \quad (3)$$

Для визначення параметрів  $K$  і  $n$  необхідно прологрифмувати вираз (3). Отримаємо вираз (рисунок 2):

$$\ln(\tau) = K + n \cdot \ln(j) \quad (4)$$

Тоді показник степеня  $n$  визначається, як  $1 - \text{tg}\alpha$ , де  $\alpha$  – кут нахилу кривої течії, до горизонталі в логарифмічних координатах:

$$n = 1 - \text{tg}\alpha = 1 - \frac{\ln \mu_{ef1} - \ln \mu_{ef2}}{\ln \gamma_2 - \ln \gamma_1} \quad (5)$$

На рисунку 2 показано графічне визначення реологічних параметрів  $K$  і  $n$ .

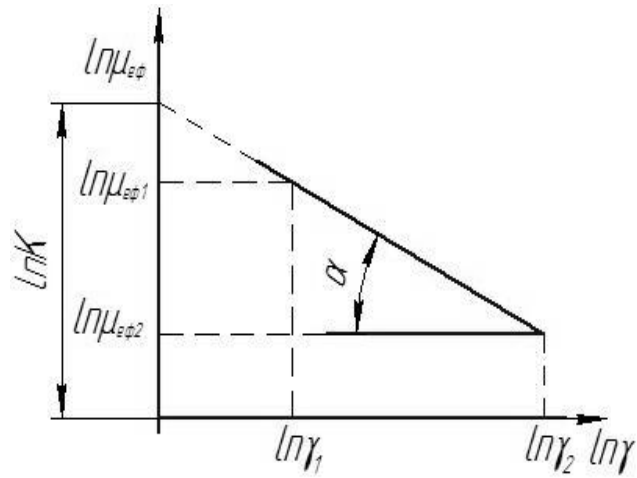


Рисунок 2 – До визначення реологічних параметрів  $K$  та  $n$

Більш точно реологічні параметри  $K$  та  $n$  можуть бути визначені за методом найменших квадратів на ПК. Для цього будується графік у програмі Microsoft Excel, вибирається для побудови тип діаграми “Точечная” (Рисунок 3). Як вісь абсцис вибирається значення  $\ln \gamma$ , ординат відповідно –  $\ln \mu_{ef}$ .

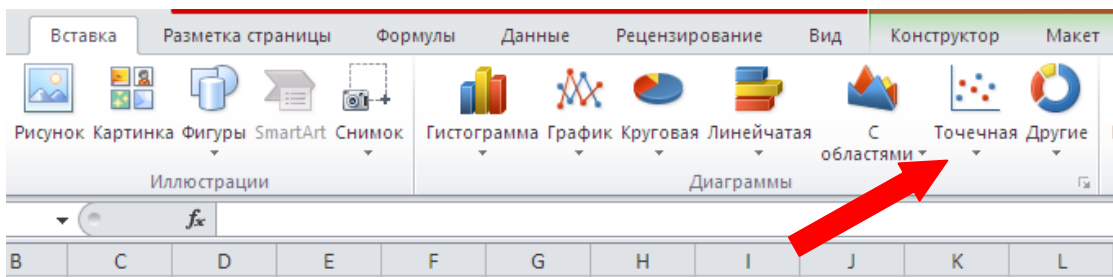


Рисунок 3 – Вибір типу діаграми

Для побудови апроксимаційної кривої необхідно виділити лівою клавішею “мишки” криву, що описує залежність  $\ln \mu_{ef} = f(\ln \gamma)$ , правою клавішею “мишки” викликати контекстне меню і вибрати закладку “Добавить линию тренда”, у цій закладі зробити три позначки на полі “Параметры линии тренда” – “Линейная”, “показывать уравнение на

диаграме” та “поместить на диаграмму величину достоверности аппроксимации (R^2)” (Рисунок 4). З рівняння апроксимації, враховуючи вираз (4) можна отримати величини параметрів  $K$  і  $n$ .

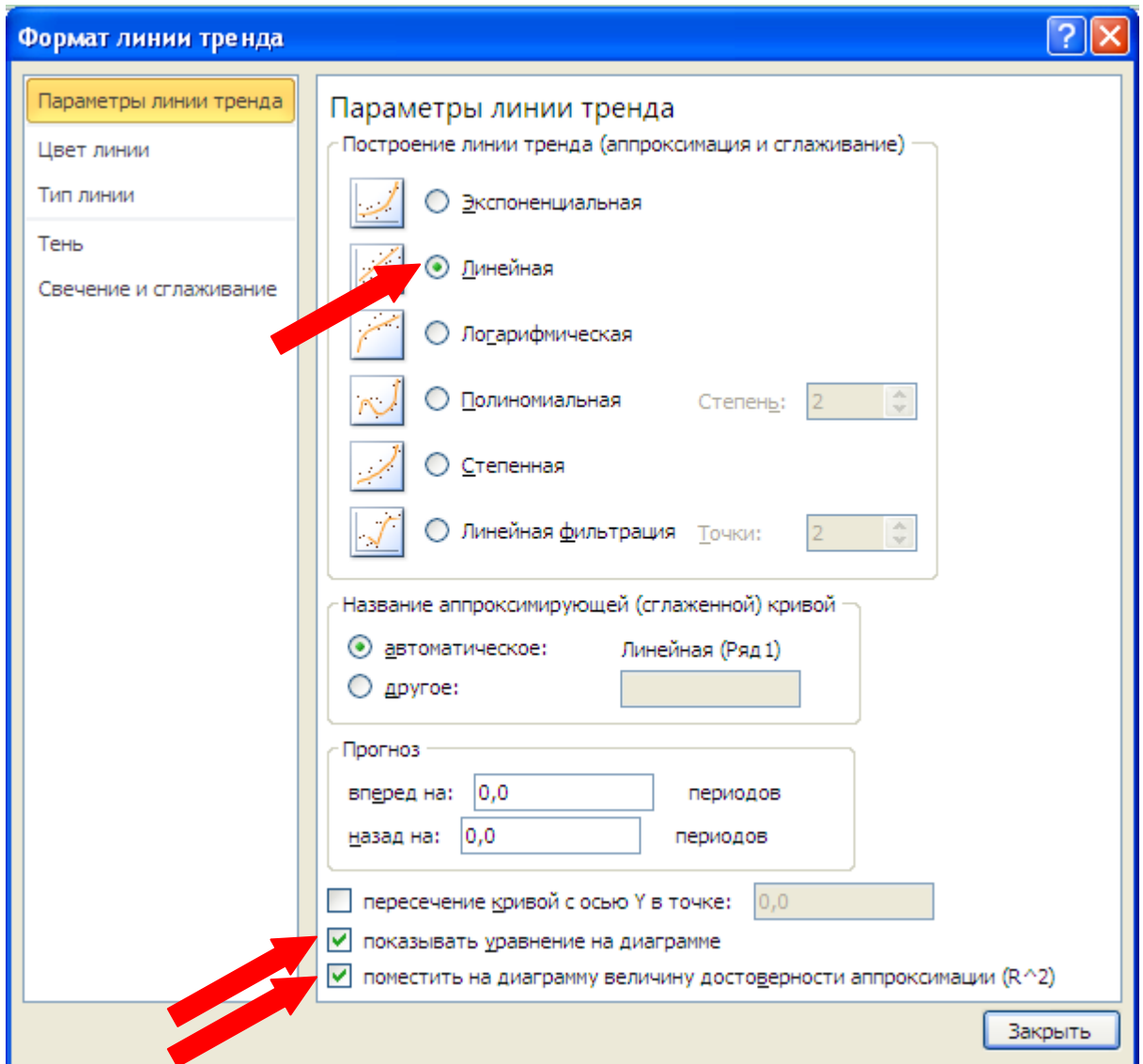


Рисунок 4 – Побудова апроксимуючої лінії

Температурна залежність між коефіцієнтами консистентності може бути записана у вигляді:

$$K_2 = K_1 e^{-\beta \frac{T_2 - T_1}{T_1}}, \quad (6)$$



де  $K_1$  та  $K_2$  - коефіцієнт консистентності при температурах відповідно  $T_1$  та  $T_2$ ;  $\beta$  - температурний коефіцієнт.

Для визначення чисельного значення  $\beta$  необхідно побудувати криві течії дослідного розчину полімеру при двох температурах  $T_1$  та  $T_2$ . Визначивши значення  $k_1$  та  $k_2$  з відношення (3) або графічним шляхом, можливо знайти  $\beta$ , прологарифмувавши рівняння (6):

$$\beta = - \frac{T_1 \lg \left( \frac{K_2}{K_1} \right)}{T_2 - T_1} \quad (7)$$

Залежність коефіцієнта консистентності  $K$  від температури  $T_1$  та концентрації полімеру зручно виразити у вигляді

$$K = \frac{A_{\text{exp}} \left( b_0 c + \frac{E_0 + b_1 c}{RT} \right)}{j^{n-1}} \quad (8)$$

де  $b_0, E_0, b_1$  коефіцієнти, що залежать від природи полімеру та розчинника. Для визначення коефіцієнтів  $b_0, E_0, b_1$  потрібно проводити спеціальні дослідження.

### 3 ОПИС ДОСЛІДНОЇ УСТАНОВКИ

Реологічні характеристики розчинів полімерів досліджуються на ротаційному віскозиметрі типу РВ-8 у діапазоні швидкостей зсуву  $j=2...300\text{с}^{-1}$ . Принцип роботи ротаційного віскозиметра полягає в наступному. Між поверхнями двох циліндрів, які мають одну вісь обертання, з радіусами  $r_1$  та  $r_2$  заливають дослідний матеріал. Один з циліндрів приводиться в рух, при цьому матеріал деформується і виникає явище зсуву між шарами дослідної речовини. Якщо зазор між циліндрами

$\delta \ll r_1$ , в зазорі створюється поле напруги (а також швидкостей деформації), близьке до однорідного.

Технічна характеристика прибору РВ-8.

1. Розміри вимірювального елемента РВ-8, мм:

радіус внутрішнього циліндра  $r_1=15,05$ ;

радіус зовнішнього циліндра  $r_2=19,05$ ;

радіус шківів, на який намотана нитка,  $R=22,35$ .

2. Об'єм дослідного матеріалу між циліндрами - до 30 см<sup>3</sup>.

3. Діапазон вимірювання в'язкості 0,5...100 Пас.

4. Діапазон робочих температур 293... 335 К.

5. Потужність 500 Вт.

Живлення від мережі змінного струму 200 В частотою 50 Гц.

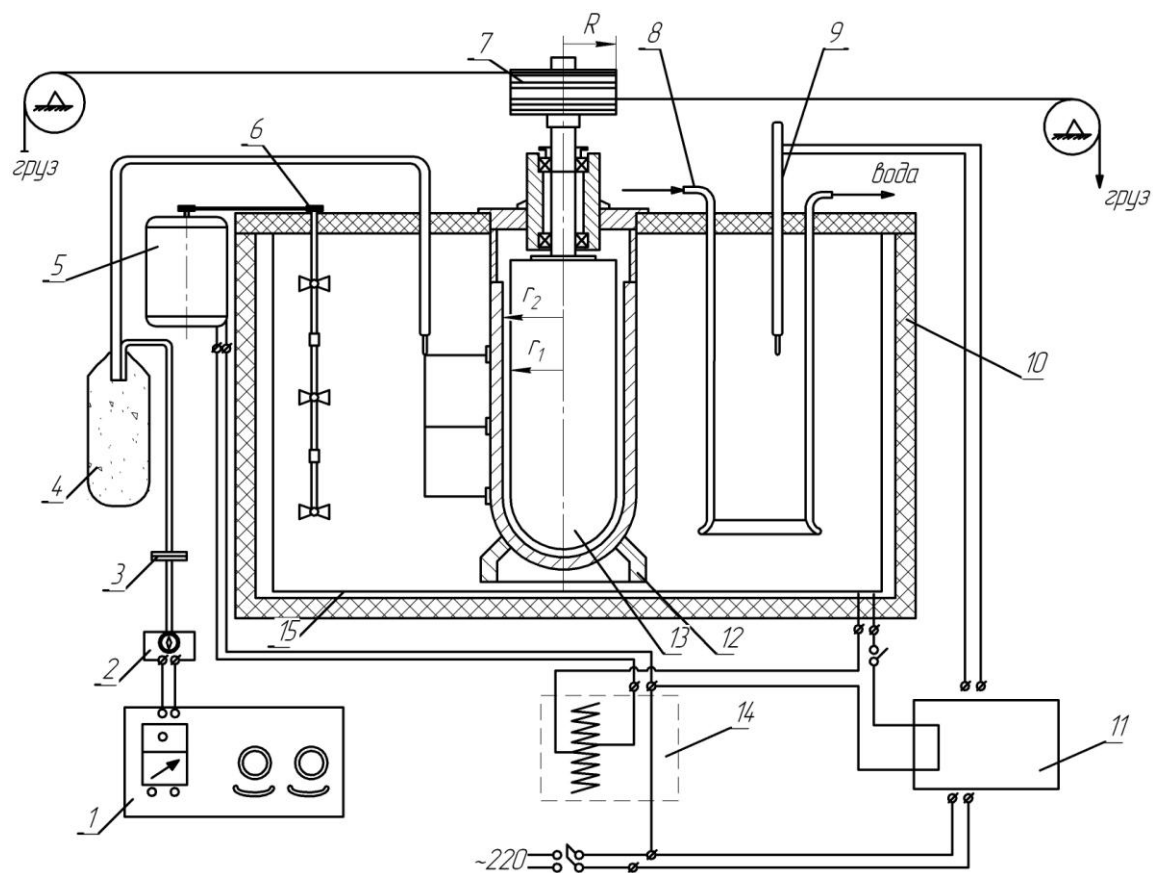
6. Маса -15 кг.

Принципова схема установки подана на рисунку 5.

Установка складається з таких вузів: вузол вимірювання обертаючих моментів, який в свою чергу складається з внутрішнього циліндра 13, що обертається, зовнішнього нерухомого циліндра 12, шківів 7. Цей вузол служить одночасно також і для вимірювання швидкості обертання внутрішнього циліндра.

Для підтримки постійної температури дослідної речовини віскозиметр РВ-8 споряджений термостатом, який складається з корпусу 15, нагрівача 10, водяного теплообмінника 8 і мішалки 6. Мішалка має привід від електродвигуна 5 змінного струму потужністю 2 Вт. Мішалка служить для створення більш однорідного температурного поля в термостатуєчій рідині. Теплообмінник в термостаті призначений для швидкого охолодження термостатуєчої рідини; блока автоматичного регулювання температури 11, який в комплексі з контактним термометром 9 служить для підтримки заданої температури

дослідної рідини протягом роботи; прибори контролю температури дослідної речовини. Датчиками при контролі температури служить мідь - константантові термопари, холодний спай, який поміщається в посудина Дюара 4. ТЕДС термопар скрізь розбірну муфту 3, багатопозиційний перемикач 2 поступає на вимірювальний прилад 1 типу ПП-63; вузла електроживлення блока автоматичного регулювання температури, електронагрівача термостата та електро двигуна, складеного з лабораторного трансформатора 14 типу ЛАТР.



- 1 – вимірювальний прилад; 2 – багатопозиційний перемикач;  
 3 – муфта; 4 – посудина Дюара; 5 – електродвигун; 6 – мішалка; 7 – шків;  
 8 – водяний теплообмінник; 9 – контактний термометр; 10 – нагрівач;  
 11 – блок автоматичного регулювання; 12 – зовнішній циліндр;  
 13 – внутрішній циліндр; 14 – лабораторний трансформатор; 15 – корпус.

Рисунок 5 – Принципова схема установки

#### **4 ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ**

1. Перед вмиканням перевірити наявність заземлення та рівень термостатуючої рідини.
2. Роботу проводити тільки за інструкцією.
3. При виконанні роботи бути уважними: деталі що знаходились у термостаті (рухомий та нерухомий циліндри), мають високу температуру. При очищенні циліндра від розчину полімеру їх необхідно брати ганчір'ям.

#### **5 МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДІВ ТА ОСНОВНІ ВИМІРЮВАННЯ**

До початку вимірювань віскозиметр встановити горизонтально по рівню за допомогою установчих гвинтів. Потім перевірити силу тертя  $G_{тр}$  в підшипниках системи, що обертається та в роликах, тобто в підшипниках вузла вимірювання обертових моментів. Для цього потрібно зняти чашечки та до ниток підвісити по черзі грузи 0,5; 1; 1,5; 2 грами, поки не почне обертатися центральна вісь. Сила тертя в підшипниках повинна переборюватися моментом, який створює вантаж масою не більш двох грамів. Якщо сила тертя в підшипниках вища за допустиму, то підшипник вузла необхідно помити бензином та заново змастити, а потім відрегулювати притискною гайкою, після чого перевірити силу тертя. Зважити пусті чашки для різноваг, та записати масу  $G_ч$  до таблиці.

Для завантаження дослідного матеріалу у нерухомий циліндр корпус підшипників разом з циліндром, що обертається, та кришкою підняти над термостатом і закріпити притискним гвинтом. У зовнішній нерухомий циліндр залити 4... 10 см дослідної речовини. Потім вставити його в корпус підшипників і встановити кришку на місце. Увімкнути

нагрівач термостата та привід мішалки. На контактному термометрі встановити необхідну температуру. Контроль за прогрівом матеріалу виконується за допомогою потенціометра ПП-6. Після того, як прогріється дослідний матеріал, виконати заміри.

На чашку встановити початковий вантаж  $G_r$ , відпустити гальмо та за допомогою секундоміра визначити час, за який циліндр, що обертається, робить 4...7 обертів. Для кожного вантажу виконати три повторні заміри. Потім встановити наступний вантаж. Заміри повторюються до тих пір, поки швидкість обертання циліндра не досягне  $5...6 \text{ с}^{-1}$ . Температуру розчину потрібно вимірювати через п'ять хвилин протягом усього досліді. Після закінчення досліді вимкнути нагрівач та привід мішалки. Підняти кришку

термостата і викрутити нерухомий циліндр з корпуса підшипників. По поділках на рухомому циліндрі визначити рівень  $h$  дослідної рідини в зазорі між вимірювальними циліндрами. Потім почистити циліндри від дослідної речовини та зібрати прилад у зворотній послідовності. Результати дослідів занести в таблицю 1.

Таблиця 1 - Результати вимірів

№ п/п	Концентрація розчину, мас. %	$t_d$ , К	$2G_r$ , кг	$2G_{ch}$ , кг	$G_{tr}$ , кг	$G$ , кг	$T$ , с	$T_{cp}$ , с	$N$ , об	$n = \frac{N}{T_{cp}}$ , $\text{с}^{-1}$	$h$ , м

## 6 ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДУ

Прилад РВ-8 є початковим віскозиметром, тобто він дає можливість визначити в'язкість та напругу зсуву в абсолютних одиницях, а не безпосередньо з розмірів приладу, і тому не потребує калібрування. В'язкість вираховується за такою формулою:

$$\mu = K_1 \frac{G_p}{n} \cdot 10^{-4} \text{ (нс/м}^2\text{;Па}\cdot\text{с)}, \quad (9)$$

де  $G=2G+2G_{\text{ч}}-G_{\text{тр}}$ :

$G$  - маса грузів , кг;

$G_{\text{ч}}$  - маса чашок, кг;

$G_{\text{тр}}$  - сила тертя в підшипниках, кг;

$n$ - частота обертання циліндра,  $\text{с}^{-1}$ ;

$k_1$ - константа, має таке значення:

$$k_1 = \frac{R \cdot g \cdot 10^{-2}}{8 \cdot \pi^2 \cdot \left( \frac{h \cdot r_1^2 \cdot r_2^2}{(r_2^2 - r_1^2) \cdot 10^{-2}} + \frac{r_1^3 \cdot r_2^3}{r_2^3 - r_1^3} \right)}, \quad (10)$$

де  $R$  - радіус шківів, на який намотана нитка, м;

$r_1$  - радіус внутрішнього циліндра, м;

$r_2$  - радіус зовнішнього циліндра, м;

$h$  - рівень дослідної речовини в зазорі між циліндрами, м;

$g$  - прискорення сили тяжіння,  $\text{м/с}^2$ .

При зміні рівня  $h$  в межах 0,04...0,10 м константа  $k_1= 0,61... 0,28$ .

Напруга зсуву розраховується за формулою:

$$\tau = k_2 P_p \cdot 10^{-1} \text{ (Н/м}^2\text{)}, \quad (11)$$

де  $k_2$  - константа віскозиметра.

$$k_2 = \frac{R \cdot g \cdot 10^{-2}}{2\pi r_1^2 h + \frac{\pi r_1^3}{2}} \quad (12)$$

При зміні рівня  $h$  в межах 0,04...0,1 м константа  $k_2 = 13...30,5$ .  
Швидкість зсуву обчислюємо за формулою:

$$j = \frac{k_2}{k_1} n_{,(c^{-1})} \quad (13)$$

Результати розрахунків заносимо до таблиці 2.

Таблиця 2 - Результати розрахунків

№ п/п	Концентрація розчину, мас. %	$t_d$ ,	$\mu$ , Па·с	$j$ , $c^{-1}$	$\tau$ , Н/м <sup>2</sup>	$\lg \mu$	$\lg j$	$\lg \tau$

За результатами розрахунків будемо криві течії  $\lg \mu_{ef} = f \lg(j)$   
та  $\lg j = f(\lg \tau)$  при різних температурах розчину полімеру.

Після цього показник степеня  $n$  визначається, як  $1 - \text{tg}\alpha$ ,  
де  $\text{tg}\alpha$  - тангенс кута нахилу прямої  $\lg \mu_{ef} = f \lg(j)$  до осі ординат в  
логарифмічних координатах (приклад на рисунку 2 або за допомогою  
програми Microsoft Excel чи по залежності (5)).

Коефіцієнт консистентності  $K$  можна знайти з графіка,  
скориставшись залежністю  $\lg \mu_{ef} = f \lg(j)$ , (приклад на рисунку 2 або за

допомогою програми Microsoft Excel чи по залежності, чи визначити по залежності (3)).

Визначити реологічні параметри  $K$  та  $n$  для різних температур можна також методом найменших квадратів.

З рівняння (7) визначаємо значення температурного коефіцієнта  $\beta$ .

Записуємо реологічні рівняння у вигляді:

$$\tau = K_1 \cdot (\gamma)^n \cdot e^{-\beta \frac{T-T_1}{T_1+273}}, \quad (14)$$

або:

$$\tau = K_2 \cdot (\gamma)^n \cdot e^{-\beta \frac{T-T_2}{T_2+273}}, \quad (15)$$

підставляючи отримані з досліду значення  $K$  та  $T_1$  або  $T_2$ , відповідно. Провести аналіз отриманих результатів, відповідно до мети та завдань лабораторної роботи.

## 7 ПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ

1. Проаналізуйте поняття неньютонівська рідина.
2. Які неньютонівські рідини існують?
2. Обґрунтуйте методику визначення величини  $K$ .
3. Обґрунтуйте методику визначення величини  $n$ .
4. Обґрунтуйте необхідність у ротаційному віскозиметрі термостатичного пристрою.



## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Дослідження реологічних властивостей розчину полімерів : метод. вказівки до викон. лабораторної роботи для студентів спеціальності «Обладнання хімічних виробництв і підприємств будівельних матеріалів» (7.090220 і 8.090220) / Укл. : Радченко Л.Б., М. П. Швед, А. Р. Степанюк, І. О. Мікульонок. – К. : НТУУ «КПІ», 2008. – 16 с.
2. Теплофизические и реологические характеристики полимеров : справочник / под ред. Ю. С. Липатова. — К. : Наук. думка, 1977. – 244 с.
3. Пахаренко В. А. Наполненные термопласты : справочник / В. А. Пахаренко, В. Г. Зверлин, Е. М. Кириенко ; под общ. ред. акад. Ю. С. Липатова. — К. : Техніка, 1986. — 182 с.
4. Виноградов Г. В. Реология полимеров / Г. В. Виноградов, А. Я. Малкин. — М. : Химия, 1977. — 440 с.