

Базові знання з віскозиметрії

В'язкість, як фізична величина, дає інформацію про те, наскільки рідина є щільною і наскільки вона вільно тече. З наукової точки зору в'язкість є мірою внутрішнього тертя рідини. Це тертя виникає в рідині внаслідок деформації.

Що таке в'язкість

Для визначення поняття в'язкості необхідним є познайомитись з віскозиметрією - розділом науки, яка називається реологією. Реологія - це наука про поведінку матеріалів при деформації та плинності.

Уявіть собі шкалу, на якій розміщено всі матеріали - від рідкого до твердого. Вчені вважають, що рідким матеріалам притаманна в'язкість, а твердим - пружність. В повсякденному житті ми, частіш за все, зустрічаємо в'язко-пружні матеріали. Це такі матеріали, про які впевнено не можна сказати, чи цей матеріал є рідким, чи твердим. Відповідно до властивостей матеріалу ми класифікуємо його, як в'язко-пружну рідину (шампунь, питний йогурт), або в'язко-пружну тверду речовину (желе).

Віскозиметрія вивчає ідеально в'язкі рідини та, враховуючи деякі обмеження, в'язко-пружні рідини, тобто в'язкі рідини, які містять пружну складову. Рідини, які течуть легко, мають малий опір до деформації. Це є рідини з малою в'язкістю. Рідини з великою в'язкістю, чинять більший опір деформації і тому вони так просто не течуть.

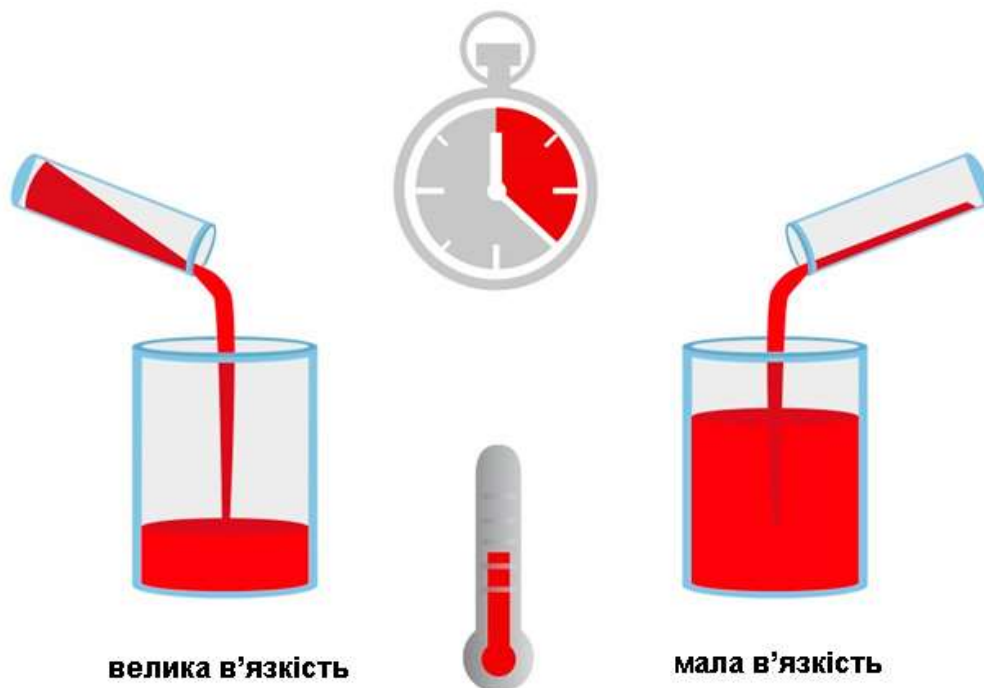


Рисунок 1. Порівняння рідини з великою в'язкістю і рідини з малою в'язкістю. При однаковій температурі ліва рідина тече повільніше, ніж права.

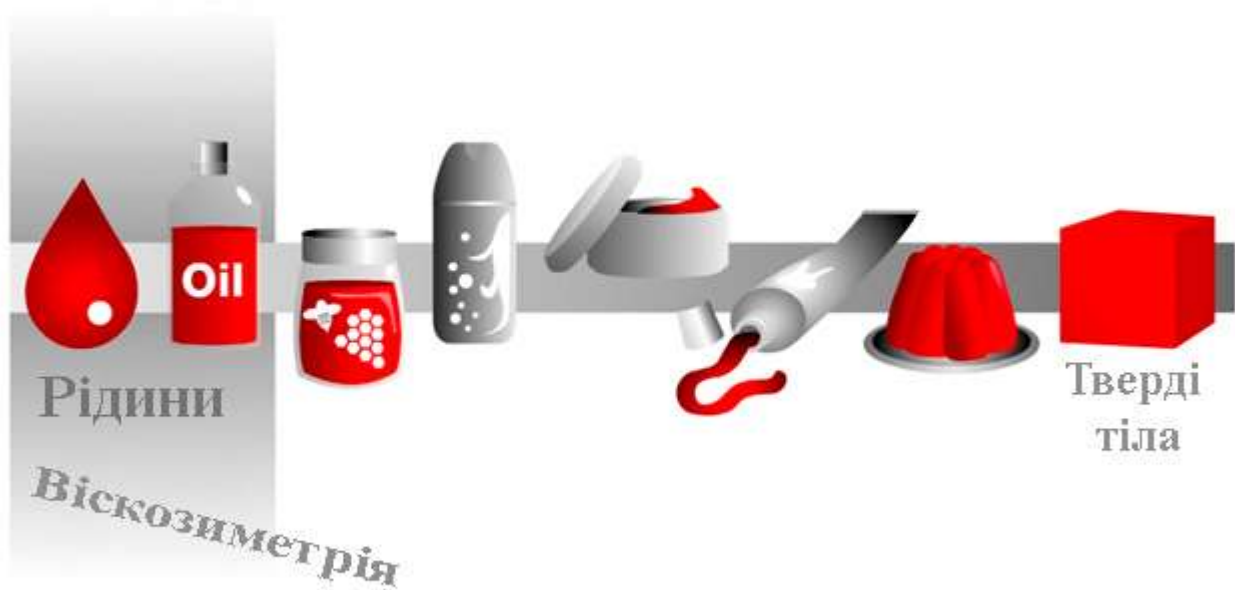


Рисунок 2. Від ідеально в'язкої рідини до твердого тіла. В'язко-пружні речовини в повсякденному житті.

Модель двох пластин

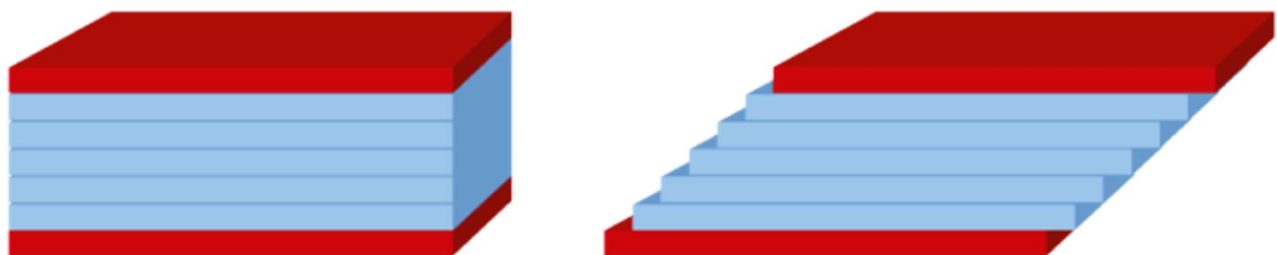


Рисунок 3. Модель двох пластин. Ламінарна течія, яка складається з нескінченно тонких шарів.

Модель двох пластин дає математичний опис в'язкості. Уявіть собі сендвіч^[1]: дві пластини, між якими є рідина. Правильний розрахунок параметрів, які відносяться до в'язкості, залежить від двох критеріїв:

1. Рідина не ковзає по пластинах, але добре контактує з ними. З наукової точки зору рідину та пластини з'єднує сила адгезії.
2. Течія є ламінарною. Це означає, що рідина складається з нескінченно тонких шарів, які не перемішуються. Це можна уявити, як пачку паперу.

Нижня пластина не рухається. Верхня – рухається повільно і піддає рідину напрузі, яка є паралельною поверхні пластини: це є напруження зсуву τ (тау). Сила (F , ньютони), яка прикладена до верхньої пластини, розділена на її площу (A , квадратні метри), називається напруженням зсуву. Сила, розділена на площу, має одиниці вимірювання ньютон на метр квадратний [N/m^2], а по іншому паскаль [Pa] на честь Блейза Паскаля^[2].

$$\tau = \frac{F}{A} \left[\frac{N}{m^2} \right]$$

Рівняння 1. Напруження зсуву.



Рисунок 4. Використання моделі двох пластин для розрахунку напруження зсуву. Напруження зсуву – це сила прикладена до пластини, яка розділена на її площу.

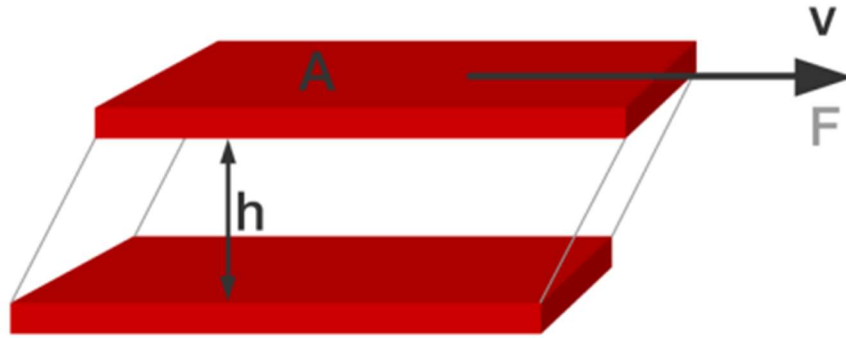


Рисунок 5. Використання моделі двох пластин для розрахунку швидкості зсуву. Швидкість зсуву - це швидкість рухомої пластини (v), розділена на відстань (h) між пластинами.

Модель двох пластин також дозволяє розрахувати інший параметр: швидкість зсуву $\dot{\gamma}$ (гама з крапкою, інше позначення D).

Швидкість зсуву - це швидкість верхньої пластини (v , метри на секунду), яка поділена на відстань між пластинами (h , метри). Одиницею вимірювання є $[1/s]$, або ж обернені секунди $[s^{-1}]$.

$$\dot{\gamma} = (D =) \frac{v}{h} \left[\frac{m}{s \cdot m} \right] \left[\frac{1}{s} \right] = [s^{-1}]$$

Рівняння 2. Швидкість зсуву.

Згідно з законом Ньютона^[3] напруження зсуву (τ) дорівнює добутку в'язкості (η) на швидкість зсуву ($\dot{\gamma}$). Наслідком того є те, що в'язкість η (ета) дорівнює напруженню зсуву, розділеному на швидкість зсуву. Це просте відношення застосовується тільки до ньютонівських рідин.

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma} \rightarrow \eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} [Pa \cdot s] = \left[\frac{Pa}{\frac{1}{s}} \right]$$

Рівняння 3. Переформульований закон Ньютона: динамічна в'язкість дорівнює напруженню зсуву, розділеному на швидкість зсуву.

Що таке ньютонівська рідина?

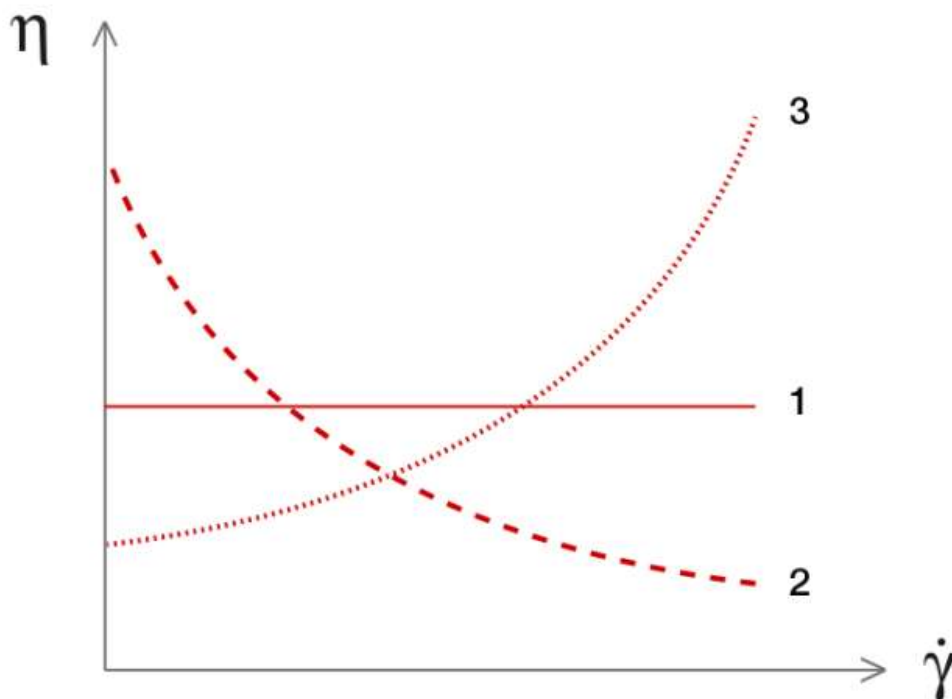


Рисунок 6. Графіки залежностей в'язкості від швидкості зсуву для трьох різних видів рідин: ньютонівської – ідеально в'язкої (1), псевдопластичної (2) та ділатантної (3).

Якщо внутрішній опір рідини (в'язкість) не залежить від зовнішніх сил (напруження зсуву), які діють на рідину, то ця рідина вважається ідеально в'язкою. Такі рідини називають ньютонівськими на честь Ісаака Ньютона.

Графік в'язкості показує залежність в'язкості від швидкості зсуву. Для ньютонівських рідин цей графік є прямою лінією (крива 1), див. рис.6.

Гарним прикладом ньютонівських рідин є вода або соняшникова олія.

Якщо в'язкість змінюється при зміні швидкості зсуву, рідину вже не можна назвати ньютонівською і, в такому разі, потрібно вказувати її уявну (видиму) в'язкість.

Рідини, в'язкість яких залежить від докладеного напруження (зусилля), поведуться по різному: у деяких рідин при збільшенні швидкості зсуву в'язкість зменшується (крива 2), наприклад, таким є йогурт, у інших рідин в'язкість, навпаки, зростає з ростом швидкості зсуву (крива 3), наприклад, таким є крохмаль, який розчинено у воді. Поведінка неньютонівських рідин може бути набагато складнішою, ніж в цих елементарних випадках. Для того, щоб дізнатись більше, Ви можете пройти курс "[The Rheology Handbook](#)"^[4]

Проте, швидкість зсуву це не єдине, що впливає на поведінку рідини. В загальному випадку є три фактори впливу.

Що впливає на поведінку рідини?

1. Внутрішня будова речовини. Речовини з великою в'язкістю складаються з щільно зв'язаних молекул. Завдяки цьому їм легше протидіяти деформації.
2. Швидкість зсуву, або напруження зсуву, в загальному сенсі - зовнішня сила. Ідеться про будь-яку взаємодію, як то: тертя, штовхання, тяга, або ж найрозповсюдженішу взаємодію – силу тяжіння. Вплив залежить від того, скільки сили було докладено і який час вона докладалася.
3. Зовнішні умови: температура та тиск. Ці величини визначають, в яких умовах рідина потече, та тип потоку. Для того, щоб виміряти в'язкість, потрібно, щоб була ламінарна течія.



Рисунок 7. Чинники, які впливають на поведінку рідини: внутрішньомолекулярна будова, зовнішня взаємодія, параметри навколишнього середовища.

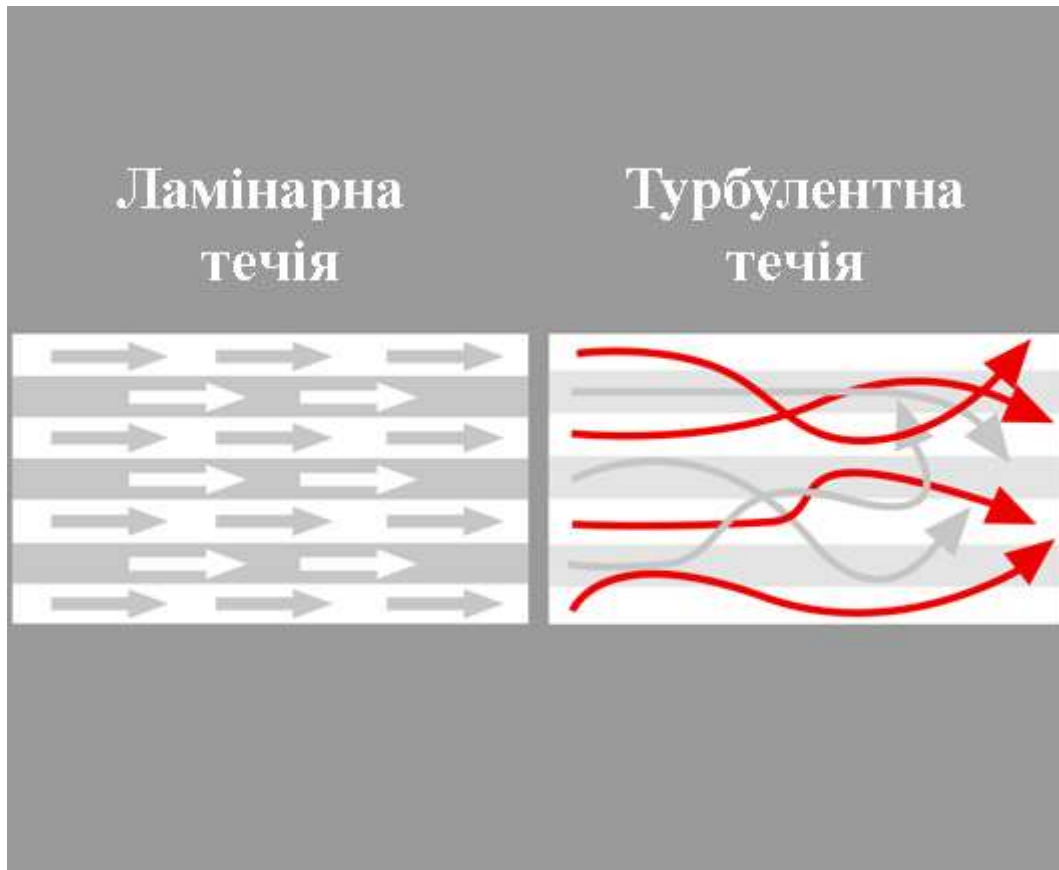


Рисунок 8. У ламінарній течії рідина рухається шарами, які є паралельними до напрямку течії, в той час, як турбулентний потік супроводжується утворенням вихорів.

Ламінарна і турбулентна течії

У ламінарній течії рідина рухається тонкими шарами, які є паралельними до напрямку течії, і молекули не переходять з одного шару в інший.

Потік турбулентної течії є хаотичним, шари перемішуються, є вихри. Це призводить до помилкових результатів під час вимірювання – отримане значення в'язкості виходить більшим, ніж насправді, внаслідок того, що хаотичний рух молекул сприймається приладом, як підвищений внутрішній опір рідини.

Наприклад, якщо під час експерименту на рідину буде діяти занадто велика швидкість зсуву, це може призвести до турбулентних потоків. Наприклад, так може статись, якщо скляний капіляр у віскозиметрі є занадто широким для дослідження обраної рідини (тобто, час протікання рідини є надто коротким), або якщо обертаючий вал ротаційного віскозиметра крутиться занадто швидко.

Температура



Рисунок 9. Зміна в'язкості з температурою.

Крім швидкості зсуву, температура також сильно впливає на в'язкість. В'язкість падає з підвищенням температури і, навпаки, зростає зі зниженням. Таку поведінку в'язкості можна спостерігати у всіх рідинах.

Навіть найменша зміна температури призводить до зміни в'язкості, але для різних рідин в різній мірі. Деякі рідини змінюють свою в'язкість на 10% при зміні температури всього на 1°C, див. рис.9.

Тиск

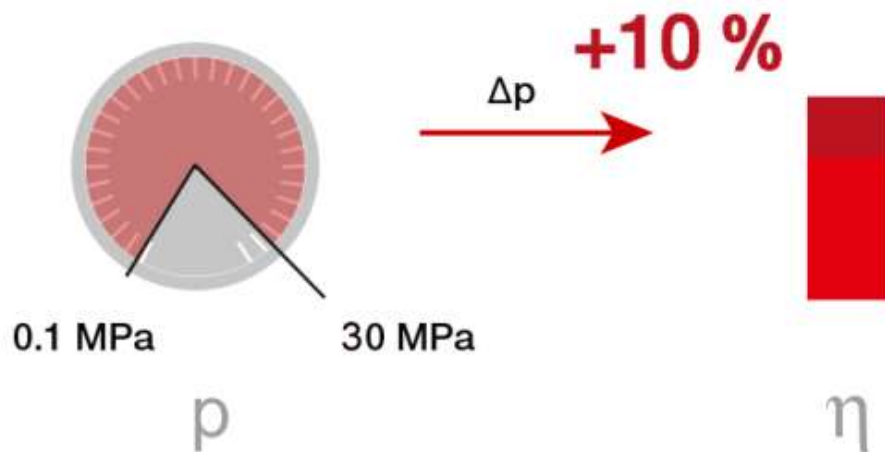


Рисунок 10. Тиск має менший вплив на в'язкість ніж температура. Підвищення тиску в 300 разів змінює в'язкість на 10%.

Зазвичай, підвищення тиску спричиняє підвищення в'язкості^[5]. Але слабка або середня зміна тиску не сильно вплине на рідину: рідини майже не стискаються.

Більшість рідин реагує тільки на значну зміну тиску (від 0.1 МПа до 30 МПа) зміною в'язкості на 10%. Для порівняння, така сама зміна в'язкості є результатом зміни температури всього на 1 К (1°C).

У випадку, коли тиск підвищують від 0.1 МПа до 200 МПа, в'язкість може змінюватись в 3-7 разів. Це стосується більшості низькомолекулярних рідин. Дуже в'язкі високомолекулярні мінеральні масла можуть змінювати свою в'язкість в 20000 разів при тій самій зміні тиску.

В'язкість синтетичних масел може зростати при тій самій зміні тиску в 8 мільйонів разів. Для прикладу, мастило для механізмів на зубчастих колесах або шестернях може піддаватись тиску в 1 GPa і вище.

$$1 \text{ bar} = 0.1 \text{ MPa} = 10^5 \text{ Pa} = 10^5 \text{ N/m}^2$$

Рівняння 4. Перетворення одиниць вимірювання тиску.

В більшості рідин зовнішній тиск зменшує міжмолекулярну відстань, тим самим зменшуючи рухливість молекул, підвищує внутрішнє тертя і, відповідно, в'язкість.

Як себе поводить вода під впливом тиску?

Відомим є факт, що найбільшу густину вода має при +4°C. Ще одним аномальним ефектом є поведінка води під впливом тиску. При температурі >+32°C при збільшенні тиску в'язкість води збільшується. Але при температурі нижче +32°C і тиску нижче 20 МПа, в'язкість води зменшується при збільшенні тиску. Тиск руйнує водневі зв'язки між атомами, що призводить до зменшення в'язкості.

Різні типи в'язкостей

Динамічна в'язкість

Грецьким символом η (ета) позначають динамічну в'язкість (інша назва зсувна в'язкість). Вираз для динамічної в'язкості можна отримати, скориставшись рівнянням Ньютона:

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma} \rightarrow \eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} [\text{Pa} \cdot \text{s}] = \left[\frac{\text{Pa}}{\frac{1}{\text{s}}} \right]$$

Рівняння 5. Закон Ньютона. Вираз для динамічної в'язкості, який отримано з закону Ньютона.

Одиниці вимірювання СІ (International System of Units^[6]):

- [Pa.s.] паскаль – секунда, або [mPa.s] міліпаскаль – секунда. 1 Pa.s = 1000 mPa.s

Інші одиниці вимірювання, які використовуються:

- [P] пуаз, або [cP] сантипуаз (назва в честь Жана Пуазейля^[7]): 1 P = 100 cP
- Співвідношення між одиницями вимірювання: 1 cP = 1 mPa.s

Динамічна в'язкість використовується, переважно, у сфері вивчення і дослідження живих організмів.

Кінематична в'язкість

Кінематична в'язкість ν (ню) враховує вплив гравітації на потік рідини. Динамічна в'язкість, яка розділена на густину ρ (ро), це кінематична в'язкість. Оскільки густина - це маса, яка поділена на об'єм, вплив гравітації враховується через наявність в рівнянні маси.

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \left[\frac{m^2}{s} \right] \quad \rho = \frac{m}{V} \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

Рівняння 6. Кінематична в'язкість – це динамічна в'язкість, яка розділена на густину. Вплив гравітації враховується наявністю маси, яка міститься в рівнянні для густини.

Одиниці вимірювання СІ:

- [m²/s] квадратні метри на секунду, або [mm²/s] квадратні міліметри на секунду
- 1 m²/s = 1 000 000 mm²/s

$$\left[\frac{m^2}{s} \right] = \left[\frac{Pa \cdot s}{\frac{kg}{m^3}} \right] = \left[\frac{\frac{N}{m^2} \cdot s}{\frac{kg}{m^3}} \right]$$

$$[N] = \left[\frac{kg \cdot m}{s^2} \right]$$

$$\left[\frac{m^2}{s} \right] = \left[\frac{kg \cdot m}{s^2 \cdot m^2} \cdot s \cdot \frac{m^3}{kg} \right]$$

Рівняння 7. Одиниці вимірювання кінематичної в'язкості з закону Ньютона.

Інші одиниці вимірювання, які використовуються:

- [St] стокс, або [cSt] сантистокс (назва в честь Джорджа Стокса^[8]).
- 1 St = 100 cSt
- 1 cSt = 1 mm²/s

Кінематична в'язкість широко використовується для опису поведінки нафтохімічних рідин таких, як мастила та палива.

Відносна в'язкість

Відносна в'язкість є дуже важливим параметром при дослідженні полімерних розчинів^[9].

Властивості полімерів напряду залежать від їх молярної маси. Більшість полімерів мають чітко виражений зв'язок між молярною масою і в'язкістю. Отже, замість того, щоб вимірювати молярну масу полімерів, ми можемо виміряти їх в'язкість. Як правило, в'язкість полімерних розчинів збільшується зі збільшенням молярної маси. Більшість полімерних розчинів змінюють свою в'язкість зі збільшенням напруження зсуву (тобто вони є НЕНЬЮТОНІВСЬКИМИ)

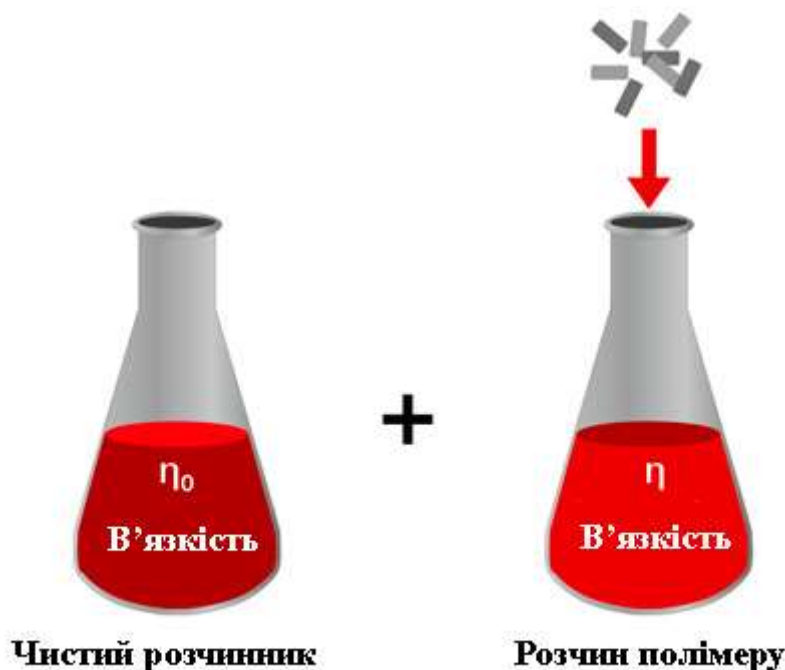


Рисунок 11. Вимірювання в'язкості полімеру в розчині. Спочатку вимірюють в'язкість розчинника окремо, а потім в'язкість певної концентрації полімеру в розчиннику.

Однак, в діапазоні відносно низьких швидкостей зсуву, поведінку полімерних розчинів можна вважати ньютонівською. Відношення в'язкості полімерного розчину до в'язкості розчинника називається відносною в'язкістю. Одиниці вимірювання^[1] відносної в'язкості не мають розмірності.

Відносна в'язкість є основою для розрахунку інших величин, які є дуже важливими при контролі якості полімерів:

$$\eta_r = \frac{\eta}{\eta_0} [1]$$

Рівняння 7. Відносна в'язкість – це в'язкість полімерного розчину, розділена на в'язкість розчинника.

- Логарифмічна в'язкість.
- Питома в'язкість (інкремент (прирощення) відносної в'язкості)
- Приведена в'язкість (число в'язкості VN (viscosity number), або функція Штаудінгера)
- Характеристична, або внутрішня в'язкість. (граничне число в'язкості LVN (limiting viscosity number), або індекс Штаудінгера)
- К-параметр
- Молярна маса (в більшості випадків молярна маса подається в грамах на моль (g/mol); за визначенням молярна маса речовини – це маса, яку розділено на кількість речовини у молях).

Уявна (видима) в'язкість

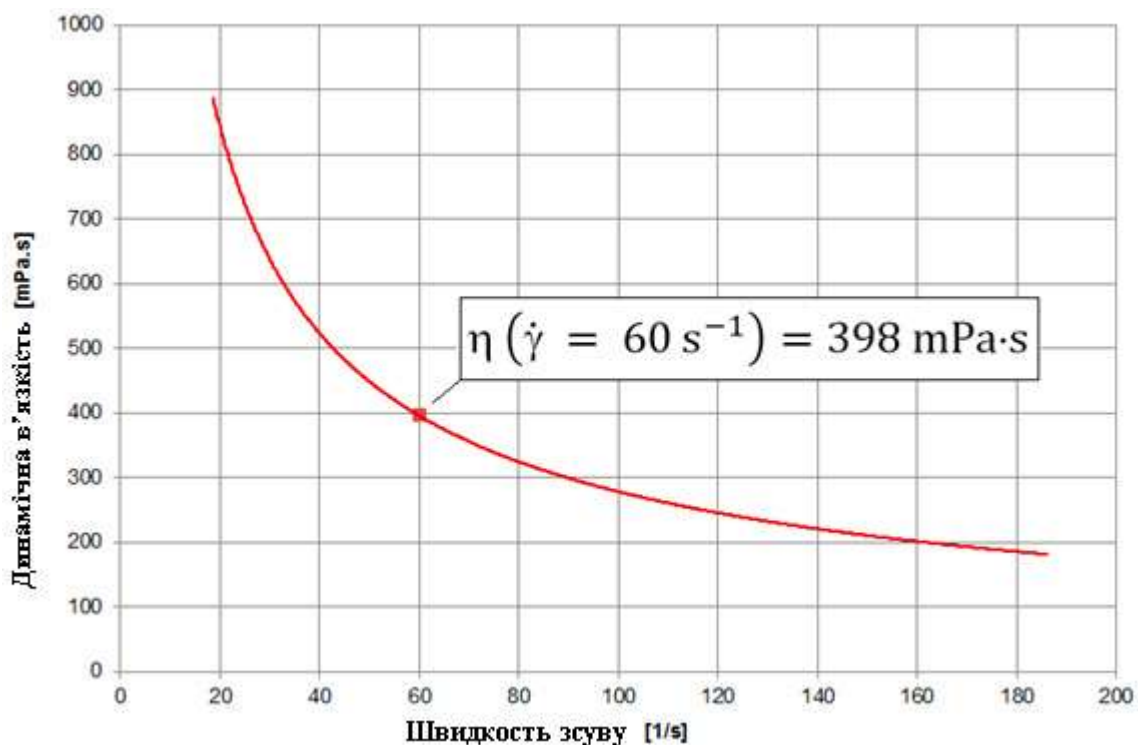


Рисунок 12. Графік в'язкості для псевдопластичної рідини (шампунь). Для прикладу наведено значення уявної в'язкості (398 mPa.s) при заданій швидкості зсуву (60 s⁻¹).

Ідеально в'язкі, по іншому НЬЮТОНІВСЬКІ, рідини не змінюють свою в'язкість при зміні швидкості зсуву. Для неньютонівських рідин в'язкість змінюється при зміні швидкості зсуву. Тому потрібно вказувати для якого значення швидкості зсуву було отримано значення в'язкості. Це значення в'язкості називається уявна в'язкість, або зсувна уявна в'язкість. Кожне значення уявної в'язкості це точка на графіку залежності в'язкості від швидкості зсуву.

Приклад:

$$\eta(\dot{\gamma} = 60s^{-1}) = 398 \text{ mPa} \cdot s$$

Посилання

1. Mezger, T. (2011). The Rheology Handbook. 3rd revised ed. Hanover: Vincentz Network, pp.21-24.
2. Adamson, D. (1995). Blaise Pascal: mathematician, physicist and thinker about God. Basingstoke: Palgrave Macmillan.
3. Newton, I. (1687). Philosophiae naturalis principia mathematica ("Principia"). London.
4. Mezger, T. (2011). The Rheology Handbook. 3rd revised ed. Hanover: Vincentz Network.
5. Mezger, T. (2011). The Rheology Handbook. 3rd revised ed. Hanover: Vincentz Network, pp.85-87.
6. Wikipedia, (2017). International System of Units. [online] Available at: en.wikipedia.org/wiki/International_System_of_Units [Accessed 06 Mar. 2017]
7. Pfitzner, J. (1976), Poiseuille and his law. Anaesthesia, 31: 273–275. doi:10.1111/j.1365-2044.1976.tb11804.x
8. Wilson, D. B. (1987), Kelvin and Stokes: A Comparative Study in Victorian Physics. Bristol: Adam Hilger.
9. Kulicke, W.-M. and Clasen, C. (2004). Viscosimetry of Polymers and Polyelectrolytes. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.

Данна стаття є перекладом на українську оригінальної [статті](https://wiki.anton-paar.com/en/basic-of-viscometry/#c16492)
(<https://wiki.anton-paar.com/en/basic-of-viscometry/#c16492>)

Anton Paar GmbH <https://www.anton-paar.com>

Переклад виконаний співробітниками **Донау ЛАБ УКРАЇНА**
<http://dlu.com.ua> - ексклюзивного дистриб'ютора продукції **Anton Paar GmbH** в Україні та Молдові



03028 Україна, м. Київ,
вул. Стратегічне шосе, 16

<http://dlu.com.ua>

Тел: +38 (044) 229-15-31

Факс: +38 (044) 229-15-30

e-mail: sale@dlu.com.ua