

Як виміряти в'язкість

Принципи, представлені в даній статті, поєднують традиційні підходи з новітніми високотехнологічними.

Гравіметричні капіляри і чашечні віскозиметри

Як видно з їх назви, гравіметричні капіляри, як і чашечні віскозиметри, працюють за рахунок сили тяжіння. Фізична величина, яка вимірюється – це кінематична в'язкість. Чашечні віскозиметри і гравіметричні капіляри можна використовувати тільки для вимірювання в'язкості ідеально в'язких рідин^[1].

Як працює гравіметричний принцип вимірювання?

Треба взяти капіляр з точно визначеними розмірами (внутрішній діаметр, довжина) й так само точно визначеною довжиною відрізка між двома рисками на капілярі. Далі пропускаємо через капіляр відому кількість рідини і вимірюємо час, за який рідина тече від першої риски до другої. Вимірний час є показником в'язкості (внаслідок того, що швидкість потоку залежить від часу перетікання рідини.). Щоб отримати кінематичну в'язкість ν (ню), треба помножити отриманий час течії (t_f) на, так звану, капілярну константу (K_C). Ця константа визначається для кожного капіляра при калібруванні, тобто вимірюванням еталонної рідини з відомою в'язкістю.

$$\nu = K_C \cdot t_f$$

Рівняння 1. Кінематична в'язкість – це час перетікання рідини, помножений на капілярну константу.

Час перетікання рідини по капіляру не повинен бути менший за певне значення для того, щоб потік рідини був ламінарним.

При використанні чашечного віскозиметра працює той самий принцип вимірювання, який було описано вище, але замість точних розмірів капіляру вимірюється об'єм та діаметр отвору чашки. Як правило, рівняння залежності в'язкості від часу потоку емпірично визначається для кожної чашки окремо за допомогою калібрувальних випробувань з еталонними зразками з відомою в'язкістю.

Простота є основною перевагою даного методу, а також причиною, чому він є у багатьох еталонних та стандартизованих методиках. Гравітація, як рушійна сила, є скрізь на Землі безкоштовною. Вона не потребує додаткового технічного обладнання або технічного обслуговування.

З іншого боку, не можна змінити силу, з якою гравітація діє на рідину. Одним з недоліків є те, що сили тяжіння є недостатньою для дослідження рідин з великою в'язкістю. Ще одним недоліком є те, що для вимірювання в широкому діапазоні в'язкості потрібно застосовувати багато капілярів: так як сила не змінюється, то потрібно змінювати діаметр капіляру. Наприклад, капіляр Уббелодє працює в діапазоні від мінімальної в'язкості до значення, яке є більшим в п'ять разів (від 1 мм²/с до 5 мм²/с). Потрібно шістнадцять капілярів Уббелодє для того, щоб покрити діапазон вимірювання від 0.3 мм²/с до 100 000 мм²/с. Капіляр Уббелодє зображено на рис. 2.

Капіляри Уббелодє

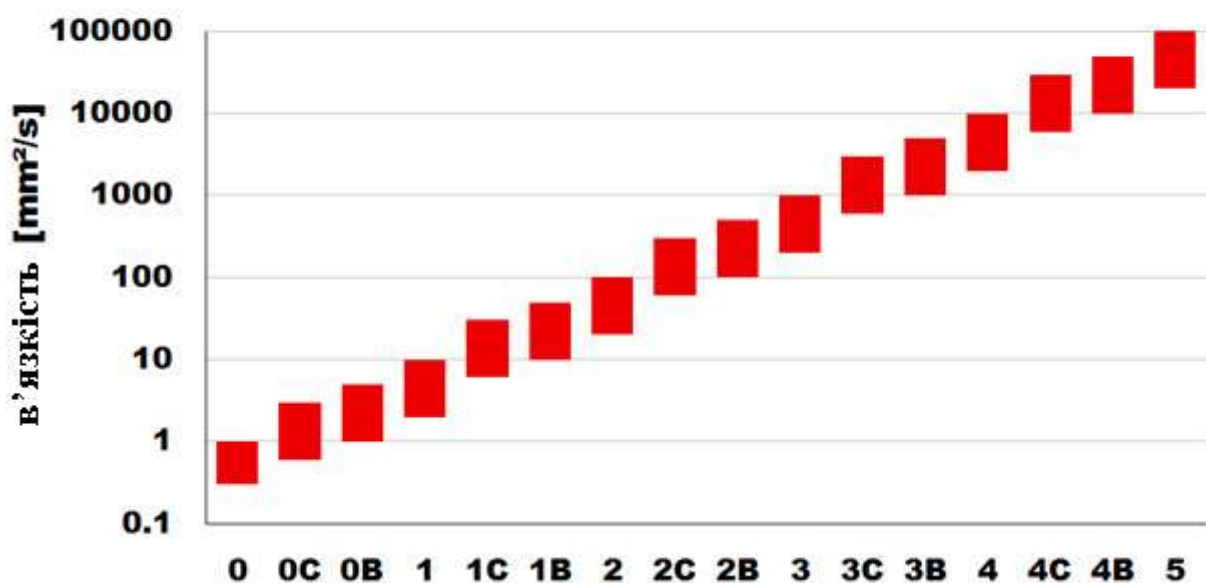


Рисунок 1. Вимірювальний діапазон капілярів Уббелодє в широкому діапазоні в'язкості (логарифмічний масштаб).

Які є типи скляних капілярів

Зазвичай, гравіметричні капіляри виготовляються зі скла. Вони поділяються на капіляри прямого та зворотнього току.

Особливістю капілярів прямого току є те, що резервуар з вимірюваною рідиною в них знаходиться під ризиками на капілярі, в той час, як в капілярах зворотнього току навпаки. Така конструкція капіляру дозволяє вимірювати навіть непрозорі (мутні) рідини, або розчини. В деяких капілярах зворотнього току капіляр містить три ризики. Таким чином, можна отримати два проміжки часу перетікання рідини, що підвищує точність вимірювання.

Типові зразки скляних капілярів

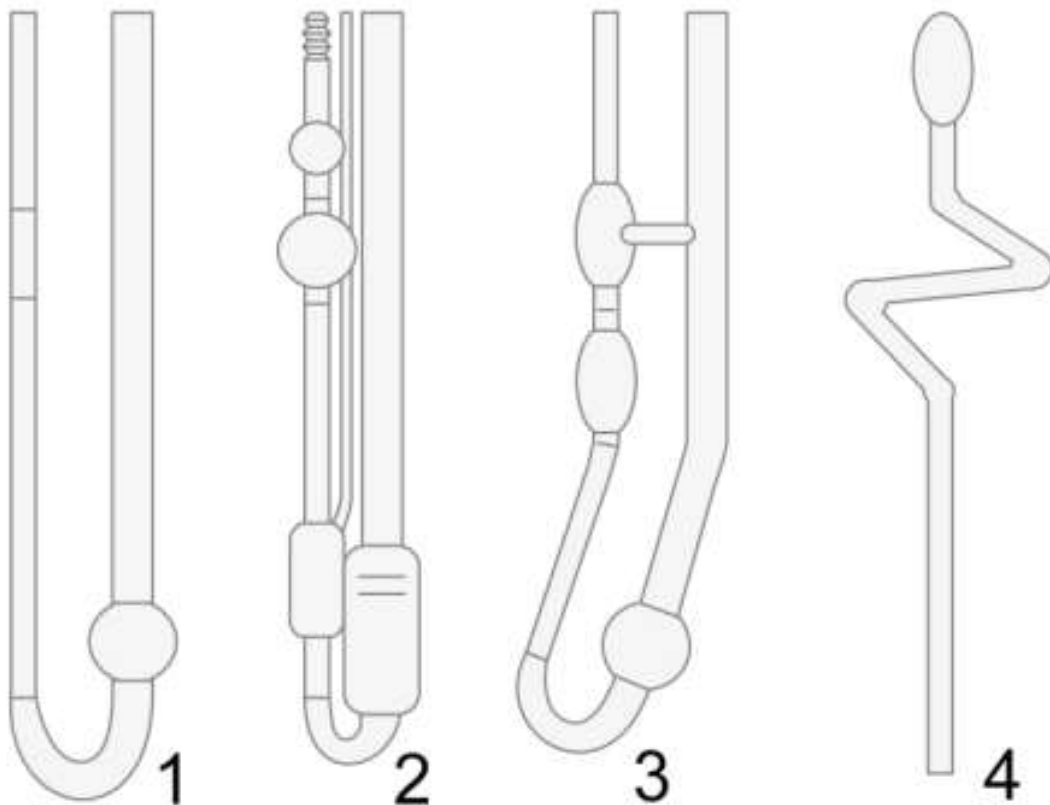


Рисунок 2. Стандартні види скляних капілярів:

1. **капіляр Оствальда** (названий в честь Вільгельма Оствальда (Wilhelm Ostwald), 1853 – 1932, німецького хіміка^[2])
2. **капіляр Уббелодє** (названий в честь Лео Уббелодє (Leo Ubbelohde), 1877 – 1964, німецького хіміка^[3])
3. **капіляр Кенона-Фенскі** (модифікований капіляр Оствальда, розроблений доктором Майклом Кеноном (Dr. Michael R. Cannon), американським вченим, винахідником, педагогом, і Мерреллом Робертом Фенскі (Merrell Robert Fenske), 1904 – 1971^[4])
4. **Гауїлівський капіляр** (Houillon capillary) (стандарт ASTM D7279 описує вимірювання з використанням капіляру цього типу)

Мануальні (ручні) гравіметричні капіляри

При роботі з традиційним скляним капілярним віскозиметром проміжок часу, за який перетікає рідина, вимірюється з використанням секундоміра, що вимагає від оператора повної концентрації та точності у роботі. Крім того, необхідними є й надійні термостати, так само як і належні водяні бані.

Автоматичний гравіметричний капілярний віскозиметр

Для економії робочого часу та матеріальних ресурсів було розроблено автоматичні гравіметричні капілярні віскозиметри. Найсучасніші моделі автоматично заповнюють, вимірюють, чистять і сушать капіляр. Крім того, автоматизація процесу виключає помилки при зчитуванні результату. Більша частина автоматичних капілярних

віскозиметрів має спеціальні капіляри, які працюють з меншим об'ємом вимірюваної речовини, ніж стандартні капіляри, або покривають більший діапазон в'язкості. Хоча ці капіляри не відповідають класичним стандартам, вони мають таку саму точність.

Такі автоматичні віскозиметри, в основному, використовують водяні бані, які іноді поєднуються з термоелектричною системою для контролю температури.

Типи чашечних віскозиметрів

Чашечні віскозиметри використовуються для дослідження всіх видів лакофарбових матеріалів, керамічних суспензій, бурових розчинів і, навіть, рідкого бітуму. Різні чашечні віскозиметри використовуються в різних випадках^[5].

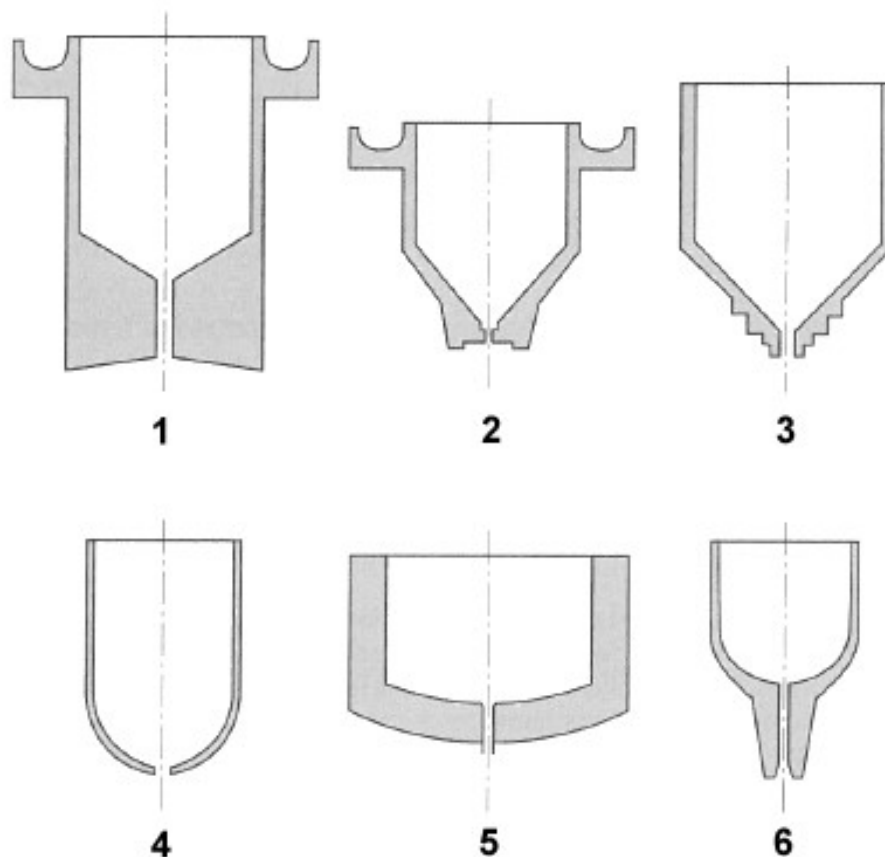


Рисунок 3. Деякі види чашечних віскозиметрів ^[5].

1. ISO 2431
2. DIN 53211
3. Ford
4. Zahn
5. Engler
6. Shell

Капілярні віскозиметри з різницею тисків

Окрім віскозиметрів, в яких рушійною силою є гравітація, використовують віскозиметри, в яких рідина рухається завдяки різниці тисків. Є три різні шляхи створити різницю тисків: вантажем, мотором, або використовуючи тиск газу.^[6]

Капілярні віскозиметри, які використовують вантаж (екструдери).

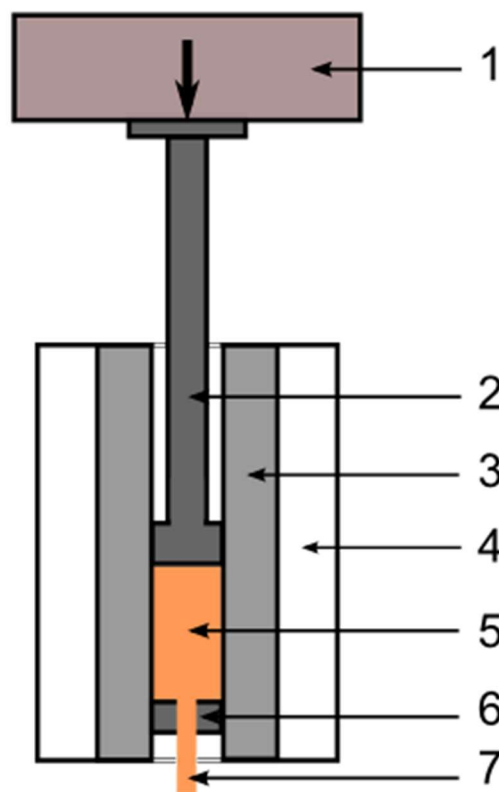


Рисунок 4. Капілярний віскозиметр низького тиску, який використовує вантаж і гравітацію.

1. Вантаж
2. Стальний поршень
3. Стальний циліндр
4. Нагрівач та ізоляція
5. Розплав полімеру
6. Матриця (екструзій на мембрані)
7. Екструдат

Цей тип інструменту, відіграє важливу роль при тестуванні розплавів полімерів. Пристрій вимірює МВР (масова витрата розплаву) в [г/10хв] або ОВР (об'ємна витрата розплаву) в [см³/10хв]. Ці параметри допомагають оцінити якість розплаву та прогнозувати його поведінку при обробці. Отже, інструменти з таким принципом роботи називають МВР або ОВР тестерами.^[6]

Принцип роботи преса

Вантаж заданої маси, який знаходиться на поршні, тисне на нього під дією сили тяжіння. Сталевий поршень ковзає всередині вертикального сталевого циліндру, в якому знаходиться зразок. Потім зразок проходить через матрицю (капіляр) на дні циліндру. Стандарт ISO 1133 визначає розміри циліндру, поршня, матриці, а також вагу вантажу. У таких приладах полімерний зразок піддається впливу середніх зсувних напружень (від 3 кПа до 200 кПа) та середніх швидкостей зсуву (від 2 с^{-1} до 200 с^{-1}).^[6]

Капілярні віскозиметри високого тиску з електроприводом

Віскозиметри такого типу працюють так само, як і прес (див. розділ вище). Однак навантаження замінюється двигуном, який здійснює високе напруження зсуву (до 900 кПа) та середні і високі значення швидкості зсуву (близько 1500 с^{-1}). Типова область застосування - це дослідження високо в'язких речовин, таких як полімерні розплави, ПВХ пластизолі, мастила, герметики, клеї та керамічні маси.^[6]

Капілярні віскозиметри, які використовують тиск газу

В цих пристроях використовується скляний, або сталевий капіляр з точно визначеним внутрішнім діаметром і довжиною. Внутрішній діаметр може мати значення в діапазоні від 0,2 мм до 1 мм, а його довжина коливається від 30 мм до 90 мм. Газ тисне на зразок через капіляр із заданим тиском. Цей метод може працювати в діапазоні швидкостей зсуву до $1\,000\,000 \text{ с}^{-1}$. Значення напруження зсуву, однак, не перевищують середній діапазон (типова величина буде 25 кПа). З характерних розмірів капілярів видно, що такий апарат призначено для дослідження речовин з середньою та низькою в'язкістю: мінеральних масел, паперових покриттів та дисперсій, а також для розчинів полімерів, які використовуються для отримання синтетичних волокон на прядильних машинах.^[6]

Досліджуваний зразок може знаходитися в безпосередньому контакті з газом, або взаємодіяти зі зразком через гнучку мембрану. Наприклад, використовується повітря під тиском, або інертний газ, такий як технічний азот.^[6]

Кулькові віскозиметри падіння і кочення

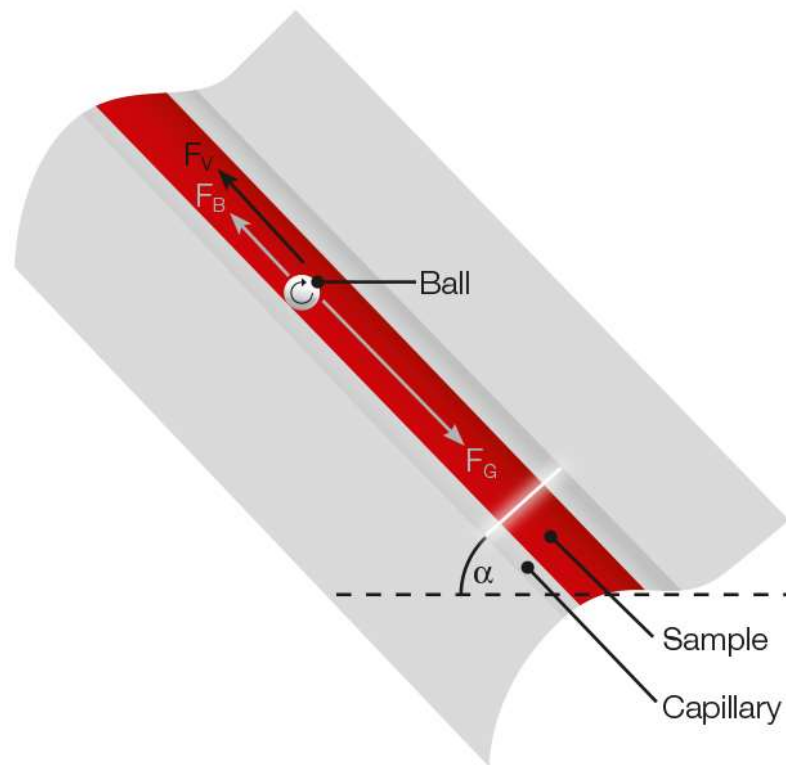


Рисунок 5. Сили, які впливають на кульку, яка котиться в кульковому віскозиметрі.

F_G – Ефективна частина сили тяжіння

F_B – Ефективна частина сили Архімеда

F_V – Сила в'язкості

В кулькових віскозиметрах вимірюється час руху кульки, а не рідини. Кулька рухається завдяки силі тяжіння.

Як працює віскозиметр з кулькою, яка котиться

Кулька відомих розмірів котиться, або падає, в закритому капілярі, який містить досліджувану рідину. Кут, який попередньо задається, визначає нахил капіляру. Час, який потребує кулька, щоб пройти певну відстань у рідині, безпосередньо пов'язано з в'язкістю рідини.

Кут нахилу капіляру дозволяє регулювати швидкість, з якою буде рухатись кулька. Завеликий кут нахилу призводить до занадто високої швидкості кочення кульки, що в свою чергу, призводить до турбулентного потоку і недійсних результатів.

Іншими, не описаними вище силами можна знехтувати за умови наявності ламінарного потоку. Ефективна частина сили тяжіння, яка залежить від кута, тягне

м'яч донизу. В протилежному напрямку діє сила Архімеда і в'язкі сили рідини. Наслідком цього є те, що при однакових кутах нахилу, час, який кулька котиться, збільшується зі збільшенням в'язкості зразка.

Ці три сили визначають рівняння в'язкості:

$$\eta = K \cdot (\rho_b - \rho_s) \cdot t_r$$

Рівняння 2. Динамічна в'язкість визначається як час, який котиться кулька, помножений на різницю між густиною кульки і густиною зразка, і помножений на константу пропорційності.

η ... динамічна в'язкість [мПа·с]

K ... константа пропорційності [1]

ρ_b ... густина кульки [г/см³]

ρ_s ... густина зразка [г/см³]

t_r ... час кочення кульки [с]

$$F_G = m \cdot g = \rho \cdot V \cdot g$$

Рівняння 3. Вплив гравітації на кульку в залежності від її густини і об'єму.

m ... маса [кг]

g ... прискорення вільного падіння [м/с²]

ρ ... густина [кг/м³]

Густина кульки відіграє важливу роль, оскільки вона входить до виразу сили тяжіння (див. Рівняння 3). Замінюючи щільність рідини щільністю кульки у рівнянні 3, отримуємо вираз для сили Архімеда. Отже, для розрахунку в'язкості необхідними є обидва значення густин (ρ_b , ρ_s). Значення константи пропорційності (K) визначається калібруванням.

Типи кулькових віскозиметрів падіння і кочення

Кулькові віскозиметри кочення працюють при кутах нахилу від 10° до 80°. Якщо кут нахилу перевищує 80° – це кульковий віскозиметр падіння. Винятком із цього правила є віскозиметр Гуплера: в ньому кулька падає, але кут нахилу складає рівно 80°.

Принцип Гуплера (Fritz Höppler, 1897 – 1955 рр. Німецький хімік, який розробив цей кульковий віскозиметр падіння в 1933 р.^[1]) відповідає стандартам DIN 53015 та ISO 12058. Контроль температури здійснюється через термостат з рідиною, а оператор вручну здійснює вимірювання і прибирання капілярів.

Деякі віскозиметри використовують не кульки, а інші предмети, які падають, наприклад стрижні або голки. Початковий принцип також змінено: так званий бульбашковий віскозиметр вимірює час, за який, повітряна бульбашка піднімається в рідині. Коливальний поршневий віскозиметр ASTM D7483 замість сили тяжіння, як рушійної сили, використовує електромагнітну силу, яка тягне намагнічений циліндр через рідину.

Кульковий мікровіскозиметр кочення

Кульковий мікровіскозиметр кочення реалізує розвинутий принцип Гуплера. В пристроях такого типу замість звичайних капілярів використовують набагато менші мікрокапіляри, зменшуючи необхідну кількість об'єму зразка. Залежно від в'язкості зразка, об'єм наповнення капіляру може бути навіть 100 мкл. Мікрокапіляри виготовляють зі скла або з ПТФХЕ (політрифторхлоретилен), що дозволяє проводити тестування рідин, які спричиняють корозію скла. Індуктивні датчики реєструють час кочення, а термоелектричний контроль температури та регулювання кутів нахилу роблять прилад більш гнучким у використанні.

Загалом, мікровіскозиметр добре підходить для вимірювання рідин з низькою в'язкістю.

Ротаційні віскозиметри

Ротаційні віскозиметри мають більшу верхню межу вимірювання в'язкості ніж пристрої, які базуються на гравітаційному принципі. Вони використовують моторний привід, який є значно сильнішим за гравітаційну силу Землі. Тому вони підходять для вимірювання речовин з більшою в'язкістю. Величина, яка отримується при вимірюванні – це динамічна в'язкість, яка іноді також називається зсувною в'язкістю.

В основному, типовий ротаційний віскозиметр – це резервуар, який містить зразок; в резервуар зі зразком вміщують, так званий, вимірювальний вал. Залежно від того, що обертається, резервуар чи вал, існують два принципи:

- принцип Куетта (Couette)
- принцип Ширля (Searle)

Як працюють ротаційні принципи (Куетта і Ширля)

Принцип Ширля

Мотор обертає вал всередині зафіксованого резервуару. Швидкість обертання валу попередньо задається, до мотору докладається певний момент сили, який є необхідним для обертання вимірювального валу. Момент сили, якого достатньо для того, щоб компенсувати сили в'язкості досліджуваної речовини, є мірою її в'язкості. При дослідженні рідин з низькою в'язкістю надмірна швидкість обертання може спричинити турбулентний потік як результат впливу відцентрової сили та інерції.

Більшість комерційних ротаційних віскозиметрів використовують саме цей принцип, який названо на честь Д.Ф.Ч. Ширля (Джорджа Фредеріка Чарльза Ширля, 1864 – 1954 рр., Британського фізика і вчителя, який розробив ротаційний віскозиметр з обертовим концентричним внутрішнім циліндром 1912 р. [\[8\]](#)).

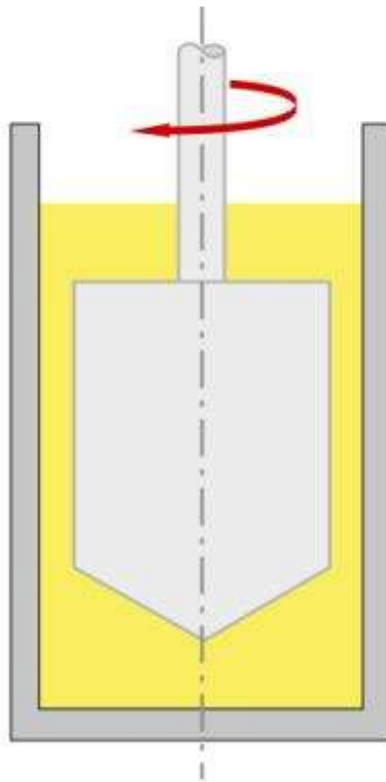


Рисунок 6. Принцип Ширля: мотор крутить вимірювальний вал всередині нерухомого резервуара зі зразком.

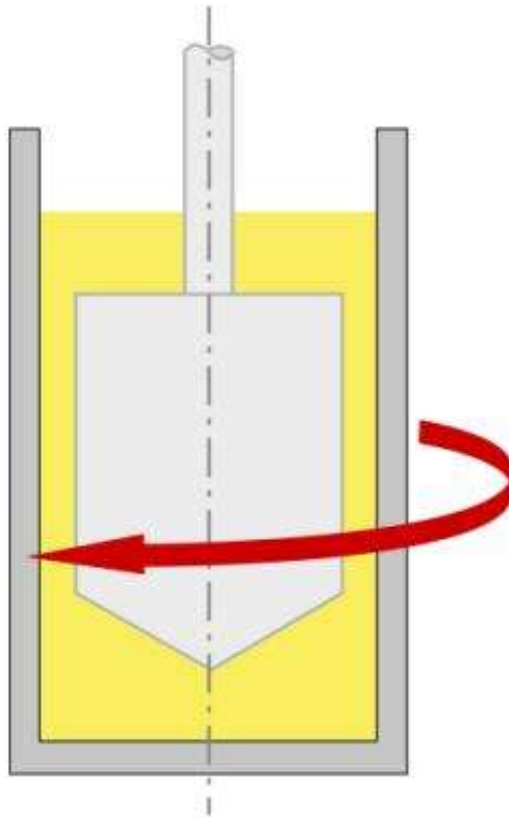


Рисунок 7. Принцип Куетта: мотор крутить посудину зі зразком навколо вимірювального валу.

Принцип Куетта

При вимірюванні в'язкості за допомогою цього принципу, обертається резервуар з досліджуваною рідиною, а вимірювальний вал залишається нерухомим.

Використання такого принципу вимірювання мінімізує ризик виникнення турбулентного потоку. Основне питання при використанні цього принципу вимірювання – це те, як реалізувати обертання резервуару: вал, який обертає резервуар, повинен бути герметичним, так як він використовується для контролю температури (якщо це потрібно). Через ці труднощі на ринку існує лише декілька інструментів з принципом роботи Куетта.

М.М.А. Куетт назвав вищеописаний принцип на свою честь. (Моріс Марія Альфред Куетт, 1858 – 1943р., Французький фізик, який винайшов віскозиметр “drag-flow” в 1888р.^[9])

Фізичні основи принципу Ширля

Мотор повертає вимірювальний вал або шпindel в резервуарі з досліджуваною рідиною. Швидкість обертання вимірювального вала є попередь заданою, при цьому вимірюється момент сили, який потрібно надати вимірювальному валу для протидії силі в'язкості вимірюваного зразка.

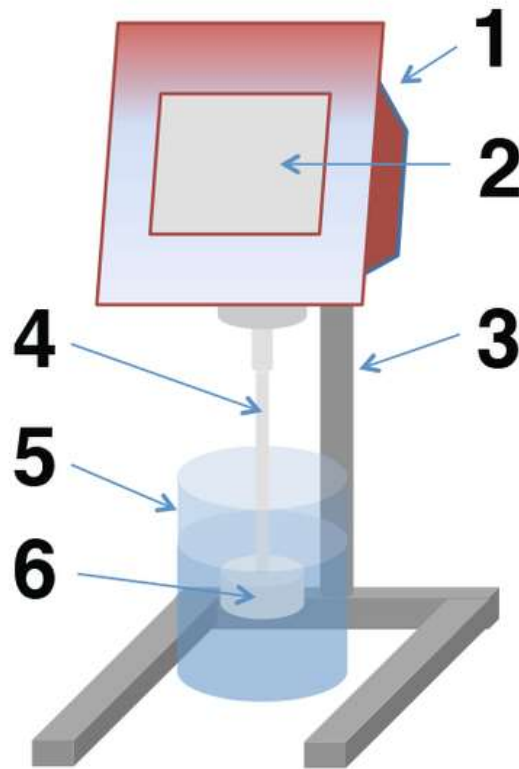


Рисунок 8. Ротаційний віскозиметр, який працює за принципом Ширля.

1. ... Мотор та комп'ютер
2. ... Екран інтерфейсу
3. ... Тримач
4. ... Шпindel/вісь вимірювального вала
5. ... Резервуар зі зразком
6. ... Вимірювальний шпindel/вал (ротор)

Типи ротаційних віскозиметрів

Крім того, що є два принципи вимірювання за допомогою ротаційних віскозиметрів, існує велике різноманіття конструкцій вимірювальних валів. Це різноманіття виникає з великої кількості різних напрямків застосування і діапазонів в'язкості від 1 мПа·с до 4 000 000 мПа·с. Деякі системи навіть підходять для тестування неоднорідних зразків, таких як арахісове масло, йогурти, які містять шматочки фруктів, або будівельні матеріали.

Детальніше про це написано в параграфі «Вимірювальні вали для ротаційних віскозиметрів»

Можна ще більше урізноманітнити типи обертальних приладів шляхом поділу за принципом вимірювання моменту сили:

- Прилади з пружиною
- Прилади з сервомотором

Прилади з пружинами

Прилади з пружиною мають центральну вісь, яка складається з двох частин і є закріпленою на спіральній пружині та опорі. Як правило, використовується кроковий електродвигун, який крутить верхню частину центральної осі. До неї прикріплено один кінець спіральної пружини. Інший кінець пружини приєднується до осі зі сторони обертального валу. Опора використовується для того, щоб стабілізувати конструкцію. Одна частина опори також прикріплена до осі двигуна, а інша її частина прикріплена до вимірювального валу. Для того, щоб мінімізувати тертя, центральна вісь спирається лише на одну точку. Обертання вимірювального валу розтягує пружину пропорційно моменту сили, що відповідає в'язкості зразка. Два оптичних датчика визначають відхилення, використовуючи щілинні диски. На рисунку 8 частини, які приєднуються до двигуна, зафарбовані блакитним кольором, а частини які приєднуються до вимірювального валу зафарбовані світло-коричневим кольором.

У випадку речовин з малою в'язкістю, пружина повинна бути достатньо чутливою, тоді як для зразків з великою в'язкістю треба використовувати більш жорстку пружину. Отже, той самий апарат не може вимірювати в широкому діапазоні в'язкості. Однак, описані вище пружинні системи, є дуже чутливими до малих значень моменту сили.

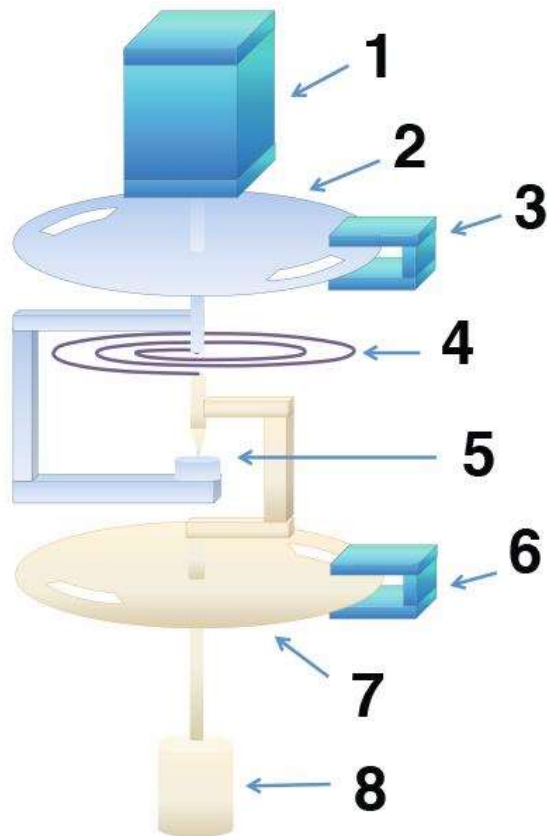


Рисунок 9. Пружинний віскозиметр: спіральна пружина приєднується, з одного боку, до мотору, а з іншого, до вимірювального валу, який визначає момент сили, створюваний мотором; момент сили є мірою в'язкості.

- 1 ... Мотор
- 2 ... Диск, насаджений на центральну вісь. Відноситься до мотору
- 3 ... Датчик положення. Відноситься до мотору
- 4 ... Спіральна пружина
- 5 ... Опора
- 6 ... Датчик положення. Відноситься до вимірювального валу
- 7 ... Диск, насаджений на центральну вісь. Відноситься до вимірювального валу
- 8 ... Вимірювальний вал, який обертається

Прилади з сервомотором

Цей тип приладів оснащено сервомотором і шифратором з високою роздільною здатністю. Мотор обертає центральну вісь, до якої приєднано вимірювальний вал. Шифратор вимірює швидкість обертання. Отриманий момент сили мотора є зв'язаним з силою в'язкості досліджуваного зразка. Через те, що струм двигуна є пропорційним моменту сили який він спричиняє, в'язкість розраховується, використовуючи струм і швидкість обертання мотора.

Такі прилади не обмежуються механічними властивостями пружини. Шифратор і мотор можуть працювати в ширшому діапазоні швидкостей і моментів сили, а, відповідно, і в більшому діапазоні в'язкості, ніж пружинні віскозиметри. Жорстко закріплена вісь обертання робить прилади з сервомотором більш надійними. З іншої сторони, сили тертя в моторі і в підшипниках зменшують точність вимірювання, особливо для рідин з малою в'язкістю або при низьких швидкостях.

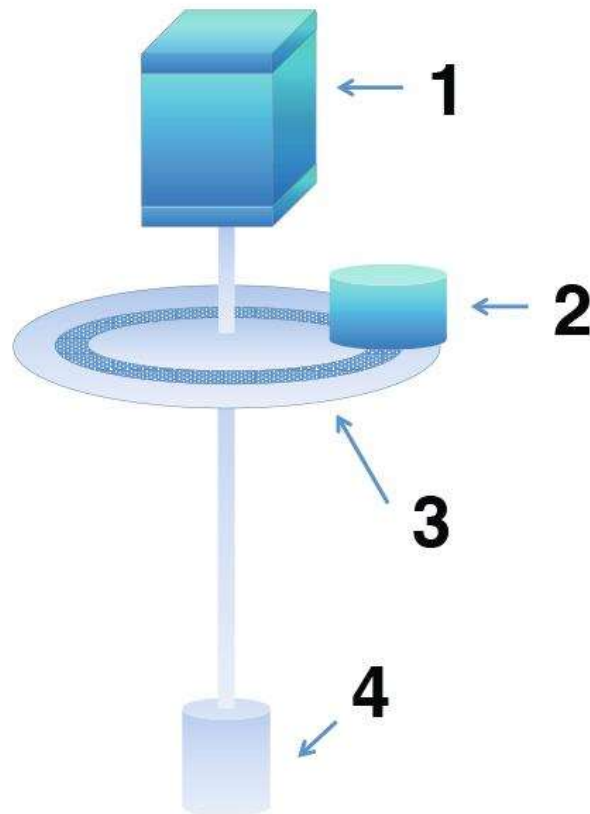


Рисунок 10. Віскозиметр з сервомотором: струм мотора є пропорційним до моменту сили, яку створює мотор; момент сили є мірою в'язкості досліджуваного зразка.

- 1 ... Сервомотор забезпечує дуже точне вимірювання струму мотора
- 2 ... Датчик кута повороту з високою роздільною здатністю вимірює швидкість обертання
- 3 ... Диск
- 4 ... Вимірювальний вал, який обертається

Вимірювальні вали для ротаційних віскозиметрів

Існує велике різноманіття вимірювальних валів для дослідження різних речовин. В цілому, відношення між в'язкістю зразка і розміром вимірювального валу є обернено пропорційним: чим менша в'язкість досліджуваної рідини, тим більший вимірювальний вал треба використовувати. Проте, більшість вимірювальних валів не мають визначеної форми, що робить результати вимірювання відносними^[10] і

ускладнює порівняння різних результатів. Також неможливо обчислити швидкість зсуву та напруження зсуву.



Рисунок 11. Діскові шпинделі, які використовуються в ротаційних віскозиметрах.



Рисунок 12. Циліндричні шпинделі, які використовуються в ротаційних віскозиметрах.

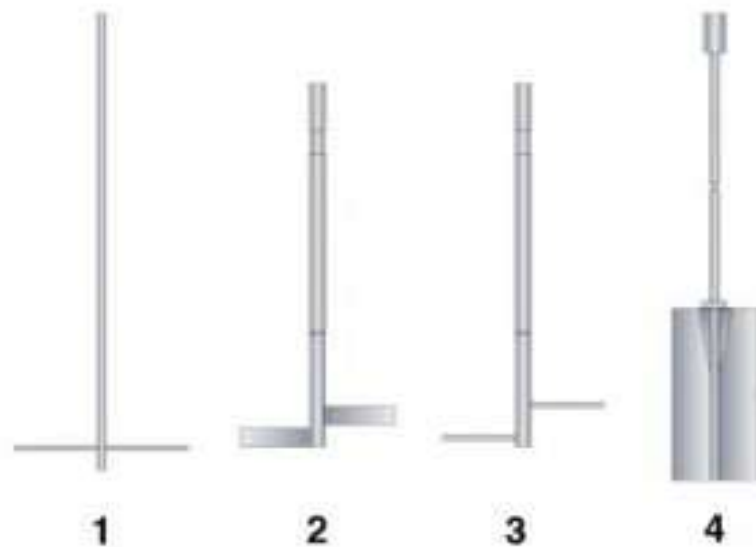


Рисунок 13. Шпинделі особливої форми, які використовуються в ротаційних віскозиметрах.

1. Т-подібний шпindel для речовин схожих за властивостями на пасту
2. Шпindel Кребса, який використовується для дослідження фарб і лакофарбових речовин^[11]
3. Шпindel для пасти
4. Шпindel з лопостями для гель-подібних структур, які є дуже чутливими до напружень (молочні десерти і соуси)^[12]

Вимірювальні системи, в яких використовуються коаксіальні циліндри

Системи з коаксіальними (концентричними) циліндрами є абсолютними вимірювальні системи, які також відповідають стандартам DIN та ISO. В основному, в системах такого типу використовуються спеціальні насадки для ротаційних віскозиметрів. Зазвичай, такі насадки призначені для дослідження малого об'єму речовини і мають систему контролю температури. Так як геометрія вимірювального валу і геометрія резервуару є точно визначеними, це дозволяє оператору розрахувати швидкість зсуву і напруження зсуву, а отже і абсолютне значення в'язкості^[10].

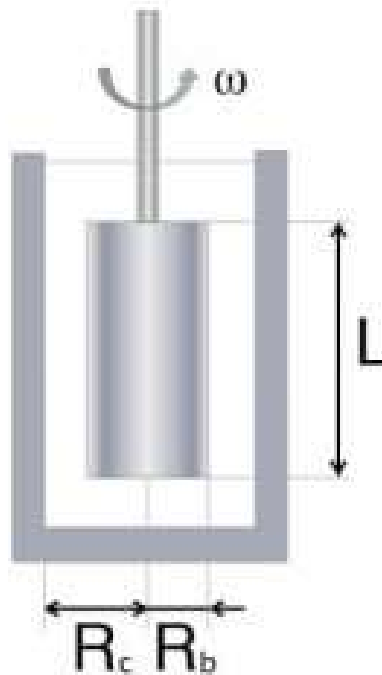


Рисунок 14. Геометрія коаксіальних циліндрів, яка використовується в ротаційному віскозиметрі. Точно визначені розміри дозволяють розрахувати швидкість зсуву, напруження зсуву та абсолютну динамічну в'язкість.

R_c ... Радіус резервуару [м]

R_b ... Радіус вимірювального валу [м]

L ... Довжина вимірювального валу [м]

$\dot{\gamma}$... Швидкість зсуву [s^{-1}]

ω ... Кутова швидкість [рад/с]

τ ... Напруження зсуву [N/m^2]

M ... Момент сили [Н·м]

η ... Динамічна в'язкість [Па·с]

$$\dot{\gamma} = \frac{2 \cdot \omega \cdot R_c^2}{(R_c^2 - R_b^2)}$$

Рівняння 4. Швидкість зсуву в системі коаксіальних циліндрів.

$$\tau = \frac{M}{2 \cdot \pi \cdot R_b^2 \cdot L}$$

Рівняння 5. Напруження зсуву в системі коаксіальних циліндрів.

Рівняння швидкості зсуву на поверхні вимірювального валу містить такі величини: розміри валу та резервуару, й швидкість обертання (кутову швидкість). Напруження зсуву залежить від моменту сили, радіусу та довжини вимірювального валу.

Відповідно до закону Ньютона^[13], ці параметри визначають динамічну в'язкість.

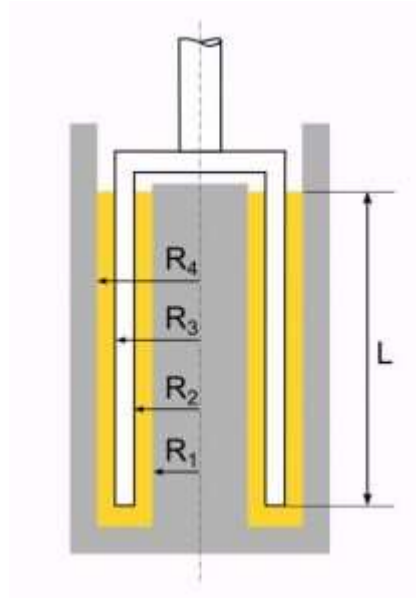


Рисунок 14. Геометрія роздвоєного циліндру, яка використана в ротачіонному віскозиметрі. Пристрій призначено для вимірювання рідин з малою в'язкістю.

Системи з подвійним циліндром

Системи з подвійним циліндром^[14], це особлива форма концентричних циліндрів, які спеціально розроблено для вимірювання рідин з малою в'язкістю.

Резервуар є не порожнім циліндром, як і вимірювальний вал не є однією цілісною деталлю. Другий циліндр поміщають у центр резервуару, а вимірювальний вал має форму циліндру, який обертається в об'ємі між зовнішньою та внутрішньою стінками резервуару. Ця конструкція максимізує поверхню вимірювального валу, яка контактує зі зразком, що дає більшу площу, на яку діють зсувні сили, ніж у стандартних циліндричних системах. Тому, ця система здатна вимірювати низькі значення моменту сили, створені зразками з малою в'язкістю.

Стандартом DIN 54453 (не дійсно) встановлено наступні розміри системи:

$$R_4/R_3 = R_2/R_1 \leq 1.15 \dots \text{ відношення радіусів}$$

$$L \geq 3 \cdot R_3; L \dots \text{ занурена частина вимірювального валу}$$

Вимірювальні системи конус-пластина та паралелі пластини

Системи конус-пластина та паралельні пластини^[15], під час тесту, взаємодіють зі зразком тільки у визначеному об'ємі між зафіксованою пластиною, та вимірювальним валом. Вимірювальний вал може мати форму конуса або пластини. Такі системи виконані з дотриманням стандартів (наприклад, ISO 3219|1993 для системи конус-пластина та ISO 6721-10|1999 для паралельних пластин), які точно встановлюють затверджену геометрію. Для конусів рекомендується кут 1° , але дозволяється використовувати кути $< 4^\circ$. Радіус конуса має бути в діапазоні 10мм-100мм. Паралельні пластини потребують відношення $H \ll R$. Таким чином, в залежності від радіусу пластини та кількості досліджуваного зразка, H може мати значення в діапазоні 0.5мм-3мм. Через те, що між вимірювальним валом і стінками резервуару місця небагато, для дослідження потребує невеликої кількості зразка. Але, простір по боках є відкритим, відповідно досліджуваний зразок може витікати, особливо при високих швидкостях обертання, коли може виникають турбулентні течії або відцентрові сили.

Клиноподібний простір між валом і пластиною призводить до того, що на досліджуваний зразок впливає стала швидкість зсуву по всьому об'єму – це значна перевага, яка дозволяє вимірювати значення абсолютної в'язкості.

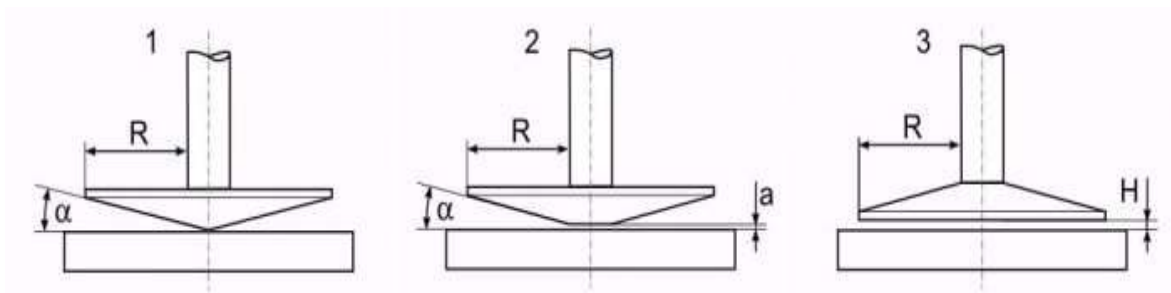


Рисунок 16. Геометрія, яка використовується у ротаційних віскозиметрах конус - пластина та паралельні пластини.

- 1 ... Система конус-пластина, радіус R та кут конуса α
- 2 ... Система конус-пластина з обрізаним конусом, радіус конуса R , кут конуса α , відстань між конусом і пластиною a
- 3 ... Система з паралельними пластинами, радіус R , відстань між пластинами H

Обрізаний конус має таку назву тому що, він виглядає ніби звичайний конус, якому зрізали верхівку. Звичайно, геометрія такого конуса виконана з дотриманням суворих технічних умов. Відстань між конусом і пластиною, як правило, знаходиться в діапазоні від 50мкм до 210мкм. Відсутність наконечника конуса, дозволяє уникнути його стирання об пластину і усуває тертя між конусом і пластиною. Обидва цих фактори можуть негативно вплинути на результати вимірювання: перший, змінюючи геометрію системи з часом, а другий – шляхом внесення неточності у значення вимірюваного моменту сили. Додатковою перевагою є те, що в системі з обрізаним

циліндром, можна досліджувати навіть матеріали з частинками, за умови, що частинки за розміром не більше однієї п'ятої відстані між конусом і пластиною.

Системи конус-пластина та паралельні пластини також підходять для осциляційних (коливальних) реологічних досліджень.

Віскозиметр Штабінгера™ (Stabinger Viscometer™)

Вперше представлений у 2001 році, віскозиметр Штабінгера™ є відносно новим приладом. Він поєднує в собі можливість дослідження у широкому діапазоні з максимумом точності. Стандарт ASTM D7042 встановлює, що цей віскозиметр визначає кінематичну в'язкість з точністю рівною традиційним гравіметричним капілярам.

Як працює віскозиметр Штабінгера™.

Віскозиметр Штабінгера™ використовує модифікований принцип Куетта. Замість резервуару, що повертається, тут використовується невелика трубка, яка містить зразок, тоді як вимірювальний вал замінюється порожнистим, вільно плаваючим ротором. Вся система розташована в мідному блоці з контрольованою температурою, що забезпечує стаціонарний стан системи. Двигун крутить трубку з постійною швидкістю. Коли зразок рухається разом з оточуючою трубою, в'язкі сили зразка зрушують плаваючий ротор. Поєднання гідродинамічного змащування^[16] та впливу відцентрових сил штовхає ротор в центр досліджуваного зразка. В роторі знаходиться невеликий постійний магніт, який генерує оберতальне магнітне поле. Будь-яке змінне магнітне поле в електропровідному матеріалі, такому як мідь, індукує вихрові струми, протилежні за напрямком тим, які їх ініціювали. Цей ефект сповільнює обертання, тоді як сили зразка прискорюють його. Рівноважна швидкість обертання буде індикатором динамічної в'язкості. Корекція виміряного значення в'язкості проводиться в результаті попереднього налаштування інструменту з використанням еталонних стандартів.

Магніт всередині ротора додатково служить для вимірювання швидкості ротора за допомогою датчика Хола.

Технологія безконтактного датчика разом з ротором без тертя дозволяє проводити вимірювання у великому діапазоні: від 0,2 мПа·с до 30 000 мПа·с та спричиняє надзвичайно велику роздільну здатність моменту сили: 50 пН·м.

Багато галузей, наприклад нафтохімічна промисловість, традиційно працює з кінематичною в'язкістю. Тому високоточна комірка, яка вимірює густину й складається з металевого осцилятора U-tube^[17], також є частиною віскозиметра Штабінгера™. З одночасно виміряних густини та динамічної в'язкості прилад розраховує кінематичну в'язкість.

Розширена інформація

Чим менша в'язкість рідини, тим повільніше обертається ротор і тим більша різниця швидкостей між ротором і трубкою: при малій в'язкості зразка сила в'язкості слабо передає задану швидкість трубки ротору. З математичної точки зору, динамічна в'язкість обернено пропорційна різниці швидкостей трубки (n_2) і ротора (n_1).

$$\eta \sim \frac{1}{n_2 - n_1}$$

Рівняння 6. Динамічна в'язкість обернено пропорційна різниці швидкостей трубки та ротора.

Для сталої швидкості ротора його момент сили повинен дорівнювати гальмівному моменту.

$$\begin{aligned}M_D &= M_R \\M_D &= K_1 \cdot \eta \cdot (n_2 - n_1) \\M_R &= K_2 \cdot n_1 \\ \eta &= \frac{K}{\frac{n_2}{n_1} - 1} = \frac{K}{\frac{n_2 - n_1}{n_1}} \rightarrow K = \frac{K_2}{K_1}\end{aligned}$$

M_D ... момент сили ротора

M_R ... гальмівний момент сили

n_1 ... швидкість ротора

n_2 ... швидкість трубки

K_1, K_2, K ... сталі; K визначається під час калібровки

Рівняння 7-10 Момент сили (сили в'язкості) дорівнює гальмівному моменту сили (електромагнітні сили).

Посилання

1. Mezger, T. (2011). The Rheology Handbook. 3rd revised ed. Hanover: Vincentz Network, p.296, p.315.

2. Wikipedia, (2017). Wilhelm Ostwald. [online] Available at: en.wikipedia.org/wiki/Wilhelm_Ostwald [Accessed 14 June 2017]
3. Wikipedia, (2017). Leo Ubbelohde. [online] Available at: en.wikipedia.org/wiki/Leo_Ubbelohde [Accessed 14 June 2017]
4. Palladino, N.J. (1979). Memorial Tributes. Volume 1. Washington, DC: The National Academy of Engineering, The National Academies Press, pp.50-54.
5. Mezger, T. (2011). The Rheology Handbook. 3rd revised ed. Hanover: Vincentz Network, p.296, pp.310-315.
6. Mezger, T. (2011). The Rheology Handbook. 3rd revised ed. Hanover: Vincentz Network, pp.324-334.
7. Wikipedia, (2017). Fritz Höppler. [online] Available at: de.wikipedia.org/wiki/Fritz_Höppler [Accessed 14 June 2017]
8. Thomson, G. (1955). George Frederick Charles Searle 1864-1954. Biographical Memoirs of Fellows of the Royal Society, 246-252. doi: 10.1098/rsbm.1955.0018
9. Macosko, C.W. (1994). Rheology – principles, measurements and applications. New York: Wiley-VCH.
10. Mezger, T. (2011). The Rheology Handbook. 3rd revised ed. Hanover: Vincentz Network, p.258.
11. Mezger, T. (2011). The Rheology Handbook. 3rd revised ed. Hanover: Vincentz Network, p.259.
12. Mezger, T. (2011). The Rheology Handbook. 3rd revised ed. Hanover: Vincentz Network, p.260.
13. Newton, I. (1687). Philosophiae naturalis principia mathematica (Principia”). London.
14. Mezger, T. (2011). The Rheology Handbook. 3rd revised ed. Hanover: Vincentz Network, p.241.
15. Mezger, T. (2011). The Rheology Handbook. 3rd revised ed. Hanover: Vincentz Network, pp.242-254.
16. Beitz, W. and Küttner, K.-H. (1987). Dubbel Taschenbuch für den Maschinenbau. 16th revised ed. Berlin; Heidelberg; New York; London; Paris; Tokyo: Springer, p.G84. English translation: Beitz, W. and Küttner, K.-H., English edition by Davies, B.J., translation by Shields, M.J. (1994). Dubbel Handbook of Mechanical Engineering. London: Springer-Verlag Ltd., p.F89.
17. Fitzgerald, D (2000). Technical Assessment of the Anton Paar DMA5000 density meter. [online] Available at: density.co.uk/wp-content/uploads/2012/02/review_of_5000.pdf [Accessed 14 June 2017], p. 3

Данна стаття є перекладом на українську оригінальної [статті Anton Paar GmbH](https://www.anton-paar.com) <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