

Густина рідин

Густина –є дуже важливою характеристикою речовини в усіх агрегатних станах – твердому, рідкому або газоподібному. В даній статті йдеться про густину газів і рідин.

Визначення

Густина ("істинна густина") - це відношення маси до об'єму. Оскільки маса не залежить від зовнішніх умов, таких як плавучість у повітрі або гравітація, вона відповідає вазі у вакуумі.

Густину позначають грецькою буквою ρ (кажуть «ро»):

$$\rho = \frac{m \text{ (маса)}}{V \text{ (об'єм)}} \left[\frac{\text{г}}{\text{см}^3} \right] \text{ або } \left[\frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \right]$$

Рівняння 1. Густина рідини ρ вимірюється у кг/м^3 або г/см^3 і визначається як її маса m поділена на об'єм V .

Маса m відповідає вазі у вакуумі і не залежить від зовнішніх умов, таких як плавучість в повітрі або сила тяжіння.

Істинна густина рідин або газів вимірюється методом осцилюючої U-подібної трубки. Одиниці вимірювання істинної густини кг/м^3 або г/см^3 ($1 \text{ г/см}^3 = 1000 \text{ кг/м}^3$).

Речовина	ρ [г/см ³]
Повітря	0.001
Вода	0.998
Етанол	0.79
Сироп	1.40
Олія	0.91
Гліцерин	1.26

Таблиця 1. Густини деяких рідин при 20 °C

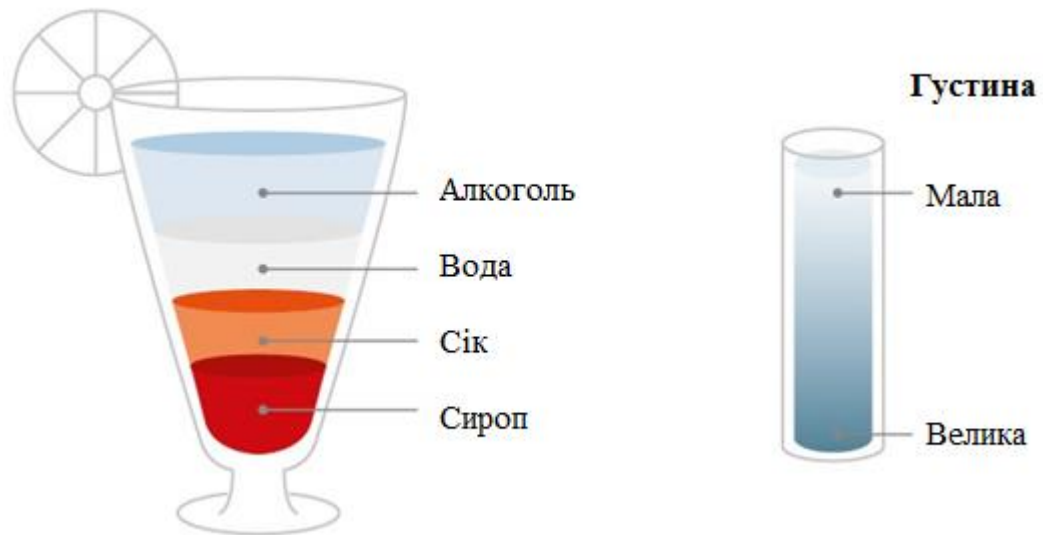


Рисунок 1. Ефект, пов'язаний з густиною рідини.

Багатошаровий коктейль (рис. 1): рідини з більшою густиною, такі як сік або сироп, будуть тонути, вони важчі і мають меншу плавучість. Рідини з меншою густиною, такі як алкоголь або вода, мають більшу плавучість і спливають догори.

Залежність густини від температури

Об'єм і агрегатний стан матеріалу змінюються з температурою. Отже, температура впливає на густина. Точне вимірювання густини вимагає точного визначення та контролю температури. ^[1]

Саме принцип роботи термометра добре ілюструє температурну залежність густини. Зі збільшенням температури ртуть розширюється, тобто збільшується її об'єм. Якщо маса не змінюється, але збільшується об'єм, густина стає меншою.

При точному вимірюванні густини, коли точний контроль температури або алгоритм її компенсації є необхідними, температура стає ключовим фактором. Різниця температури $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ може призвести до похибки вимірювання $0,0001\text{ г/см}^3$. ^[2]

Аномалія води

Вода є унікальною рідиною: вона досягає максимуму густини при температурі $3,98\text{ }^{\circ}\text{C}$. При зростанні температури вище $3,98\text{ }^{\circ}\text{C}$ об'єм води збільшується, внаслідок цього вода стає менш густою. При охолодженні води її густина, навпаки, зростає ^[3]. Ця аномалія призводить до замерзання озер згори донизу, вода, яка має температуру меншу ніж $4\text{ }^{\circ}\text{C}$, замерзає та спливає догори.

Загальноживані одиниці вимірювання густини

Така фізична величина, як густина, досліджується з декількох причин і, отже, може мати різні одиниці вимірювання. Найчастіше густина вимірюється в кілограмах на кубічний метр ($\text{кг}/\text{м}^3$), ця одиниця використовується, наприклад, в нафтохімії. В інших галузях густина може вимірюватися в грамах на кубічний сантиметр ($\text{г}/\text{см}^3$). Коефіцієнт перетворення в цьому випадку складає 1000 ($1 \text{ г}/\text{см}^3 = 1000 \text{ кг}/\text{м}^3$). Густина також може бути предсталена в кілограмах на літр ($\text{кг}/\text{л}$) або в грамах на літр ($\text{г}/\text{л}$).

Істинну густину ρ часто плутають з удаваною густиною ρ_{app} . Удавана густина – це вага зразка в повітрі поділена на його об'єм:

$$\rho_{\text{app}} = \frac{W}{V}$$

Рівняння 2. Удавана густина ρ_{app} визначається як вага зразка в повітрі поділена на об'єм.

Значення удаваної та істинної густини різні, навіть при тому, що їх одиниці вимірювання однакові. Істинна густина повітря при 20°C , виміряна густиноміром, становить $0,0012 \text{ г}/\text{см}^3$, тоді як удавана густина повітря при 20°C становить $0,0000 \text{ г}/\text{см}^3$ - ваги, на яких повітря показують нуль.

Удавана густина може бути розрахована з істинної, враховуючи плавучість зразка в повітрі, а також вагу та густину контрольної ваги в сталі або латуні. На сьогодні, сталь використовується як контрольний матеріал. Раніше використовували латунь.

$$\rho_{\text{app}} = \frac{\rho_{\text{true}} - \rho_{\text{повітря}}}{1 - \frac{\rho_{\text{повітря}}}{\rho_{\text{сталі або латуні}}}}$$

Рівняння 3. Перетворення істинної густини зразка ρ_{true} в удавану густину ρ_{app} . В це перетворення входить істинна густина повітря ($\rho_{\text{air}} \approx 0.0012 \text{ г}/\text{см}^3$) та істинна густина сталі ($\rho_{\text{steel}} = 8.0 \text{ г}/\text{см}^3$) або латуні ($\rho_{\text{brass}} = 8.4 \text{ г}/\text{см}^3$).

Для визначення об'єму заповнення з густини, отриманої за допомогою ваг, необхідно мати значення удаваної густини.

Ще одною фізичною величиною, пов'язаною з удаваною густиною, є **питома вага** – SG (від англ. Specific Gravity), вона використовується в ряді галузей промисловості. Питома вага - це виміряна густина зразка, розділена на густину води за певної температури. З цієї причини, вона також називається відносною густиною RD (від англ. relative density), оскільки вона визначається у відношенні до густини води.

$$SG = \rho_{\text{true}}/\rho_w$$

Рівняння 4. Питома вага – це густина зразка ρ , поділена на густину води ρ_w за певної температури.

$SG_{20/4}$ позначає густину зразка при 20 °C, поділену на густину води при 4 °C. $SG_{20/20}$ позначає густину зразка при 20 °C, поділену на густину води при 20 °C. Значення $SG_{20/20}$ та $SG_{20/4}$ того самого зразка відрізняються, оскільки густина води відрізняється при 4 °C та 20 °C.

Удавана питома вага D_{app} (деколи називають удаваною відносною густиною D_{app}) має безрозмірні одиниці вимірювання, це означає, що вона не має одиниць вимірювання. Вона розраховується шляхом ділення удаваної густини зразка ρ_{app} на удавану густину води $\rho_{app,water}$ при заданій температурі.

$$D_{app} \frac{20}{20} = SG_{app} \frac{20}{20} = \frac{\rho_{app} \text{ при } 20 \text{ } ^\circ\text{C}}{\rho_{app,water} \text{ при } 20 \text{ } ^\circ\text{C}}$$

Рівняння 5. Удавана питома вага $D_{app}^{T/T}$ (або $SG_{app}^{T/T}$) пов'язана з визначеними температурами удаваної густини зразка ρ_{app} та води $\rho_{app, water}$.

Зразок	Повітря при T = 20 °C, p = 1013 мбар	Вода при T = 20 °C
Істинна густина ρ [г/см ³]	0.00120	0.99820
Питома вага $SG^{20/20}$	0.00120	1
Питома вага $SG^{20/4}$	0.00120	0.99823
Удавана питома вага $SG_{app}^{20/20}$	0	1

Таблиця 2. Порівняння одиниць вимірювання густини води та повітря при 20 °C.

Історія вимірювання густини

Вже більше 50-ти років для вимірювання густини рідини використовують сучасні густиноміри, які сконструйовано, базуючись на принципі осцилюючої U-трубки. Проте історія вимірювання густини розпочалася ще в третьому столітті до нашої ери, коли Архімеда, грецького математика, вченого і філософа, попросили визначити, чи була королівська корона виготовлена з чистого золота. Як розповідається в легенді, він знайшов рішення, коли був у ванній: він взяв корону і злиток чистого золота однієї ваги. Потім він занурив обидва об'єкти у водяний контейнер. Корона витіснила більше води, ніж злиток золота, вода піднялася вище, тобто корона мала більший об'єм. Однакова маса, але більший об'єм означали нижчу густину, тому що корона була легшою, ніж чисте золото, і, відповідно, можна було зробити висновок, що вона не повністю золота.^{[4] [5]}

У 4 ст. Хіпатія Олександрійська – філософ, математик, вчитель і перша жінка, яка зробила внесок у розвиток математики в античні часи, винайшла гідрометр (гідроскоп).^{[6] [7]}

Зважування дорогоцінних металів у повітрі, а потім у воді, було звичайною практикою для ювелірів у Європі, коли відомий італійський математик, астроном і фізик Галілео Галілей у XVI столітті описав метод, який і сьогодні використовується для високоточного вимірювання

густини – метод гідростатичного зважування. У даному методі об'єкт також занурюється в рідину, але тут він знаходиться на високочутливих терезах, а значення густини визначається з руху противаги.^[8]

Методи вимірювання густини рідин

Гідрометри

Гідрометр - це плаваюча скляна колба, яка наповнена металом, та має циліндричний стовбур зі шкалою. Гідрометр занурюється в зразок, значення густини зразка зчитується безпосередньо зі шкали: чим глибше зануриться гідрометр, тим меншою є густина зразка. Якщо порівнювати, як занурюється гідрометр у воду та сироп, то він занурюється глибше у воду, оскільки сироп має більшу густину, ніж вода.^{[9] [10]}

В залежності від сфери використання, існує багато різних гідрометрів. Значення на шкалі не завжди є густиною, це також може бути похідна величина. Лактометр використовується для вимірювання густини молока, сахариметр для вимірювання концентрації цукру в рідині, алкотестер для вимірювання вмісту етанолу в спиртних напоях.^{[11] [12]} Гідрометри є найбільш надійними та дешевими інструментами для вимірювання густини, але для цього треба мати хороший контроль температури, який досить важко влаштувати, та великий об'єм зразка для дослідження (до 100 мл). Через невелику шкалу, отримані на гідрометрі значення можуть бути зчитані не точно.^[13]

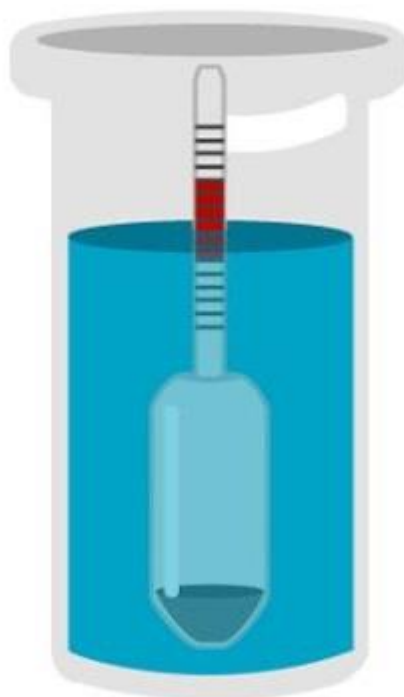


Рисунок 4. Гідрометр, занурений у досліджуваний зразок. Значення густини зразка зображене на шкалі.

Пікнометри

Пікнометр складається зі скляної колби та пробки (іноді з вбудованим термометром). Він розміщується на вагах і після зважування порожнього пікнометра ви можете обчислити його об'єм, заповнивши калібрувальною рідиною відомої густини (наприклад, водою), використовуючи відповідне визначення густини (об'єм = вага/густину). Потім, шляхом зважування пікнометра, заповненого зразком, можна визначити густину зразка (густина = вага/об'єм).^[14]

Використання пікнометра дає точні та надійні результати, якщо контроль температури є таким же точним, як використані ваги. Пікнометри доступні, але легко розбиваються. Метод досить повільний та трудомісткий, і потрібен кваліфікований оператор. Ще одним недоліком є великий об'єм зразка, який потрібний для дослідження, як правило від 10 мл до 100 мл.^[15]

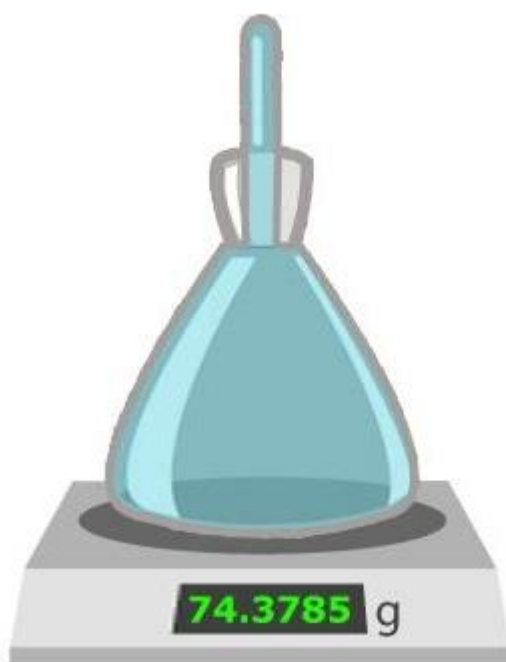


Рисунок 5. Пікнометр на вагах.

Метод гідростатичного зважування

Метод гідростатичного зважування засновано на принципі Архімеда.^[16] Прилад складається з дуже точних терезів і грузила (наприклад, у формі сфери) точно відомого об'єму, яке прикріплене до однієї шальки. Грузило повністю занурюється в досліджуваний зразок, а втрата ваги грузила визначається зважуванням. Втрата ваги грузила дорівнює вазі рідини, яку воно витісняє, тому точний об'єм і вага є відомими.^[17]

Метод гідростатичного зважування надійний і точний. Однак він дорогий та дуже трудомісткий. Ще один недолік полягає в тому, що їх встановлення (на ізольованій важкій підставці) є складною задачею та точний контроль температури є критично важливим.^[18]

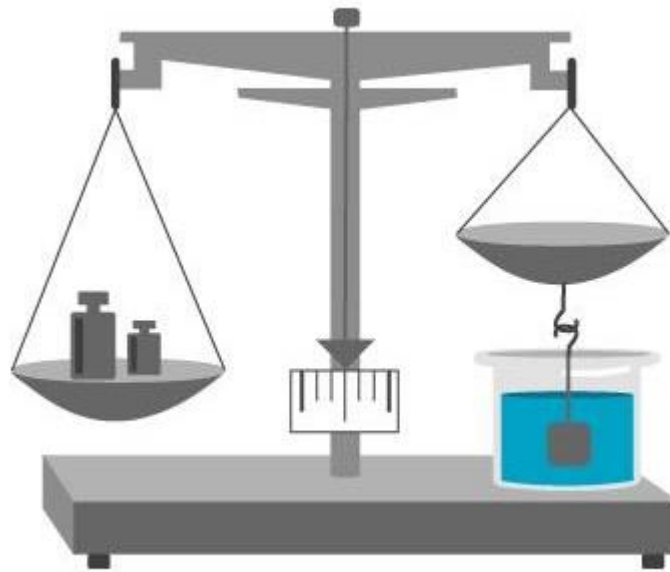


Рисунок 6: Метод гідростатичного зважування.

Електронні густиноміри

Сучасні цифрові густиноміри базуються на принципі осцилюючої U-подібної трубки. Трубку, як правило це U-подібна скляна трубка, збуджують і вона починає коливатися на певній частоті, яка залежить від зразка, яким заповнена. Визначенням відповідної частоти можна обчислити густину зразка.

Цифрові густиноміри, які базуються на принципі осцилюючої U-подібної трубки, є дуже ефективними інструментами, які дозволяють швидко і точно вимірювати густину рідини в широкому діапазоні температур і тиску. Вони вимірюють істинну густину (густину у вакуумі) без впливу плавучості повітря або гравітації.

На відміну від традиційних статичних методів (таких як гідрометри, пікнометри або гідростатичне зважування), цей метод потребує лише невеликої кількості зразка, приблизно 1 - 2 мл. З цифровими густиномірами легко працювати і вони не потребують спеціальних умов навколишнього середовища або контролю температури.^{[15][19]}

Сучасні високоточні густиноміри також забезпечують корекцію в'язкості та мають контрольний осцилятор для забезпечення точних результатів вимірювання у широкому діапазоні густин, температур та в'язкості.

Колівання трубки запускаються механічними або електронними пристроями. Для розрахунку густини зразка за його (зразка) частотою або періодом коливань використовують константи, отримані за даними попереднього калібрування.

Форма та матеріал, з якого виготовляють сенсор

Датчик густини – це, в основному, пряма або U-подібна трубка. Вона може бути виготовлена зі скла, наприклад боросилікатного скла 3.3, металу, металевого сплаву або пластмаси в залежності від застосування та необхідної стійкості до зразка або м'яких засобів ^[20].

Противага

Для зменшення паразитних резонансів ("зовнішніх коливань") від інших компонентів приладу, наприклад, електронних деталей, до вимірювальної трубки приєднують противагу. Вона з'єднується з корпусом густиноміра за допомогою пружних опор і діє як механічний фільтр зовнішніх коливань. Противага має резонансну частоту, яка лежить значно нижче частот, які використовуються для вимірювання щільності. Противага також забезпечує незмінне розташування вузлових точок вимірювальної трубки. Об'єм заповнення зразком встановлюється за вузловими точками, тому в залежності від зразка змінюється лише маса досліджуваної системи, а об'єм залишається однаковим.^[21]

Контрольний осцилятор

У випадку, коли трубка виготовлена зі скла, вбудований контрольний осцилятор виключає можливість появи не тільки довготривалих дрейфів через старіння матеріалу, а й зміни температури, які впливають на еластичність. Отже, контрольний осцилятор дає змогу використовувати лише одне окреме налаштування для охоплення всього діапазону температур і дає змогу виконувати температурне сканування зразка.^[21]

Регуляція температури

Температурна регуляція комірки виконується елементами Пельтьє, які замінили водні бані. Елементи Пельтьє дозволяють точно та швидко регулювати температуру і забезпечують як ефективне нагрівання, так і охолодження вимірювальної трубки.

Збудження та оцінка збуджених коливань

Система магнітів та котушок може бути використана як електронна система збудження довготривалих коливань на власній частоті. Недоліком цього підходу є збільшення ваги коливальної трубки, що, в свою чергу, негативно впливає на точність вимірювання. Найточнішим способом збудження вимірювальної трубки є використання п'єзоелементів – кристалічних або керамічних матеріалів, які змінюють свій розмір при пропусканні через них струму.

Оптичні детектори можуть зареєструвати переривання світлового променя мікропокриттям на осциляційній трубці. Потім детектори фіксують період коливань. З іншого боку, п'єзоелементи можуть використовуватись для дуже точних вимірювань періоду коливань, якщо п'єзоелемент інвертувати: п'єзоелемент піддається деформації через рух осцилюючої трубки і генерує електричний струм, що відповідає періоду коливань.

Хоча аналогова технологія детектування коливань є надійною і доступною, її точність обмежена. Процесори цифрових сигналів (від англ. digital signal processors – **DSP**) на сьогодні

є своєрідним виробом мистецтва в даній області і надають великі переваги над аналоговою технологією, вони дозволяють навіть визначати втрати енергії, пов'язані з в'язкістю зразка.

Константи приладу (апаратні константи) та їх корегування

Принцип вимірювання осциляційних густиномірів базується на співвідношенні між густиною ρ рідини, яка наповнює трубку, та відповідним періодом коливань τ (одиниця розділена на частоту коливань f) за формулою:

$$\rho = A\tau^2 + B$$

Рівняння 6. Густина досліджуваного зразка ρ може бути розрахована, використовуючи константи приладу (A та B) та вимірний період коливань τ

Для визначення констант приладу A та B з відповідних значень частоти, комірку необхідно заповнити щонайменше двома еталонними рідинами з відомою густиною. Константи приладу враховують об'єм комірки, її масу, а також коефіцієнт жорсткості.^[15]

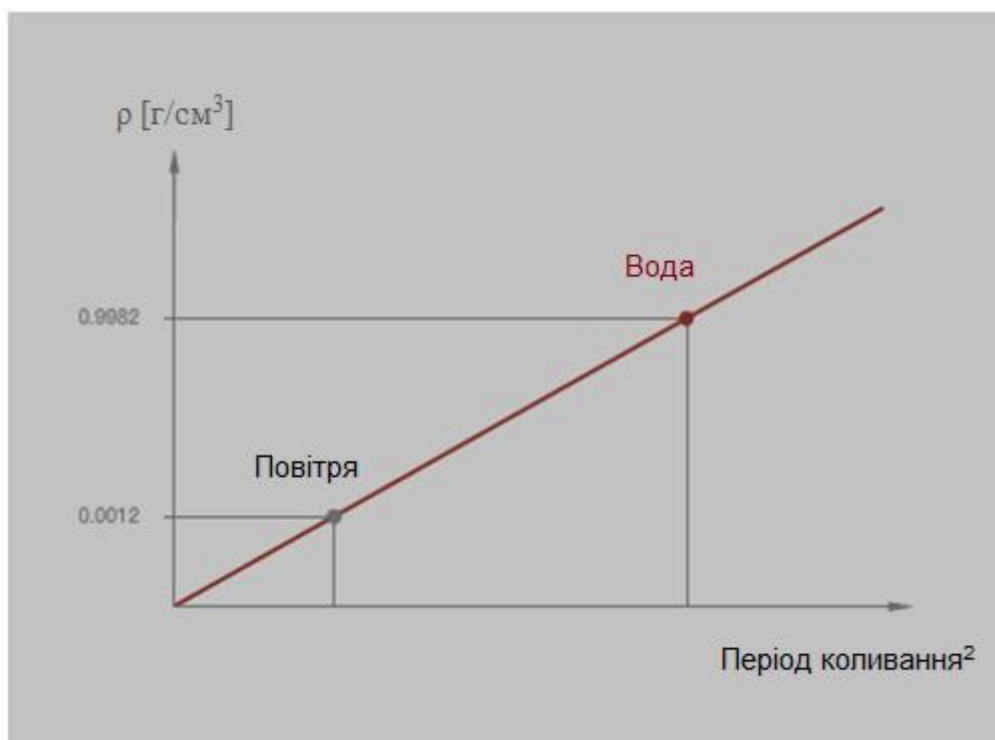


Рисунок 8. Принцип вимірювання.

Налаштування констант приладу густиноміра називають корегуванням. Корегування – це операція налаштування приладу (в тому числі густиноміра), щоб зробити його придатним до використання шляхом встановлення або налаштування констант приладу. Систематичні вимірювальні відхилення видаляються в тій мірі, яка необхідна для конкретного застосування та постійної зміни інструмента.^[20]

Під час корегування, зазвичай, вимірюються два зразки (рис. 8), наприклад, сухе повітря та чиста (наприклад, двічі очищена) дегазована вода. Знаючи густини контрольних зразків, можна зв'язати значення густини з певним періодом коливання та побудувати лінійну

залежність між густиною та періодом коливань. Виходячи з цього співвідношення, невідомі густини різних зразків можуть бути визначені навпаки, вимірюючи їх період коливань.

Калібрування

Калібрування - це набір операцій для встановлення зв'язку між густиною контрольного зразка та відповідним показником густини контрольного зразка, виміряним за допомогою приладу.

При калібруванні не проводиться змін, які безповоротно модифікують інструмент. ^[20]

Калібрування проводиться для перевірки якості вимірів та їх коригування.

Як в'язкість впливає на вимірювання густини за допомогою осциляційної U-трубки

Частота коливань, яка отримується, залежить не тільки від густини досліджуваного зразка, але і від його в'язкості. Через коливання трубки, виникають зсувні сили (тертя), які діють між досліджуваною рідиною та стінками трубки, що призводить до амортизації коливань.

Амортизація підвищується зі збільшенням в'язкості зразка, що призводить до завищеного значення густини (отримане значення густини є занадто високим).^[22] Сучасні густиноміри компенсують цей ефект і автоматично виконують корекцію в'язкості за допомогою спеціальної методики, в якій застосовуються два різних режими коливань.^[21]

Переваги електронного методу вимірювання густини

Існує кілька переваг, якщо густина використовується для визначення концентрації: наприклад, надзвичайно широке поле застосування. Хімічна компанія може використовувати той самий густиномір для дослідження різних кислот, їдких речовин, для контролю якості вхідної сировини та кінцевих продуктів, а також для контролю процесу на стадії виробництва. Крім того, електронні густиноміри прості у використанні та налаштуванні.

Результати є добре відтворюваними в широкому діапазоні. Інші переваги електронного густиноміра полягають у тому, що зазвичай, немає необхідності у розведенні або підготовці зразків для дослідження. Таким чином, можливе повернення зразка, оскільки він залишається незмінним під час вимірювання. Не потрібні ручні розрахунки; метод дозволяє проводити швидкі вимірювання, які повністю є не залежними від користувача.

На відміну від інших методів визначення концентрації, таких як титрування, фотометрія чи газова хроматографія, контакт з хімікатами зводиться до мінімуму; для дослідження в комірці потрібно мати лише 1 - 2 мл зразка, при цьому комірка легко заповнюється, наприклад, за допомогою шприца або автоматичної системи наповнення.

Підсумки

Вимірювання густини рідин використовується для контролю якості, характеристики продукту і моніторингу виробничого процесу. Дана стаття дає уявлення те, що таке густина рідини, про її основні одиниці вимірювання, історичний екскурс та вимірювальні технології.

Посилання

1. www.propertiesofmatter.si.edu/Changing_Temp.html (last visited 11.12.2017)
2. www.petro-online.com/article/analytical-instrumentation/11/anton-paar/the-facts-andnbspfigures-of-digitalnbspdensity-measurement-nbsp/1304 (last visited 22.1.2018)
3. butane.chem.uiuc.edu/pshapley/GenChem1/L21/2.html (last visited 12.12.2017)
4. www.longlongtimeago.com/once-upon-a-time/great-discoveries/eureka-the-story-of-archimedes-and-the-golden-crown/ (last visited 11.12.2017)
5. www.math.nyu.edu/~crrres/Archimedes/Crown/CrownIntro.html (last visited 11.12.2017)
6. cs-exhibitions.uni-klu.ac.at/index.php (last visited 11.12.2017)
7. daggn.wordpress.com/culture-site/been-jon-woo/been-jon-woos-career/ (last visited 11.12.2017)
8. galileo.rice.edu/sci/instruments/balance.html (last visited 11.12.2017)
9. www.britannica.com/technology/hydrometer (last visited 11.12.2017)
10. www.measurement.gov.au/Industry/Licensees/Pages/Other-classes.aspx (last visited 11.12.2017)
11. hypatiainventions.blogspot.co.at (last visited 11.12.2017)
12. www.kettletokeg.com/blog/2012/06/hydrometer-refractometer-what-are-they/ (last visited 11.12.2017)
13. learn.kegerator.com/refractometers-vs-hydrometers/ (last visited 11.12.2017)
14. www.dcu.ie/sites/default/files/mechanical_engineering/pdfs/manuals/DensityDeterminationManual.pdf (last visited 11.12.2017)
15. H. Fehlauer and H. Wolf Density reference liquids certified by the Physikalisch-Technische Bundesanstalt Meas.Sci.Technol. 17 (2006) 2588–2592
16. www.britannica.com/science/Archimedes-principle (last visited 12.12.2017)
17. mpec.sc.mahidol.ac.th/radok/phymath/PHYSICS/e2.htm (last visited 12.12.2017)
18. www.ptb.de/cms/presseaktuelles/zeitschriften-magazine/ptb-news/ptb-news-ausgaben/archivederptb-news/news07-3/dichte-von-reinstwasser-messen.html (last visited 12.12.2017)
19. W. Wagner and R. Kleinrahm Merologia 41 (2004) S. 24–39: Densimeters for very accurate density measurements of fluids over large ranges of temperature, pressure, and density
20. EN ISO 15212-1: 1999 Oscillation-type density meters – Part 1: Laboratory instruments
21. Fritz et al. Applications of densimetry, ultrasonic seed measurements, and ultra low shear viscosimetry to aqueous fluids. J. of Phys.Chem. B Vol 104, No 15, 3463–3470, 2000
22. ftp://ftp.unicauca.edu.co/Facultades/FIET/DEIC/Materias/Instrumentacion%20Industrial/Instrument_Engineers__Handbook_-_Process_Measurement_and_Analysis/Instrument%20Engineers%27%20Handbook%20-%20Process%20Measurement%20and%20Analysis/1083ch6_8.pdf (last visited 12.12.2017)



**Ексклюзивний дистриб'ютор
Anton Paar GmbH в Україні та Молдові**

Донау Лаб Україна
вул. Стратегічне шосе, 16,
оф. 301
03028
www.dlu.com.ua

Телефон +38 (044) 229 15 31
Факс +38 (044) 229 15 30
e-mail sale@dlu.com.ua