

# Визначення концентрації шляхом вимірювання густини

Якщо існує зв'язок між концентрацією речовини в розчині та густиною цього розчину, концентрацію можна визначити, вимірявши густину. Стаття присвячена бінарним розчинам й описує різні підходи до вимірювання їх концентрацій, висвітлює найбільш важливі моменти, які виникають при описі цих сумішей.

---

## Загальні відомості

---

Густина рідин змінюється, якщо змінюються компоненти. Приклад: безалкогольний напій з цукром буде мати більшу густину, ніж безалкогольний напій без цукру. Отже, цукор не просто збільшує густину, можна дізнатись про його вміст, знаючи густину рідини, в якій його було розчинено. Користуючись цим зв'язком, можна отримати багато корисної інформації у виробництві різноманітних напоїв.



Рисунок 1. При додаванні речовини до розчинника, густина суміші буде відрізнятися від густини чистого розчинника. Таким чином, густина може бути використана для визначення концентрації розчиненої речовини ("розчину") у розчиннику (наприклад, воді).

## Бінарні і квазібінарні суміші

Двокомпонентні суміші називають **бінарними сумішами**. Густина суміші залежить від її складу. Таким чином, значення густини бінарної суміші можна використати для визначення її складу за допомогою концентраційних таблиць.

Типові двокомпонентні суміші: спиртово-водні розчини, розчини цукор-вода, соляно-водні розчини, кислоти або основи, розчинені у воді.

Визначення концентрації також є можливим за допомогою так званих **квазібінарних** сумішей. Це суміші, що містять два основних компоненти та деякі додаткові, але з дуже малими концентраціями у порівнянні з основною. Через незначний вплив на об'ємну густину вмістом додаткових компонент можна знехтувати.

Визначення концентрації також є можливим, якщо суміш містить декілька компонентів, і концентрація одного з них варіюється, тоді як значення всіх інших є постійними.

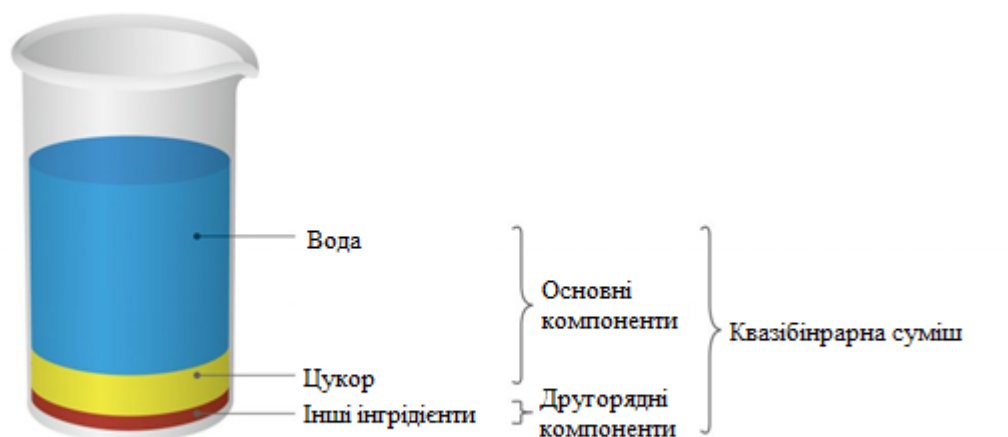


Рисунок 2. Основними складовими звичайних безалкогольних напоїв є вода та цукор (сахароза), вміст інших інгредієнтів, таких як ароматизатори чи харчові барвники є незначним. Тому безалкогольні напої вважаються розчинами цукор-вода, а для визначення вмісту цукру використовується вимірювання густини.



Рисунок 3. При виготовленні настоянок за рецептом точно зважують основні інгредієнти, включаючи солі та активні інгредієнти. На другому етапі виробництва цю суміш розбавляють водою. Концентрацію можна контролювати за допомогою вимірювання густини.

---

## Вимірювання густини за допомогою електронних густиномірів

---

В сучасних лабораторіях контролю якості та виробництва переважають безліч аналітичних інструментів. Однак, не всі вони є настільки ж швидкими, корисними і простими у користуванні, як електронний густиномір.

Сучасні густиноміри потребують дуже малу кількість зразка для вимірювання, не змінюють складу зразка, не залежать від оператора, зменшують витрати реагенту і виконують вимірювання з максимальною точністю.

При вимірюванні зразком наповнюють U-подібну трубку, в якій електронні пристрої збуджують коливання на характеристичній частоті. Характеристична частота коливань залежить від густини досліджуваного зразка. Густина визначається шляхом точного вимірювання характеристичної частоти коливань зразка. Через сильну залежність густини від температури, вимірювальна комірка повинна мати точний контроль температури.

Сучасні густиноміри з високою точністю враховують вплив в'язкості та мають контрольний осцилятор, який забезпечує точні результати у широкому діапазоні густини, температури та в'язкості. Метод осцилюючої U-трубки використовується для вимірювання істинної густини рідин.

## Переведення густини в концентрацію

Густину суміші можна перевести в концентрацію, використовуючи відповідні концентраційні таблиці або формули перетворення. Майже всі бінарні розчини можна характеризувати за допомогою функцій, які пов'язують концентрацію і густину, та концентраційних таблиць. Ці таблиці можна знайти у відповідній літературі або скласти з самостійно отриманих експериментальних даних.

Концентрація розчинів та сумішей часто виражається у відсотковому співвідношенні за масою чи об'ємом.

|                | Величина  | Одиниці вимірювання  |
|----------------|---|--|
| Етанол         | АОАС <sup>60 °F</sup> , НМ С&Е, IUPAC, КАЕМРФ, OIML, OIML-ITS-90, °Пруф <sup>60 °F</sup> , Канадська таблиця акцизного алкоголю, OIML-Shusei-Do                                     | %v/v (% об. -об'єм у %), %w/w (або %m/m (% вага речовини/вага розчинника), Грам-еквівалент-%), °Пруф |
| Екстракт/цукор | Бауме, концентрація цукру, масова концентрація цукру  | °Бауме, °Брікса, °Платона, г/л, кг/м <sup>3</sup>  |
| Кислота/основа | HCl, HNO <sub>3</sub> , H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> , NaOH, H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>   | %w/w (%m/m, грам-еквівалент-%), моль/л, Н  |
| Функції API    | API Gravity 15 °C / 20 °C / 29.5 °C / 60 °F, API густина 15 °C / 20 °C / 29.5 °C / 60 °F, API Вхідна величина, API Група продуктів, API питома вага 15 °C / 20 °C / 29.5 °C / 60 °F | г/см <sup>3</sup> , кг/м <sup>3</sup> , фунт/гал, г/мл   |

Таблиця 1. Переважні одиниці вимірювання різних рівностей в декількох галузях промисловості.

У хімічній сфері, концентрації найчастіше вимірюють у % вага/вага або % маса/маса. Скорочено записують % w/w або % m/m (w від англ. weight – вага, m від англ. mass – маса). Як правило, це означає, що один грам компонента розчиняють у 100 г розчинника.

Один з прикладів: 5% розчин сірчаної кислоти означає, що 100 г розчину містить 5 г сірчаної кислоти. Температурну залежність можна проігнорувати, оскільки температура не впливає на вагу або масу. Хоча більшість галузей промисловості використовують % вага/вага, в алкогольній промисловості концентрація, в основному, вимірюється у % об.. Якщо ви подивитесь на пляшку пива, ви, як правило, побачите вміст алкоголю, вказаний у % об. (об. від об'єму). Об'єм, звичайно, залежить від температури. У фармацевтичній промисловості, наприклад, дезінфекційний розчин може містити 70% об. етанолу. Це означає, що в 1 л розчину міститься 700 мл етанолу.

Часто вживана одиниця вимірювання концентрації пива та суслу в пивоварній промисловості є °Платона або °Боллінга. Дана одиниця вимірювання пов'язана з вмістом екстракту в продукті, як правило, в пивному суслі, і це приблизно те саме, що і % v/v.

°Пруф – це інша одиниця вимірювання, яка використовується, в основному, в галузі харчової промисловості Сполучених Штатів. Це % об. алкоголю, помножені на 2 при 60 °F(15,6 °C) <sup>[1]</sup>:

$$^{\circ}\text{Пруф}^{60^{\circ}\text{F}} = 2 \cdot \text{P}^{60^{\circ}\text{F}}$$

API, що розшифровується як Американський інститут нафти (від англ. American Petroleum Institute), використовує власну вагову одиницю вимірювання  $^{\circ}\text{API gravity}$  [2], щоб характеризувати важкі або легкі нафтопродукти, порівнюючи їх з водою: якщо API gravity (при  $60^{\circ}\text{F}$ ) нафтопродукту більше 10, то він "легкий" і плаває на поверхні води, якщо менше 10, то він "важче", води і, відповідно, тоне. API gravity вимірюється в градусах і розраховується на основі формули, яка включає в себе питому вагу. В залежності від країни в якості норми використовуються температури  $60^{\circ}\text{F}$  або  $15^{\circ}\text{C}$ . Ця шкала, як правило, використовується у Сполучених Штатах, а також в нафтопереробці в усьому світі.

$$\text{API gravity} = \frac{141.5}{\text{SG}} - 131.5$$

Рівняння 1. Формула для розрахунку API gravity нафтопродукту на основі питомої ваги SG зразка.

У хімічній промисловості як одиницю вимірювання також використовують  $^{\circ}\text{Бауме}$ . Він визначається схожим чином, використовуючи формулу, в якій фігурує питома вага SG.

$$^{\circ}\text{Бé} = \frac{140}{\text{SG}} - 130 \quad \text{SG} \leq 1$$

$$^{\circ}\text{Бé} = 145 - \frac{145}{\text{SG}} \quad \text{SG} > 1$$

Рівняння 2. Існує дві формули Бауме, одна для рідин, які важчі за воду (питома вага  $\text{SG} > 1$ ), а друга - для рідин, що є легшими за воду (питома вага  $\text{SG} \leq 1$ ). [3] [4]

У промисловості безалкогольних напоїв  $^{\circ}\text{Брікса}$  [5] використовуються для кількісного опису вмісту сахарози або екстракту у виробках.  $^{\circ}\text{Брікса}$  і  $^{\circ}\text{Платона}$  по суті є ідентичними.

---

## Нелінійна залежність: визначення концентрації сірчаної кислоти

---

Іноді концентраційна таблиця для певної речовини не охоплює весь концентраційний діапазон від  $0\% \text{ w/w}$  до  $100\% \text{ w/w}$ . Однією з причин може бути те, що кількість розчиненої у розчині речовини вже така, що вже не збільшується (розчин є насиченим).

Ще однією причиною може бути те, що густина розчину має не лінійний зв'язок із значенням концентрації. Таке можна спостерігати у випадку сірчаної кислоти: при визначенні вмісту сірчаної кислоти у воді вимірювання густини дає точні показники в діапазоні концентрацій від  $0\%$  до  $87\%$ . Але якщо концентрація сірчаної кислоти вища ( $87\% - 100\%$ ), при подальшому розчиненні кислоти густина суміші не збільшується.

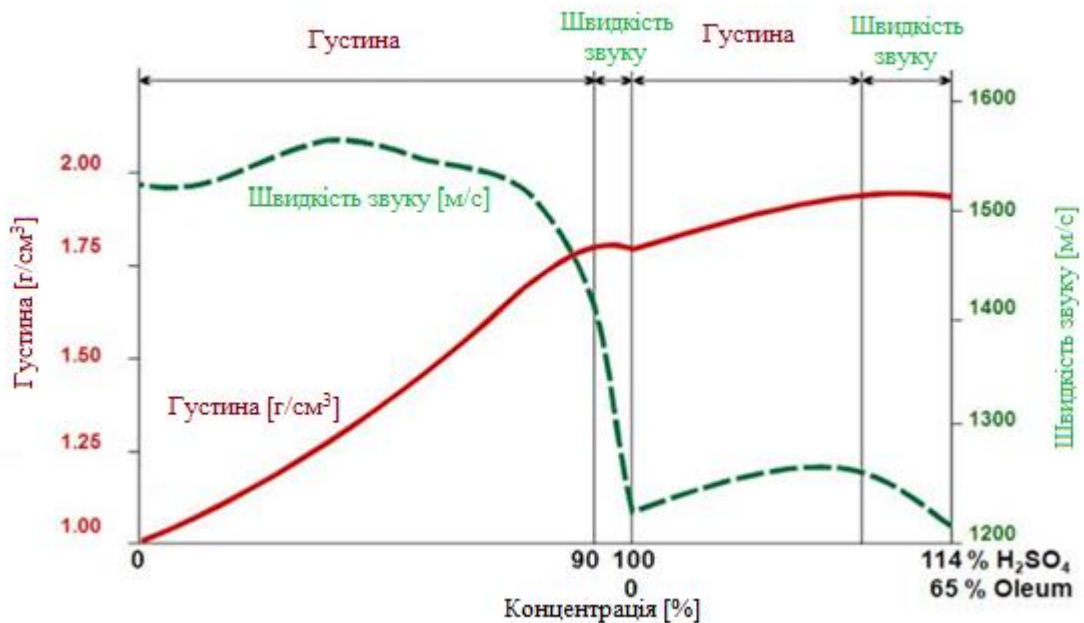


Рисунок 4. Густина розчину сірчаної кислоти.

Густина розчину сірчаної кислоти не показує лінійної залежності від концентрації. Максимальне значення густини спостерігається при концентрації сірчаної кислоти 87%, далі густина не може співвідноситись лише з концентрацією. Для покриття всього діапазону концентрацій необхідно використати додатковий параметр вимірювання, наприклад, швидкість звуку у розчині (рис. 5).

## Точність результатів вимірювання

Точність результатів вимірювання залежить не тільки від точності вимірювального приладу, але також від якості еталонних даних (наприклад, таблиці переведення густини в концентрацію) та розрахунку за функцією перетворення (наприклад, таблиця або поліноміальна функція). Чим точніша оцінка густини, тим точніше буде визначатися концентрація.

### Як розраховують точність.

#### Приклад:

Розчин хлориду натрію (NaCl) вимірюють приладом з точністю  $0,000005 \text{ г/см}^3$ . Розглядають дві концентрації розчинів (0,5% w/w I 1,5% w/w NaCl), оскільки вони охоплюють діапазон очікуваної концентрації зразка. Вимірюються густини обох розчинів та розраховується їх різниця  $\Delta$ .

NaCl

|           |       |                        |
|-----------|-------|------------------------|
| 0.5 % w/w | ..... | 1.0018 $\text{г/см}^3$ |
| 1.5 % w/w | ..... | 1.0089 $\text{г/см}^3$ |
| $\Delta$  | ..... | 0.0071 $\text{г/см}^3$ |

Різниця  $\Delta 1,0\%$  w/w відповідає зміні густини  $0,0071 \text{ г/см}^3$ , отже, точність визначення густини розчину NaCl становить:  $(1,0 \times 0,000005)/0,00710 = 0,007\%$  w/w. Це середня точність для всього діапазону, як визначено вище, і це вірно тільки за припущення, що відношення густини до концентрації є лінійним.

Ви можете досягти більш точних результатів, користуючись власною таблицею, яка містить виміряну з високою точністю велику кількість пар даних (значень густини та відповідні концентрації). Через нелінійну поведінку реальних розчинів точність є дійсною тільки в певному діапазоні концентрації.

## Альтернативні методи визначення концентрації

Титрування: загальним недоліком титрування є те, що для визначення концентрації цим методом потрібен кваліфікований оператор з гарною хімічною базою знань. В даному типі дослідження концентраційний діапазон є обмеженим, тому зразок треба розводити відповідним чином. Крім того, треба спеціально налаштовуватися для кожного окремо взятого зразка. Ще одним недоліком титрування є використання агресивних хімікатів і потреба в дорогих витратних матеріалах. Все вище перераховане робить цей метод дуже трудомістким й не зручним для користувача.

Пікнометр: пікнометр - це доступне вимірювальне обладнання, яке дає високоточні результати вимірювань. Однак для їх досягнення потрібен кваліфікований оператор, а також дуже точні ваги. Іншим недоліком є необхідність контролю температури зразка й великі об'єми (100 мл) зразка. Загалом цей метод є досить трудомістким і за його допомогою можна визначити лише удавану густину зразка, плавучість у повітрі має бути скомпенсоване.

Гідрометр: є доступним і забезпечує дуже швидке вимірювання концентрації. Проте, можна легко помилитись при зчитуванні значення зі шкали, також необхідно проводити корекцію температури. Як і у випадку з пікнометрами, потрібна велика кількість досліджуваного зразка, і, крім того, гідрометр може дуже легко розбитися.

Метод гідростатичного зважування: використовується на спеціальних об'єктах, наприклад, в Національному інституті стандартів і технології, оскільки цей метод неймовірно точний та надійний. Однак прилад для методу гідростатичного зважування – це величезний, складний апарат на бетонній підставці, який має бути ізольованим та потребує контролю температури. Цей "інструмент" є дуже дорогим і є непридатним для використання в промисловості. Вимірювання є трудомісткими і можуть зайняти від одного до двох днів.

---

## Підсумки

---

Визначення концентрації бінарних сумішей є необхідним для рідких продуктів і в процесі виробництва, і для продажів, і для споживання. У статті надано базові відомості про бінарні суміші, методи вимірювання концентрацій та різні одиниці вимірювання, які використовуються для порівняння та характеристики продуктів в залежності від галузі промисловості.

---

## Посилання

---

1. Table No. 6: Respective Volumes of Alcohol and Water and the Specific Gravity in Both Air and Vacuum of Spiritous Liquor Bulletin of the Bureau of Standards, Vol 9, No. 3, 327-474, 1913
2. [www.petro-online.com/news/fuel-for-thought/13/breaking-news/what-is-api-gravity/33309](http://www.petro-online.com/news/fuel-for-thought/13/breaking-news/what-is-api-gravity/33309)
3. Perry's Chemical Engineers' Handbook Sixth Edition; McGraw-Hill Inc., p 1–19
4. Official Methods of Analysis of AOAC International; Sixteenth Edition, 3rd Revision, 1997 Volume II; Appendix C, p 31–p 36
5. Brix: Official Methods of Analysis of AOAC International; Sixteenth Edition, 3rd Revision, 1997 Volume II; Appendix C, p 31–p 41



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

Донау Лаб Україна  
вул. Стратегічне шосе, 16,  
оф. 301  
03028  
[www.dlu.com.ua](http://www.dlu.com.ua)

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