

# ENERGY TRANSFORMATION IN SYSTEMS GAS-LIQUID

**A.O. Chagayda**

*National University of Food Technologies*

Key words:	ABSTRACT
Gas-liquid system	The information about the features of energy transformations gas-liquid systems are forced introduction of liquid medium gas phase or through the formation of the latter in the process of fermentation.
Circulation	
Dissolution	Marked features of energy transformations with the formation of internal circulation paths and gradients of concentrations of dissolved CO <sub>2</sub> . Also presented the relationship between mass concentrations of fermentable sugars and synthetic gas phase volumes and evaluation predicted loss of alcohol.
Transformation	
Concentration	
<b>Article history:</b>	
Received 28.09.2013	
Received in revised form 27.11.2013	
Accepted 5.12.2013	
<b>Corresponding author:</b>	
tmipt_xp@ukr.net	

## ЕНЕРГЕТИЧНІ ТРАНСФОРМАЦІЇ В ГАЗОРІДИННИХ СИСТЕМАХ

**О.А. Чагайда**

*Національний університет харчових технологій*

*Наведено інформацію про особливості енергетичних трансформацій газорідинних систем, які створюються примусовим введенням в рідинні середовища газової фази або за рахунок утворення останньої в процесах бродіння. Відмічено особливості енергетичних трансформацій з утворенням внутрішніх циркуляційних контурів і градієнтів концентрацій розчиненого CO<sub>2</sub>.*

**Ключові слова:** газорідинна система, циркуляція, розчинність, трансформація, концентрація.

**Вступ.** Газорідинні системи стосуються значної кількості технологій в харчовій, мікробіологічній, фармацевтичній і хімічній галузях промисловості. Існування таких систем інколи є результатом перебігу хімічних, біохімічних або комбінованих перетворень матеріальних потоків, або штучне перетворення і створення газорідинних систем пов'язується з масообміном для забезпечення трансформацій енергетичних і матеріальних потоків з них.

У значній кількості випадків газорідинні системи створюються в об'ємах спеціальних апаратів або у формі газорідинних потоків, проте, як правило, газова фаза в них диспергована і підлягає дії фізичних законів (Архімеда, Рейнольдса, Стокса, Бернуллі, закону нерозривності потоків тощо).

**Мета досліджень.** Причиною і наслідком створення газорідинних систем є організація масообмінних, теплообмінних процесів, механічне перемішування в інтересах перебігу технологічних процесів. Утворення газорідинної системи супроводжується енергетичними

трансформаціями на рівні синтезу поверхні поділу фаз, подолання гідростатичних тисків, утворення циркуляційних газорідних контурів тощо. Саме по собі існування газорідних систем означає присутність в них енергетичних потенціалів, які названі в попередньому абзаці. Проте їх присутність пов'язується з синтезом диспергованої газової фази або введенням її в рідинне середовище. За таких умов рушійним фактором системи виступають сили, що відповідають закону Архімеда.

Разом з тим існує дещо прихований потенціал розчинених газів, закономірності якого відображаються законом Генрі.

При цьому важливо, що існування потенціалу розчинених газів підтримується за рахунок таких термодинамічних параметрів як тиск і температура.

**Методика досліджень.** Розглянемо деякі особливості створення і існування газорідних систем в харчових і мікробіологічних технологіях. Вони можуть створюватися штучно для забезпечення аеробних умов існування мікроорганізмів і синтезу, наприклад, хлібопекарських дріжджів або для аерації стічних вод підприємств і створення умов існування симбіозу мікроорганізмів активного мулу. За вказаних задач завданням аерації є забезпечення середовищ розчиненим киснем і виведенням з них діоксиду вуглецю. Створення диспергованої газової фази в рідинній означає введення в останню певного енергетичного потенціалу у формі кінетичної, потенціальної енергії та енергії створення поверхні поділу фаз.

Нарощування потенціалу середовищ має місце в бродильних технологіях, однак у цьому випадку мова йде про потенціали тиску розчинених газів. Відомо, що процеси бродіння, які відбуваються за участю дріжджових культур, супроводжуються, утворенням діоксиду вуглецю. Якщо у виробництві алкоголю синтезований  $\text{CO}_2$  у більшості випадків існує як вихідний матеріальний потік, який на подальших етапах технології не використовується, то у виробництві хліба, пива і шампанських вин він є складовою названої продукції. Первинне виноробство хоча і супроводжується синтезом  $\text{CO}_2$ , але також останній застосування не знаходить.

Оцінюючи той факт, що зброджування цукровмістких середовищ може здійснюватися за високих тисків, слід прийти до висновку про, як мінімум, потрібну шкоду, якщо утворюваний  $\text{CO}_2$  просто скидається в навколишнє середовище. По-перше, енергетичний потенціал розчиненого газу не використовується для активації масообміну, по-друге, діоксид вуглецю не відбирається для подальшого використання, по-третє — має місце негативний екологічний вплив. Між тим вказані негативні наслідки в значній мірі могли б бути локалізованими і, навіть, ліквідованими.

З цієї точки зору майже ідеальне рішення досягнуто виробниками шампанських вин. Воно стосується як класичної технології виробництва шампанського пляшковим методом, так і технологій безперервного бродіння в акратофорах. Позитив цих двох названих технологій пов'язаний з тим, що концентрація цукру у виноматеріалах, які підлягають зброджуванню, забезпечує необхідну концентрацію  $\text{CO}_2$  біля 10 г/л. Саме тому зброджування таких середовищ завершується повною трансформацією цукрів в алкоголь і діоксид вуглецю. Утворюваний в результаті таких процесів бродіння продукт є абсолютно сухим шампанським з технологічною назвою «брют». Надалі необхідні (і різні) концентрації цукру і алкоголю досягаються за рахунок їх дозування у формі приготовлених розчинів-лікерів, а брют з його технологічними параметрами забезпечує можливість створення ряду сухого, напівсухого, напівсолодкого і солодкого шампанського.

Номінальна концентрація розчиненого  $\text{CO}_2$  10 г/л забезпечується за рахунок двох термодинамічних параметрів, до числа яких відносяться тиск і температур. Цьому сполученню відповідає закон Генрі у формі:

$$c_H = kP, \quad (1)$$

де  $c_H$  — максимальне насичення середовища газовою фазою у розчиненому вигляді;  $k$  — константа Генрі, яка враховує фізико-хімічні властивості середовищ, що взаємодіють і у тому числі температуру;  $P$  — парціальний тиск газової фази в системі.

У відповідності до наведеного співвідношення і для забезпечення  $c_H = 10$  г/л в акратофорах забезпечуються тиски газової фази біля 0,6 МПа і температури середовищ біля 6 °С. Кількість розчиненого  $\text{CO}_2$  в одиниці об'єму рідинної фази і тиск визначають його енергетичний потенціал

$$E_{\text{CO}_2} = PV = MRT. \quad (2)$$

Розрахунок виконаємо для одиниці об'єму середовища  $1 \text{ м}^3$ , якому відповідає 10 кг розчиненого газу

$$E_{\text{CO}_2} = 10 \cdot 188,9 \cdot 279 = 527031 \text{ Дж} = 527,031 \text{ кДж.}$$

Для можливості порівняльної оцінки вказаної величини  $E_{\text{CO}_2}$  перейдемо до потужності, яка може розвиватися в режимі його спрацювання за рахунок десатурації. Якщо час такого спрацювання складатиме 10 с, то потужність

$$N_{\text{CO}_2} = \frac{E_{\text{CO}_2}}{\tau_{(к)}} = \frac{527,031}{20} \approx 26,4 \text{ кВт,}$$

а перехід до  $\tau_{(к)} = 20$  с дає значення

$$N_{\text{CO}_2} = \frac{527,031}{20} \approx 26,4 \text{ кВт.}$$

Названі показники хоча і мають наближену оцінку, проте потужності впливу на середовища на порядок і більше перевищують показники енерговведення в класичних технологіях.

Хоча присутність енергетичних потенціалів розчинених газів не потребує подальших доказів, однак їх використання в інтересах технологічних процесів практично не досягається. Між тим існує два варіанти такого використання.

**Варіант перший.** Він стосується можливості того, що рідинна фаза з розчиненим  $\text{CO}_2$  за рахунок порушення умови термодинамічної рівноваги трансформується в газорідинне середовище з дисперговою в ньому газовою фазою. Очевидно, що ця частина впливу означає часткову ж десатурацію. Однак такий процес легко припинити повторним збільшенням тиску в системі. Останнє супроводжується повторним швидкоплинним розчиненням  $\text{CO}_2$  з бульбашок, які припиняють своє існування в результаті колапсу в процесі кавітації.

Очевидно, що різке припинення десатурації в таких системах за своїми наслідками подібне до кавітації і може використовуватися для інтенсифікації масообмінних процесів та енергомасообмінних трансформацій. Враховуючи значну кількість підприємств бродильної промисловості і самогенерування в технологічних апаратах  $\text{CO}_2$ , слід прийти до висновку про перспективність використання цих явищ.

**Другий варіант** використання потенціалів розчинених газів в рідинних середовищах стосується випадків застосування технологічних апаратів зі значними гідростатичними тисками середовищ. У відповідності до закону Генрі гідростатичні тиски мають супроводжуватися концентраційними градієнтами  $\text{CO}_2$  по висоті апаратів. Це означає можливість додаткових енергоматеріальних трансформацій в їх енергетичному забезпеченні.

Збільшення фізичних і гідростатичних тисків в технологічних апаратах, в яких здійснюється синтез діоксиду вуглецю або його примусове подавання і диспергування в рідинній фазі означає підвищення розчинності відповідно до закону Генрі. В бродильних середовищах, оскільки  $\text{CO}_2$  генерується в них, парціальні тиски дорівнюють загальному тискам. Останні мають обчислюватися сумою тисків в газовій фазі апарата і гідростатичних тисків. Це означає, що, наприклад, в таких апаратах значної висоти, як ЦКТ пивоварної галузі, розчинність діоксиду вуглецю по висоті буде різною, що приводить до існування концентраційного градієнта, особливо в умовах обмеженої вертикальної циркуляції. Проте навіть за існування такої ситуації досягалося б певне наближення до вирівнювання концентрації

CO<sub>2</sub>, однак фізичне підґрунтя нерівномірності розчинності не зникає. Це означає, що утворення диспергованої газової фази по висоті апаратів буде різним. Наслідком такої ситуації буде різна швидкість передавання CO<sub>2</sub> в газову фазу по висоті середовища і різна щільність диспергованої газової фази. З урахуванням феноменологічних міркувань слід прийти до висновку про те, що щільність диспергованої газової фази визначає гідродинамічні показники газорідних систем, у тому числі утримувальну здатність по газовій фазі, абсолютну швидкість спливання газових бульбашок як прояв дії Архімедових сил і інтенсивність циркуляційних контурів. Додатковий вплив на останні мають режими охолодження середовищ.

Процес утворення диспергованої газової фази слід розглядати триступеневим. На першому етапі відбувається синтез CO<sub>2</sub> в дріжджових клітинах, другий етап стосується масопередавання через клітинні оболонки в середовище, а на третьому — відбувається утворення газових бульбашок, збільшення їх в розмірах і спливання під дією Архімедових сил. Наведений аналіз приводить до висновку про неоднорідність гідродинаміки в середовищах і доцільність впливати на неї за рахунок використання потенціалів розчинених газів і диспергованої газової фази.

Проявів таких потенціалів можливо досягати за рахунок зміни тисків в газорідних середовищах і ці зміни можуть бути програмованими. При цьому зміни тисків стосуються трансформацій обох потенціалів і супроводжуються механічними, гідродинамічними, кавітаційними впливами, гідравлічними ударами тощо. Можливим також є вплив на середовища у формі організації циркуляційних контурів [1] або за рахунок різких знижень тисків в системах [2].

Технології, пов'язані з насиченням вологовмістких середовищ діоксидом вуглецю з наступним швидкоплинним режимом десатурації, також можуть знайти широке застосування в галузях харчової промисловості, наприклад, в системах для одержання дифузійного соку [3], соків овочів, фруктів, ягід тощо.

Створення енергетичних потенціалів розчинених газів, як було показано, пов'язано з їх фізичними і хімічними характеристиками безпосередньо і у тому числі відносно властивостей середовищ. До таких висновків приходимо на основі аналізу літературних джерел, хоча повнота їх помітно обмежена стосовно впливів розчинених в середовищах речовин. В табл. 1 наведено дані, які стосуються розчинності CO<sub>2</sub> у сухому вині. Останнє визначення означає, що цукри у середовищі відсутні, а концентрація алкоголю близька до 8–9 %. Однак інформація щодо присутності інших сухих речовин у розчиненому стані також відсутня. Проте навіть за таких умов представлена динаміка впливів тисків і температур в аналізі ситуації є корисною.

Залежність розчинності (константи Генрі) від тиску є лінійною, що власне відповідає закону Генрі.

Для визначення впливу температур виконаємо побудову залежностей  $c_H = c_H(t)$  за обраних ізобар. Ці результати наведені на рис. 1 і 2.

**Таблиця 1. Розчинність діоксиду вуглецю у вині в залежності від тиску і температури, г/л**

Температура, °C	Тиск, бар						
	1	2	3	4	5	6	7
0	3,62	7,25	10,87	14,50	18,12	21,75	25,37
2	3,39	6,78	10,17	13,56	16,94	20,33	23,72
4	3,17	6,34	9,52	12,69	15,86	19,03	22,21
6	2,97	5,95	8,92	11,90	14,57	17,84	20,82
8	2,79	5,58	8,37	11,16	13,97	16,75	19,54
10	2,62	5,25	7,84	10,49	13,11	15,74	18,36
12	2,47	4,94	7,40	9,87	12,34	14,81	17,27
14	2,32	4,65	6,97	9,30	11,62	13,95	16,27
16	2,19	4,38	6,58	8,77	10,96	13,15	15,34
18	2,07	4,14	6,21	8,28	10,35	12,42	14,49

В бродильних технологіях кількості і концентрації CO<sub>2</sub> є цілком програмованими, оскільки відомими є характеристики зброджуваних середовищ.

Так початкова концентрація цукрів у зброджуваному пивному суслі складає 13 %, а біохімічним перетворенням відповідає відоме рівняння Гей Люсака:

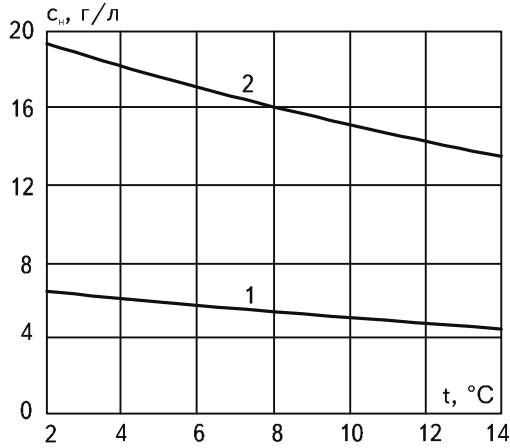
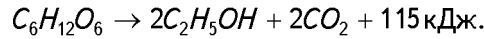


Рис. 1. Графік залежності сталої насичення на CO<sub>2</sub> від температури для пива при: 1 – P = 2 бар; 2 – P = 6 бар

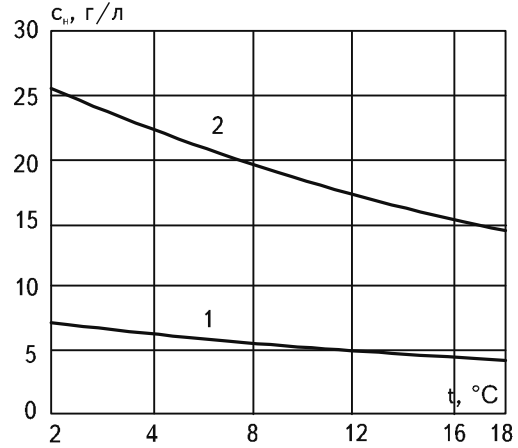


Рис. 2. Графік залежності сталої насичення на CO<sub>2</sub> від температури для сухого вина при: 1 – P = 2 бар; 2 – P = 7 бар

Кількісний підрахунок синтезованих продуктів здійснюється з врахуванням атомних мас:

C : 72	48	24
H : 12	12	
O : 92	32	64
180	92	88

За вказаних співвідношень цукрів і діоксиду вуглецю розраховуються концентрації CO<sub>2</sub> в середовищах (табл. 2).

Таблиця 2. Концентрації CO<sub>2</sub>, що утворюються в середовищах за рахунок зброджування різних концентрацій цукрів, кг/м<sup>3</sup>

Масові концентрації цукрів, кг/м <sup>3</sup>														
8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
3,91	4,40	4,89	5,28	5,87	6,35	6,84	7,33	7,82	8,31	8,80	9,29	9,78	10,27	10,76

Якщо технологію бродіння пива здійснювати з орієнтиром на концентрацію CO<sub>2</sub> 4 г/л, як це відповідає стандарту, то початкова концентрація екстрактивних речовин повинна складати 8,18 г/л. Звідси витікає, що в процесі бродіння з кожного кубічного метра середовища виводиться CO<sub>2</sub> у кількості:

$$M_{CO_2} = 6,36 - 4,0 = 2,36 \text{ кг.}$$

Очевидно, що такі втрати матеріального потоку CO<sub>2</sub> є програмованими. На відміну від виробництва шампанського у цьому випадку контрольованою величиною у цільовому продукті є концентрація алкоголю, яка за відсутності втрат повинна була б складати:

$$M_{C_2H_5OH} = \frac{13 \cdot 92}{180} = 6,64 \text{ кг/м}^3.$$

Нагадування про втрати алкоголю пов'язані з тим, що вони дійсно мають місце в періоди виведення з середовища «зайвого» діоксиду вуглецю, який у своїй концентрації перевищує рівень насичення. Останній визначається тиском в системі, стабілізація якого означає досягнення певного значення  $CO_2$ . Якщо зброджування пива здійснюється у відкритих апаратах, то це означає поступові втрати діоксиду вуглецю в режимах ламінарних переміщень диспергованої газової фази. В герметизованих апаратах зниження тиску є відгуком на спрацювання запобіжних клапанів, що супроводжується швидкоплинною зміною гідродинаміки середовища. За сучасними рекомендаціями доброджування сусла має продовжуватися 6–7 діб при температурах від нуля до  $-1$  °C. Це повинно забезпечити концентрацію  $CO_2$  біля 5 г/л, що на 1 г/л перевищує нормативний показник. Проте перевищення останнього на 1 г/л створює резерв, який втрачається в наступних технологічних операціях.

До числа особливостей технологій зброджування пивного сусла, яке в класичному представленні поділяються власне на бродіння і доброджування відносяться два етапи. Першому етапу відповідають температури біля 6 °C (в сучасних прискорених технологіях — 12...14 °C). Це означає, що стан насичення на  $CO_2$  буде досягатися лише з певним часом, тим більше, що на заваді цьому процесу стоять осмотичні і температурні шоківі дії на дріжджові культури. Таким чином, динаміка накопичення  $CO_2$  безпосередньо пов'язана з швидкістю зброджування цукрів, яка у свою чергу залежить від температури середовища, присутності відповідних концентрацій цукру, компонентів азотного і фосфорного живлення, біостимуляторів, розчиненого кисню в період лаг-фази тощо. Перелік тільки наведених факторів впливу приводить до того, що в класичних технологіях на операцію бродіння відводиться 6...7 діб з відповідним досягненням на якийсь момент часу стану насичення середовища на  $CO_2$ .

В аеробних умовах синтезу мікроорганізмів, які створюються безперервним подаванням повітря, досягається повне за термодинамічними умовами насичення середовища азотом, динамічними рівнями розчинених кисню і діоксиду вуглецю. Якщо за таких умов здійснювати зміни тисків, то за складовою азоту реакція системи буде присутньою обов'язково, а реагування з боку розчиненого діоксиду вуглецю і кисню буде мати місце лише за умови виходу за показники термодинамічної рівноваги. При цьому важливо, що з точки зору інтересів забезпечення аеробних умов процес може відбуватися за різних середніх тисків, оскільки діапазон можливих робочих тисків у середовищах достатньо широкий [19]. Можливо з певністю стверджувати, що єдиним лімітуючим показником в цих умовах є енергетичні витрати, які зростають зі збільшенням тиску повітря, що подається на аерацію.

Важливим завданням газорідних систем в умовах культивування аеробних мікроорганізмів є створення інтенсивного масообміну за всіма складовими.

До них відносяться гомогенізація середовища за живильними компонентами, температурами, розчиненими газами, мікроорганізмами. При цьому мають досягатися деякі додаткові умови. Наприклад, для підвищення виходів хлібопекарських дріжджів концентрація розчинених цукрів має спрямовуватися до деякої мінімальної межі, а концентрація розчиненого кисню повинна складати біля 0,25 від стану насичення [4, 5]. Все це означає, що стан газорідного середовища повинен бути достатньо динамічним. Забезпечення останнього досягається введенням в рідинне культуральне середовище енергоматеріального потоку стиснутого повітря.

За анаеробного бродіння газова фаза і енергетичний потенціал створюються в процесі зброджування цукрів, тому динаміка накопичення газової фази і можливості впливу через неї на гідродинаміку і масообмін в середовищах відрізняються.

**Висновки.** 1. Рівень дисперсності газової фази в рідинному середовищі залежить від швидкості, з якою відбувається взаємодія фаз. Таку взаємодію належить організувати в режимі протитоку.

2. Обернення циркуляції газорідних контурів означає можливість перебування середовищ в режимах перехідних процесів із підвищенням показників газовмісту і утримуючої здатності по газовій фазі.

3. Генерування пульсаційних впливів на газорідні середовища в локальних зонах значних обсягів малоперспективне у зв'язку з їх дисипативними властивостями. Раціональним слід вважати зміну тисків у газовій фазі над культуральним середовищем. У зв'язку з розробленою теорією визначення частотних характеристик середовищ зовнішні впливи слід наближати до них за показником частоти.

### ЛІТЕРАТУРА

1. *Бродильний* апарат. Патент України на корисну модель № 47939, МПК С12F3/08 / Соколенко А.І., Шевченко О.Ю., Миколів І.М. та ін.; опубл. 25.02.2010. Бюл. № 4, 2010 р.
2. *Бродильний* апарат. Патент України на корисну модель № 47940, МПК С12F3/08 / Соколенко А.І., Шевченко О.Ю., Миколів І.М. та ін.; опубл. 25.02.2010. Бюл. № 4, 2010 р.
3. *Система* для одержання дифузійного соку. Патент України на винахід № 85414, МПК С13D1/00 / Соколенко А.І., Піддубний В.А., Шевченко О.Ю. та ін.; опубл. 26.01.2010. Бюл. № 2, 2009 р.
4. *Шиян П.Л.* Інноваційні технології спиртової промисловості. Теорія і практика / П.Л. Шиян, В.В. Сосницький, С.Т. Олійничук. — К.: Видавничий дім «Асканія», 2009. — 424 с.
5. *Технологія* спирту / В.О. Маринченко, В.А. Домарецький, П.Л. Шиян та ін. — Вінниця: «Поділля—2000», 2009. — 496 с.

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ТРАНСФОРМАЦИИ В ГАЗОЖИДКОСТНОЙ СИСТЕМАХ

**О.А. Чагайда**

*Національний університет харчових технологій*

*Дана информация про особенности энергетических трансформаций газожидкостных систем, которые создаются в результате принудительного введения в жидкостные среды газовой фазы или за счет возникновения последней в процессах брожения. Отмечены особенности энергетических трансформаций с возникновением внутренних циркуляционных контуров и градиентов концентраций растворенного  $CO_2$ . Также представлены соотношения между массовыми концентрациями сбраживаемых сахаров и объемами синтезированной газовой фазы и оценка прогнозируемых потерь спирта.*

**Ключевые слова:** *газожидкостная система, циркуляция, растворимость, трансформация, концентрация.*