

УДК 663.62

Піддубний В.А., доктор технічних наук,  
Національний університет харчових технологій

## **ЕНЕРГЕТИЧНІ ВПЛИВИ ЯВИЩ КОАЛІСЦЕНСІЇ ГАЗОВОЇ ФАЗИ**

*Досягнуто оцінки енергетичних впливів явищ коалісценсії, що супроводжують масовий барботаж газової фази через рідинне середовище, визначено можливості одержання високих рівнів дисперсності газової фази.*

*Ключові слова: енергія, потужність, коалісценсія, поверхня поділу, фаза, дисперсність, параметри.*

*Достигнута оценка энергетических воздействий явлений коалесценции, сопровождающих массовый барботаж газовой фазы через жидкостную среду, определены возможности получения высоких уровней дисперсности газовой фазы.*

*Ключевые слова: энергия, мощность, коалесценция, поверхность раздела, фаза, дисперсность, параметры.*

Процеси утворення поверхні поділу фаз в газорідинних середовищах є енергетичними і вони мають місце, наприклад, за барботажу газової фази або за десорбції діоксиду вуглецю з культуральних середовищ. У відповідності до принципу Ле Шательє відбуваються явища коалісценсії газових бульбашок [1-5]. Визначення рівнів змін енергетичних впливів склало завдання цього дослідження.

Десатурація середовища може відбуватися як за рахунок масообміну з наявною газовою фазою, так і з утворенням нових бульбашок. В обох випадках має місце коалісценсія, яка суттєво змінює міжфазну поверхню. Розглянемо енергетичні співвідношення, що супроводжують ці процеси.

На першому етапі цього пошуку зупинимося на оцінці питомих енергетичних характеристик газових бульбашок, визначаючи їх відношенням енергії  $E$  утворення поверхні поділу фаз  $f_6$  до об'єму бульбашки  $V_6$ :

$$E = \sigma f_6; \quad f_6 = \pi d^2; \quad V_6 = \frac{1}{6} \pi d^3;$$

$$\frac{E}{V_6} = \frac{6\sigma\pi d^2}{\pi d^3} = \frac{6\sigma}{d}. \quad (1)$$

де  $\sigma$  – коефіцієнт поверхневого натягу.

Разом з тим відомо, що складова Лапласівського тиску

$$p_L = \frac{4\sigma}{d}. \quad (2)$$

У відповідності з формулами (1) та (2) обидві характеристики відображаються еквідистантними гіперболами (див. рис.). Як бачимо, енергія формозміни бульбашок нарастає швидше, ніж внутрішній Лапласівський тиск зі зменшенням діаметра.

Розглянемо співвідношення параметрів системи з  $n$  бульбашок за їх коаліценсії.

Для них енергія утворення поверхні поділу фаз

$$E = n\sigma\pi d^2. \quad (3)$$

Їх коаліценсія приведе до нового утворення з тим же об'ємом з новим діаметром  $d_n$ . Тоді маємо

$$\frac{n}{6} \pi d^3 = \frac{1}{6} \pi d_n^3, \quad (4)$$

звідки

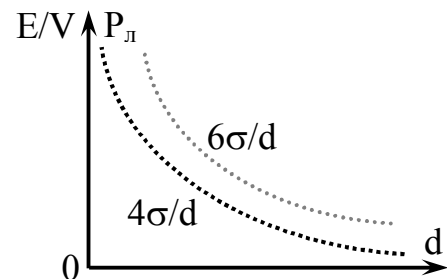
$$d_n = \sqrt[3]{n} d. \quad (5)$$

Тоді

$$E_n = \sigma\pi d_n^2 = \sigma\pi (\sqrt[3]{n} d)^2, \quad (6)$$

а співвідношення енергій

$$\frac{E}{E_n} = \frac{\pi n \sigma d^2}{\pi \sigma d^2 (\sqrt[3]{n})^2} = \frac{n}{(\sqrt[3]{n})^2} = \frac{\sqrt{n}}{\sqrt[3]{n}}. \quad (7)$$



Залежності питомих енерговитрат на утворення поверхні поділу фаз і Лапласівських тисків від діаметрів бульбашок

Результати розрахунків за формулою (7) наведені в табл. 1.

Таблиця 1. Співвідношення енергетичних параметрів

Параметри	Кількість бульбашок								
	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\sqrt{n}$	1,41	1,73	2	2,23	2,44	2,64	2,82	3	3,16
$\sqrt[3]{n} \sqrt[3]{n}$	1,26	1,44	1,58	1,71	1,81	1,91	2	2,08	2,15
$E/E_n$	1,12	1,2	1,26	1,30	1,34	1,38	1,41	1,44	1,47

Таким чином, явище коаліценсії супроводжується зміною енергетичного рівня системи і ця зміна пов'язана з переходом потенціальної енергії поверхні поділу фаз в кінетичну енергію рідинного середовища. За характером взаємодії між бульбашками у процесі коаліценсії можна стверджувати, що додаткова турбулізація середовища підвищує коефіцієнт масопередавання, але одночасно завершення процесу приводить до зменшення поверхні контактування фаз. У зв'язку з цим комплексну оцінку цього явища слід шукати за величиною об'ємного коефіцієнта масопередавання  $k_v$ . Разом з тим явище коаліценсії пов'язане зі збільшенням розмірів бульбашок по мірі їх піднімання і зменшення гідростатичного тиску.

Якщо погоджуватися на існування взаємозв'язку між рівнем дисперсності газової фази і енергетичним забезпеченням зон її утворення, то логічно припустити, що й існування бульбашок в режимі барботажу та проходження через культуральне середовище забезпечується підтриманням відповідного енергетичного рівня у всьому об'ємі. Про існування певних співвідношень на такому рівні відомо з багатьох спостережень і на нього ж вказує умова (1), за якою енергетичний потенціал газової бульбашки суттєво зростає зі зменшенням її діаметру.

Звідси витікає можливість суттєвого покращення рівня дисперсності газової фази за рахунок локалізації зони її утворення. До подібного ж висновку

можливо прийти аналізуючи роботу ежекційних масообмінних апаратів, диспергаторів тощо.

На підтвердження цієї думки оцінимо рівень потужності, що досягається в барботажних аераційних пристроях. У зв'язку з цим скористаємося параметрами, які відповідають апаратам для вирощування дріжджів.

Повітряний потік входить в контактування з рідинною фазою в зоні розташування барботажних елементів. При цьому з точки зору інтересів диспергування газової фази принципове значення має кінетична енергія системи, тоді як рівень стискання газової фази (тобто потенціальна енергія) на процес не впливає.

За кількості повітря, що подається на апарат, 7000 м<sup>3</sup>/год його масові витрати складуть

$$M_{\text{пов}} = \frac{V_{\text{г}} \rho_{\text{пов}}}{3600} = 2,51 \text{ кг/с.}$$

Потужність цього потоку визначається через швидкість, з якою він контактує з рідинною фазою:

$$N_{\text{пов}} = \frac{M_{\text{пов}} w^2}{2}. \quad (8)$$

В рекомендаціях, за якими пропонується вести розрахунок барботажних аераційних систем можна знайти широкий діапазон швидкості транспортування повітря від 8 до 15 м/с, аж до 25-30 м/с.

Орієнтуючись на наведену величину газового потоку 2,51 кг/с у табл. 2 наведено розрахунки за формулою (8).

*Таблиця 2.* Залежності потужностей щодо взаємодії з рідинною фазою газового потоку масовою пропускнуою здатністю 2,51 кг/с від швидкості

w, м/с	5	10	15	20	25	30	35	40	50
N <sub>пов</sub> , Вт	31,375	125,5	282,4	500	784,4	1129,5	1534	2008	3137

Раніше було показано [1], що для досягнення рівня дисперсності газової

фази 5 та 1 мм потужності енергії створення поверхні поділу фаз повинні складати відповідно

$$N_{0,005} = 0,57 \text{ кВт}; \quad N_{0,001} = 2,282 \text{ кВт}. \quad (9)$$

Порівнюючи ці результати з даними табл. 2, бачимо, що вони відповідають рівням швидкості біля 22 та 45 м/с. Проте маємо можливість визначити точні значення швидкостей:

$$w_{0,005} = \sqrt{\frac{2N_{0,005}}{M_{\text{пов}}}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 570}{2,51}} = 21,31 \text{ м/с};$$

$$w_{0,001} = \sqrt{\frac{2N_{0,001}}{M_{\text{пов}}}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 2282}{2,51}} = 47,4 \text{ м/с}.$$

За зазначених раніше розмірів газових бульбашок 0,0288 мм потужність створення поверхні поділу фаз складає

$$N_{0,0000288} = 29400 \text{ кВт}.$$

$$w_{0,0000288} = \sqrt{\frac{2 \cdot 29400}{2,51}} = 153,1 \text{ м/с}.$$

Одержані результати вказують на можливість суттєвого підвищення ефективності використання барботажних аераційних систем.

Діапазони швидкостей повітря до 40-50 м/с цілком можливі у досягненні з використанням сучасної техніки. Відомо, що з точки зору інтересів економічної ефективності використання повітроводів за показниками втрат тиску, рекомендований діапазон швидкостей складає 20-30 м/с.

Технологія досягнення зазначених умов з точки зору виконання барботажних систем повинна орієнтуватися саме на підвищення швидкостей в барботажних отворах, тоді як повітроводи і надалі можуть експлуатуватися зі значеннями швидкостей транспортування повітря 20-25 м/с. Розрахунок площі отворів барботажних елементів повинен враховувати зменшення об'ємних витрат газу за рахунок його стискання. Останній процес відбувається як швидкоплинний в компресорах або турбоповітродувних машинах, а тому його можна рахувати близьким до адіабатного, для якого за нашими умовами

$$\frac{p_2}{p_1} = \left( \frac{V_{r1}}{V_{r2}} \right)^k, \quad (10)$$

де  $p_1/p_2$  – співвідношення тисків;  $k$  – показник адиабати.

$$\sqrt[k]{\frac{p_2}{p_1}} = \frac{V_{r1}}{V_{r2}}; \quad V_{r2} = \frac{V_{r1}}{\sqrt[k]{\frac{p_2}{p_1}}}. \quad (11)$$

Тоді площа барботажних отворів складе

$$f_{\text{барб}} = \frac{V_{r2}}{w} = \frac{V_{r1}}{w \sqrt[k]{\frac{p_2}{p_1}}}. \quad (12)$$

Важливою перевагою пропозиції щодо підвищення енергетичного рівня зони формування поверхні поділу фаз є те, що ця локалізація стовідсотково стосується саме її. Додамо, що при цьому нівелюється залишкова роль впливу діаметрів барботажних отворів, який має обмежену роль при відносно обмежених швидкостях. Весь досвід і спроби використання керамічних, металокерамічних матеріалів для виготовлення барботажних елементів показали малопомітну їх ефективність в умовах високих рівнів аерації. Лише за обмеженої кількості газів, що транспортуються через них досягаються в якійсь мірі задовільні результати.

Поєднуючи інтереси технології виготовлення барботажних елементів і задовільного їх розташування по площі поперечного перерізу апарата слід погодитися з пропозиціями щодо діаметрів отворів 3-4 мм.

### **Висновки**

1. Явища коаліценсії газових бульбашок супроводжуються трансформацією потенціальної енергії утворення поверхні поділу фаз у кінематичну енергію рідинної фази.
2. Підвищення рівня дисперсності газової фази в рідинній пов'язано з локальним введенням енергії в зону утворення газової фази.
3. Для досягнення утворення газової фази з діаметрами бульбашок 2-3 мм

слід призначати швидкість газової фази в барботажних отворах ра рівні 40-50 м/с.

### *Література*

1. Піддубний В.А. Наукові основи і апаратурне оформлення перехідних процесів харчових і мікробіологічних виробництв. Автореф. дисерт. на здобуття ступеня докт. техн. наук. – К.: НУХТ. – 2008. – 47 с.
2. Дубінін О.О., Переяславцев О.М., Тахістова Г.О. Визначення швидкості внутрішньої циркуляції робочого середовища в ерліфтних апаратах // Харчова промисловість. – К.: НУХТ, – 2003. – № 2. с. 91-92.
3. Тахістова Г.О., Аністратенко В.О., Дубінін О.О. Аналітичне визначення мінімального швидкісного напору газової фази, при якому відбувається розрив вільної поверхні шару рідини // Наукові праці УДУХТ. – К.: УДУХТ. – 1998. – № 4. – С. 20-21.
4. Соколенко А.И. Исследование процессов аерации питательных сред и разработка новых конструкций дрожжерастильных аппаратов. – Дисс. на соиск. ученой ст. к.т.н., К.: КТИПП. – 1972. – 171 с.
5. Соколенко А.И., Украинец А.И., Яровой В.Л. и др. Справочник специалиста пищевых производств. – К.: АртЭк, 2003. – 432 с.