

УДК 534.6

Британ А.В.¹, к. ф.м., інж.,
Коробко О.В.¹, асп.*
Вербінська Г.М.¹, к. ф.м. н., доц.,
Гаврюшенко Д.А.¹, д. ф.м. н., проф.,
Голініченко Б.О.¹, студ.

Випаровування н-бутанолу в широкому інтервалі тисків

Здійснено виміри значень швидкості випаровування крапель спирту н-бутанолу в газовій суміші за тисків 30, 50, 100, 200, 400, 760 мм рт. ст. Побудовано залежності швидкості випаровування та температури краплин від оберненого тиску. Одержана залежність швидкості випаровування проаналізована за допомогою формули Максвелла з поправками. Розраховано значення коефіцієнта випаровування даної рідини.

Ключові слова: випаровування, н-бутанол, поправка на вільну конвекцію

¹Київський національний університет імені Тараса Шевченка, 03022, м. Київ, пр. Глушкова 4-б, *e-mail: oksana2208@i.ua

A. V. Brytan¹, PhD,
O. V. Korobko¹, PhD stud.*
G. M. Verbinska¹, PhD,
D. A. Gavryushenko¹, PhD, Prof,
B. O. Golinichenko¹, stud.

Butanol's evaporation for wide pressure interval

The evaporation rate of n-butanol alcohols' droplets was measured for the pressure values of 30, 50, 100, 200, 400, 760 mm Hg in a gas mixture. The dependences of drops' evaporation rate and temperature were obtained from reverse pressure. The experimental results were analyzed using Maxwell's formula, with corresponding corrections. Based on the obtained experimental data the values of the evaporation coefficient for test liquid was calculated.

Key Words: evaporation, n-butanol, the correction on the free convection

¹Taras Shevchenko National University of Kyiv, 03022, Kyiv, Glushkova st., 4-b,

*e-mail: oksana2208@i.ua

Статтю представив академік НАН України, д.ф.-м.н., проф. Булавін Л.А.

Дослідження характеристик спиртів є актуальним завданням сьогодення, адже області використання спиртів різноманітні, тому в роботі проведено дослідження по випаровуванню н-бутанолу як представника класу спиртів [1]. Варто відмітити, що н-бутанол використовується як розчинник фарб, лаків, натуральних та синтетичних смол, каучуків, рослинних масел та фарб. Він відіграє роль проміжної ланки в виробництві фармацевтичних препаратів. Використовується в галузях промисловості по виробництву шкіри, текстилю, парфумів, плащів, плівок для фотографування. Н-бутанол є складовою гальмівних рідин, промислових миючих засобів, фруктових ефірних масел, речовин для видалення фарби, фарбників.

Метою даної роботи є дослідження швидкості випаровування крапель спирту н-бутанолу, в діапазоні тисків 760-30 мм.рт. ст. в атмосфері азоту для значення температури

газової суміші 20 С⁰, проведення порівняння виразів для поправки на вільну конвекцію, одержаних різними авторами та розрахунок значення коефіцієнту випаровування досліджуваної рідини.

Теоретичні моделі процесу випаровування.

Перша модель для опису випаровування краплин рідинних систем була запропонована Максвеллом [2]. Ним було отримано залежність, що пов'язує масову швидкість випаровування краплин рідини та значення коефіцієнта дифузії досліджуваної речовини. Формула Максвелла може бути представлена у вигляді:

$$-\frac{dS}{dt} = \frac{8\pi D(C_0 - C_\infty)}{\rho} \quad (1)$$

де D – коефіцієнт дифузії пари в газовому середовищі для заданих значень температури і тиску, C_0 – концентрація насиченої пари, що

відповідає температурі поверхні краплі T_0 , C_∞ – концентрація пари на нескінченній відстані від краплі, ρ – густина рідини, $\frac{dS}{dt}$ – швидкість зміни площі краплі з часом.

Одержана Максвелом формула (1) не може в повній мірі описати процеси випаровування в реальних умовах. Тому виникає необхідність врахування поправок до формули Максвела.

Процес випаровування краплини в природному режимі призводить до її охолодження. Температура краплини знижується до моменту встановлення квазістаціонарного режиму випаровування [2]. Існування градієнту температури навколо краплини змушує взяти до уваги залежність коефіцієнта дифузії від температури для великих значень $(T_\infty - T_0)$, де T_∞ – температура фоновому газу на великій відстані від краплини. Коефіцієнт дифузії в (1) вданому випадку має розраховуватися за формулою $D = \sqrt{D_0 D_\infty}$.

Існування градієнту температур навколо краплини, що випаровується в гравітаційному полі, призводить до виникнення гідродинамічного потоку від поверхні краплини, який прискорює її випаровування. Дане явище отримало назву вільної конвекції [3]. Аналітичне врахування цього ефекту є складним, в зв'язку з цим для опису даного ефекту використовується теорія подібності. Фізичні властивості середовища, де відбувається дифузія характеризують за допомогою критерія Шмідта: $Sc = \frac{\nu}{D}$, де ν – кінетична в'язкість, а D – коефіцієнт дифузії, та критерія Грасгофа $Gr = \frac{8gr^3 \Delta T}{\nu^2 T}$ – де g – прискорення вільного падіння, та ΔT – різниця температур, що викликає процес конвекції. Фреслінгом [2] було запропоновано вираз для поправки на вільну конвекцію для випадку тепловіддачі металевій кулі, однак вираз використовується для аналізу експериментальних даних з випаровування (2):

$$Sh = 2 + 0.6Sc^{\frac{1}{3}}Gr^{\frac{1}{4}} \quad (2)$$

Пізніше Черчілем [4] було запропоновано модифікований вираз для опису вільної конвекції (3):

$$Sh = 2 + \frac{0.59(Sc*Gr)^{1/4}}{\left(1 + \left(\frac{0.47}{Sc}\right)^{9/16}\right)^{4/9}} \quad (3)$$

Для тисків, значно менших за атмосферний ($p < 100$ мм рт ст), виникає відхилення від рівняння Максвела, обумовлене існуванням макроскопічного стрибку концентрації, який зростає при інтенсивному випаровуванні крапель. Фукс отримав вираз для поправки до формули Максвела на стрибок концентрації (поправка Фукса) [2, 5]. Отримана поправка має вигляд

$$I_m = \frac{I_0}{\frac{D}{ru\alpha} + 1} \quad (4)$$

де I_0 – швидкість випаровування за формулою Максвела., r – радіус краплі, $u = v/4$ – четверта частина середньої теплової швидкості молекул пари, $v = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}}$.

Іншим ефектом, суттєвим за малих тисків є стефанівський потік: поблизу поверхні краплі, що випаровується, повинен існувати гідродинамічний потік фоновому газу, направлений від поверхні. Цю поправку можна записати у вигляді:

$$St = \left(1 + \frac{P_0 + P_\infty}{2P}\right) \quad (5)$$

де P – повний тиск середовища, P_0 – тиск пари на поверхні краплі, що випаровується, P_∞ – тиск пари на нескінченності.

Урахування даних поправок дозволяє записати узагальнену формулу Максвела для випаровування:

$$-\frac{dS}{dt} = \frac{8\pi D(C_0 - C_\infty)}{\rho \left(1 + \frac{D}{ru\alpha}\right)} \left(1 + \frac{P_0 + P_\infty}{2P}\right) Sh \quad (6)$$

Використання виразу, отриманого Фуксом, при аналізі експериментальних даних дає можливість розрахунку коефіцієнта випаровування рідини.

Аналіз отриманих експериментальних результатів. Порівняння з теоретичними моделями.

Дослідження проводились за допомогою експериментальної установки, схему якої та

методику виконання експерименту детально представлено в роботі [6]. Було проведено дослідження випаровування н-бутанолу в діапазоні тисків 30-760 мм рт. ст., за значень температури фонового газу 293 К, з початковим діаметром краплини $d_0 \approx 2,4$ мм. На основі проведених вимірів було побудовано залежності зміни площі краплини з часом та її температури на рис. 1, 2. відповідно.

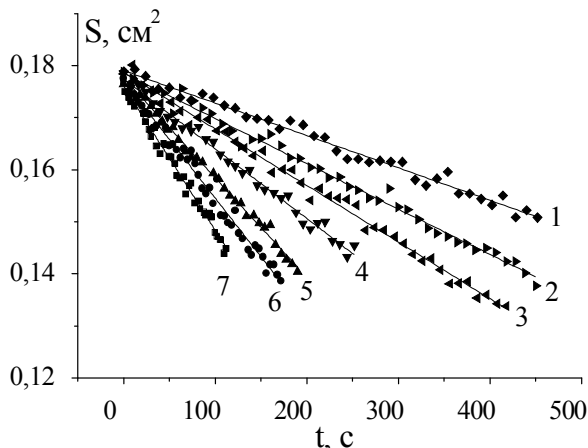


Рис. 1. Залежності площі поверхні краплини, що випаровується від часу для різних значень тиску в газовій суміші: 1-760, 2-400, 3-300, 4-200, 5-100, 6-50, 7-30 мм рт. ст.

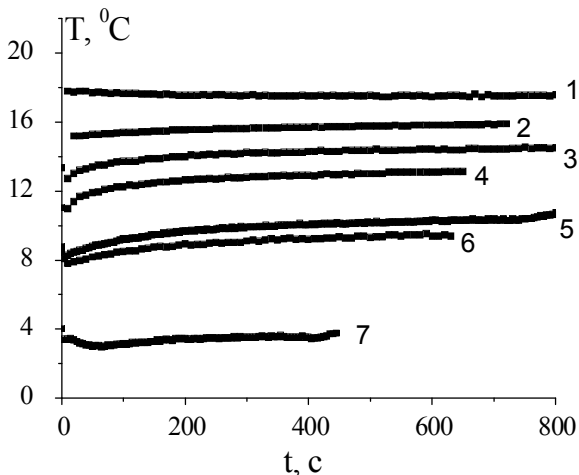


Рис. 2. Залежності температури краплини, що випаровується від часу для різних значень тиску в газовій суміші: 1-760, 2-400, 3-300, 4-200, 5-100, 6-50, 7-30 мм рт. ст.

З рис. 2 можна зробити висновок, що для випадку н-бутанолу встановлення квазістаціонарного режиму випаровування, для якого характерна слабка зміна температури краплини протягом випаровування, відбувається впродовж перших 100 секунд випаровування.

В таблиці 1 наводиться порівняння розрахованих за використанням формули

Максвелла без урахування поправки на вільну конвекцію (2), з урахуванням даної поправки за використанням формули Фреслінга (3) та формули Черчілля (4) значень швидкості випаровування з експериментальними даними (1).

Таблиця 1

Значення швидкості випаровування н-бутанолу для різних значень тиску в суміші: одержані експериментально та розраховані за використанням різних модифікацій формули Максвелла

P, мм рт.ст.	Значення швидкості випаровування н-бутанолу $dS/dt * 10^5, \text{cm}^2/\text{c}$,			
	1	2	3	4
760	6,20	4,33	6,75	6,23
400	8,35	6,61	8,91	8,41
300	10,95	8,02	11,16	10,5
200	13,41	10,18	13,62	12,90
100	18,64	16,07	20,04	19,2
50	25,27	22,23	25,82	24,9
30	31,18	24,57	27,45	26,63

З представлених в таблиці результатів можна зробити висновок, що для випадку випаровування н-бутанолу неврахування вільної конвекції призводить до занижених порівняно з експериментом результатів. Використання поправки Фреслінга дає більш гарне узгодження з експериментом. Однак розраховані за її допомогою значення швидкості випаровування є дещо завищеними. Використання формули Черчілля дає найкраще узгодження теорії з експериментом. Поправка на вільну конвекцію у формі Черчілля була використана в модифікованій формулі Максвелла (6) при розрахунку коефіцієнта випаровування н-бутанолу (рис. 3) Було одержано значення коефіцієнта випаровування $\alpha = 0,004$.

Поправка Черчілля була використана для розрахунку різниці температур між краплиною та фоновим газом за використанням рівнянь теплового балансу. Одержані дані представлені в таблиці 2.

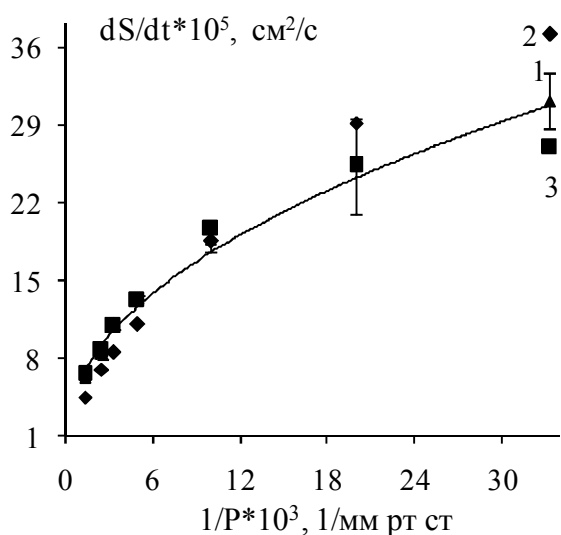


Рис. 3. Залежність швидкості випаровування від оберненого тиску: 1 – одержана експериментально; 2 – розрахована за формулою Максвела. 3 – за формулою

Таблиця 2

Рівноважні значення температури краплини: експериментальні – T_e , та розраховані – T_p .

P, мм рт ст	760	400	300	200	100
T_e , °C	17,5	15,2	14	12,1	9,9
T_p , °C	17,5	15,6	14,1	11,3	2,3

Як видно з таблиці 2, за тисків, близьких до атмосферного, спостерігається співпадіння експериментальних значень температури краплини з теоретично розрахованими. Це дозволяє зробити висновок про те, що потік тепла до краплини, що випаровується, існує через навколишнє газове середовище, а потоком через ніжки підвісу можна знехтувати.

Значне розходження між експериментальним та теоретично розрахованим значеннями температури при значенні тиску 100 мм рт ст. зумовлено виникненням стрибка концентрації та, відповідно, стрибка градієнта температури, врахування якого потребує більш детального розгляду.

Результати та висновки

Досліджено процес випаровування спирту н-бутанолу в атмосфері азоту в діапазоні

тисків 760-30 мм рт ст. при температурі фонового газу 293 К.

Показано, необхідність врахування вільної конвекції для опису процесу випаровування.

Проаналізовано вирази різних авторів для опису цього ефекту. Показано, що вираз запропонований Черчілем більш якісно враховує даний ефект. За використанням модифікованої формули Масвела обрховано коефіцієнт випаровування н-бутанолу.

З використанням рівнянь теплового балансу розраховано квазірівноважні температури краплини під час її випаровування для різних значень тиску в газовій суміші. Проведено їх порівняння з даними експерименту. Показано, що тепловий потік до краплини відбувається за рахунок теплообміну через газове середовище. Потоком тепла через підвіс на якому знаходиться краплина можна знехтувати.

Список використаних джерел

- [online resource] access mode: <http://spektrresurssp.ru/rastvor/butanol.html>. 04.2013
- N.A. Fuks, Evaporation and Growth of Droplets in a Gaseous Medium / Fuks N.A. – M.:USSR Acad.Sci.Publ. House, Moscow, 1954. (in Russian)
- Bird R.B. Transport Phenomena / R.B. Bird, W.E. Stewart, E.N. Lightfoot – John Wiley & Sons, New York, 2001.
- Churchill S.W. Free Convection around Immersed Bodies / S.W. Churchill // Heat Exchanger Design Handbook – Hemisphere Publishing, New York, 1983.
- Bulavin L.A. Kinetics of Liquid Droplet Evaporation in a Vapor-Gas Medium / L.A. Bulavin, G.M. Verbinska, V.M. Nuzhnyi. – Kyiv: Univ., Kyiv, 2003. (in Ukrainian)
- Water and nitrobenzene droplets evaporation under ultraviolet irradiation / G.M. Verbinska, A.V. Brytan, V.L. Karbovskiy, T.V. Cleshchonok // Physics of aerodisperse systems. – 2010. – N 47.– P.49-58. (in Ukrainian)

Надійшла до редколегії 03.04.2013