

УДК 536.422.1:621.565.8

ЖЕЛІБА Ю.О., канд. техн. наук, доцент; ХАРЧЕНКО С.В., асистент
Навчально-науковий інститут холоду, кріотехнологій та екоенергетики

АПРОБАЦІЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ТЕПЛОВОЛОГІСНИХ ПРОЦЕСІВ ВИПАРОВУВАННЯ

Стаття присвячена порівняльному аналізу розрахункових та експериментальних даних, щодо формування різниці температур між сухим та мокрим термометрами під час випаровування досліджуваної рідини в газове середовище. Експеримент реалізовано в психрометричних умовах при тисках нижче однієї атмосфери.

Ключові слова: апробація математичної моделі – ізобарно-ізоентальпійна теорія – тепловологісний процес – експериментальне дослідження – вода – нафталін – чотирьоххлористий вуглець

This paper describes calculation and experimental data comparative analysis for temperature difference formation in between dry-bulb thermometer and wet-bulb thermometer for experimental liquid evaporation in the gaseous medium. The Experimental Study is conducted for psychrometric conditions, for pressure below of one atmosphere.

Keywords: mathematical model – isobar-isoenthalpic theory – heat and humidity evaporation processes – experimental study – water – naphthalene – carbon tetrachloride

Процес випаровування рідини, сублімації твердого тіла в газове середовище – явище, що знаходиться в основі фазового перетворення рідина – пара, тверде тіло – пара, коли газовим середовищем є насичена пара самої рідини, твердого тіла. В разі, коли рідина, що випаровується або тверде тіло, що сублімує, збагачує газове середовище з відмінними від рідини, твердого тіла компонентами, прийнято такий процес визначати просто як “випаровування”. Цей же процес полягає в основі психрометричних явищ, кількісний опис яких становить значний практичний інтерес. В якості носія вологої компоненти, що випаровується, виступає батистова тканина. Її поверхню випаровування моделює поверхню капілярно-пористого тіла, якою також є харчова сировина. Процес випаровування (сублімації) в газове середовище розглядається як результат взаємодії (теплосамообміну) потоку газового середовища з поверхнею капілярно-пористого тіла. Класичним експериментом по дослідженню тепловологісних процесів, який проведено в різних наукових лабораторіях, є експеримент по визначенню різниці температур сухого та мокрого термометрів у залежності від стану газового середовища, в яке йде випаровування. Апробація термодинамічної теорії тепловологісних процесів описаної в [1] проводилася шляхом співставлення власних експериментальних і розрахункових даних.

Експериментальне дослідження проводилося на вакуумному стенді, в якому було реалізовано психрометричні умови випаровування досліджуваних речовин. Детально експериментальний стенд для виміру різниці температур сухого та мокрого термометрів під час випаровування або сублімації робочої речовини в потік газу та умови проведення експерименту детально описано в [2].

Отримані якісні експериментальні дані щодо різниці температур сухого та мокрого термометрів бу-

дуть підставою для апробації можливостей розробленого експериментального стенду та методик вимірювання характеристик стану газового середовища. Кінцевий результат проведення апробації розробленої термодинамічної теорії [1] полягає у вимірюванні різниці температур між сухим та мокрим термометром досліджуваної речовини та співставленні експериментальних та розрахункових даних з випаровування рідин (речовин), відмінних від води. Такими речовинами, що доступні для проведення експерименту та не киплять при кімнатних температурах і тиску нижче за 1 атм, є наприклад чотирьоххлористий вуглець та нафталін. Вибір саме цих речовин зумовлено тим, що вони не піддаються фазовим перетворенням при параметрах проведення експерименту (температури від 15 до 34 °С, та тисках нижче атмосферного), а також наявністю для них рівнянь стану в вірній формі.

У роботі [2] були проведені експериментальні дослідження випаровування (сублімації) нафталіну (C₁₀H₈), чотирьоххлористого вуглецю (CCl₄), води (H₂O) в різноманітні газові середовища, такі як азот, діоксид вуглецю, атмосферне повітря. При випаровуванні (сублімації) у середовище діоксиду вуглецю (CO₂) та азоту (N₂) початкова вологість газу по досліджуваним речовинам, що випаровуються, дорівнювала нулю, а кінцева одиниці.

Таблиця 1

Різниця температур сухого та мокрого термометрів в атмосферному повітрі при різних значеннях його температури (°С) і відносної вологості

	φ	1	2	3
$T_{\text{сух}} = -30,0$	0,2	0,5	0,4	0,5
	0,4	0,3	0,3	0,4
	0,6	0,2	0,2	0,2
	0,8	0,1	0,1	0,1
$T_{\text{сух}} = -20,0$	0,2	0,1	1	1,2
	0,4	0,8	0,7	0,9
	0,6	0,6	0,5	0,6
	0,8	0,3	0,2	0,3
$T_{\text{сух}} = -10,0$	0,2	2,4	2,1	2,7
	0,4	1,8	1,6	2
	0,6	1,2	1,1	1,3
	0,8	0,6	0,5	0,7
$T_{\text{сух}} = -0,0$	0,2	4,5	4	4,9
	0,4	3,3	3	3,6
	0,6	2,2	2	2,4
	0,8	1,1	1	1,2
$T_{\text{сух}} = 0,0$	0,2	4,7	4,2	5,1
	0,4	3,5	3,1	3,8
	0,6	2,3	2,1	2,5
	0,8	1,2	1	1
$T_{\text{сух}} = 10,0$	0,2	7,4	6,7	7,5
	0,4	5,4	4,9	5,5
	0,6	3,5	3,2	3,6
	0,8	1,7	1,6	1,7
$T_{\text{сух}} = 20,0$	0,2	11	9,8	11
	0,4	7,6	7	7,7
	0,6	4,9	4,5	4,9
	0,8	2,4	2,2	2,4
$T_{\text{сух}} = 30,0$	0,2	14	13	14
	0,4	9,9	9,3	10
	0,6	6,2	5,9	6,3
	0,8	2,9	2,8	3

1 – ГОСТ 8.524-85 (аспіраційний психрометр Ар=7.947e-4).

2 – ГОСТ 8.524-85 (станційний психрометр Ар=6.620e-4).

3 – розрахункові дані

Перед тим як проводити апробацію математичної моделі [1] на власних експериментальних даних, нами було проведено співставлення розрахункових даних з даними, що задекларовано в нормативних документах [3]. Ці дані з властивості вологого повітря загально визнані, та експериментально підтверджені в різних лабораторіях світу.

Порівняння розрахункових до стандартизованих даних наведено в таблиці 1.

Порівняння розрахункових та власних експериментальних даних при різних умовах випаровування та різних комбінаціях речовин та газових середовищ наведено в таблицях 2-8.

Таблиця 2

Порівняння розрахункових та експериментальних даних по випаровуванню води в атмосферне повітря при різних тисках

P^E мБар	t_c^a °C	t_m^a °C	ϕ^a -	t_c^E °C	t_m^E °C	ϕ^E -	Δt^E °C	$\Delta t^{poz.}$ °C
989,00	34,2	22,4	0,325	32,73	24,49	0,317	8,24	9,87
894,50	34,2	22,4	0,325	32,60	23,41	0,287	9,19	12,94
795,00	34,2	22,4	0,325	32,49	22,14	0,255	10,35	14,17
730,60	34,2	22,4	0,325	32,39	21,19	0,234	11,20	15,09
698,65	34,2	22,4	0,325	32,35	20,52	0,224	11,83	15,56
597,50	34,6	22,6	0,321	32,22	18,65	0,189	13,57	17,34
472,00	34,6	22,6	0,321	31,97	15,99	0,15	15,98	19,83
405,80	33,6	22,2	0,336	31,85	14,36	0,135	17,49	21,24
338,65	34,4	22,6	0,328	31,66	12,22	0,11	19,43	23,31
274,00	34,4	22,6	0,328	31,48	10,27	0,089	21,20	25,6
193,00	34,4	23,0	0,346	31,18	6,64	0,066	24,54	29,4
129,00	34,4	23,0	0,346	30,70	2,43	0,044	28,27	33,18

Індекс 'а' відповідає параметрам атмосферного повітря на вході до робочого осередку, 'E' – експериментальні дані, 'Poz.' – Розрахункові дані, t_c , t_m – температури сухого та мокрого термометрів відповідно, Δt – різниця температур між сухим та мокрим термометрами, ϕ – відносна вологість атмосферного повітря.

Таблиця 3

Порівняння розрахункових та експериментальних даних при випаровуванні води в середовище азоту при різних тисках

P, мБар	T_c , °C	T_m , °C	Δt^E	$\Delta t^{poz.}$
836	23,35	10,14	13,72	14,52
843	23,37	10,164	13,74	14,53
697	23,19	8,69	15,05	15,87
524	22,95	6,63	16,74	17,46
541	23	6,74	16,68	17,51
400	22,91	4,57	18,36	19,11
132	21,45	-4,66	26,23	27,07

Порівняння розрахункових та експериментальних даних при випаровуванні чотирьоххлористого вуглецю в середовище двоокису вуглецю при різних тисках (CCl_4 в CO_2) представлені в таблиці 4.

Порівняння розрахункових та експериментальних даних при випаровуванні чотирьоххлористого вуглецю в середовище азоту при різних тисках (CCl_4 в N_2) представлені в таблиці 5.

Таблиця 4

P, мБар	T_c , °C	T_m , °C	Δt^E	$\Delta t^{poz.}$
962	22,859	8,9	13,95	15,75
962	22,96	8,8	14,16	16,16
801	22,879	7,22	15,65	17,55
799	22,782	7,1	15,67	17,62
690	22,96	7,6	15,36	17,23
696	22,906	6,18	16,72	18,61
698,6	22,906	6,93	15,98	17,88
468,5	22,825	4,49	18,33	20,33
470	22,879	4,65	18,23	20,53
473,5	22,852	4,63	18,22	20,17
331,5	22,69	2,04	20,65	22,75
335	22,74	2,05	20,68	22,81
198	22,5	-1,42	23,92	26,1

Таблиця 5

P, мБар	T_c , °C	T_m , °C	Δt^E	$\Delta t^{poz.}$
920	16,08	3,77	12,31	14,11
675	15,73	1,94	13,8	15,8
564,25	15,76	0,83	14,93	16,88
465	15,46	-0,73	16,2	18,1
342,5	15,16	-2,83	18,0	20,1

Порівняння розрахункових та експериментальних даних при випаровуванні нафталіну в середовище двоокису вуглецю при різних тисках ($C_{10}H_8$ в CO_2) представлені в таблиці 6.

Таблиця 6

P, мБар	T_c , °C	T_m , °C	Δt^E	$\Delta t^{poz.}$
736	26,9	26,79	0,11	0,3
733,25	26,95	26,84	0,11	0,301
935	39,43	38,09	1,34	0,85
918	40,67	39,49	1,18	0,96

Таблиця 7

P, мБар	T_c , °C	T_m , °C	Δt^E	$\Delta t^{poz.}$
359,5	28,11	27,8	0,31	0,75
620	28,08	27,86	0,22	0,44
782,75	28,03	27,84	0,19	0,35
904	38,44	36,83	1,61	0,81

Порівняння розрахункових та експериментальних даних при випаровуванні нафталіну в середовище двоокису вуглецю при різних тисках ($C_{10}H_8$ в CO_2) представлені в таблиці 7.

Порівняння розрахункових та експериментальних даних при випаровуванні нафталіну в середовище двоокису вуглецю при різних тисках ($C_{10}H_8$ в CO_2) представлені в таблиці 8.

Таблиця 8

P, мБар	T_c , °C	T_m , °C	Δt^E	$\Delta t^{poz.}$
80	39,28	34,41	4,87	6
80	39,3	34,49	4,81	6,13
77,5	39,15	34,38	4,77	6,17
78,5	39,4	34,7	4,7	6,18
162,5	40,81	34,73	6,08	4,15
161,6	40,81	34,73	6,08	4,21
290	42,47	39,84	2,63	3,15
287	42,14	39,82	2,32	3,02
426	43,86	42,02	1,84	2,16
434,5	43,78	42,08	1,7	2,3
625	45,83	43,53	2,3	1,87
634	45,54	43,53	2,01	1,95

ВИСНОВКИ

На базі отриманих чисельних експериментальних даних по розчинності різних речовин у газове середовище різного складу проведено апробацію теоретично обґрунтованих співвідношень [1] для прогнозування характеристик тепловологісних процесів випаровування рідини з поверхні капілярно-пористого тіла (харчової сировини чи продукту) в різних холодильних технологіях. Для підвищення впевненості в роботоспроможності математичної моделі зроблено співставлення стандартизованих даних по випаровуванню води в атмосферне повіт-

ря з власними розрахунковими, отриманими для тих же умов. Проведені експерименти в широкому діапазоні тисків, температур та комбінацій речовин і газових середовищ в яке проходило випаровування дають змогу комплексно провести апробацію термодинамічної моделі [1]. Експериментальні та розрахункові дані добре корелюють між собою. Ці результати ще раз свідчать про ефективність запропонованої термодинамічної теорії тепловологісних процесів, та правильність обраних припущень при розрахунках та умов проведення експерименту.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Оніщенко, В.П. Математичне моделювання тепловологісних процесів випаровування [Текст] / В.П. Оніщенко, Ю.О. Желіба, С.В. Харченко // Харчова наука і технологія, Одеса, вид. ОНАХТ, - №1 (22)*2013.-с. 97-100.
2. Оніщенко, В.П. Експериментальне дослідження розчинності в газове середовище довільного складу [Текст] / В.П. Оніщенко, Ю.О. Желіба, М.В. Оніщенко // Холодильна техніка і технологія, Науково-технічний журнал № 3 (137) 2012, с. 57-62
3. ГОСТ 8.524-85. Таблицы психрометрические. Построение, содержание, расчетные соотношения. - Введ. 01.01.1985. - М.: Изд-во станд., 1985.-34 с.

Отримано редакцією 08.2013 р.