

Харченко С.В., Желіба Ю.О., Онiщенко В.П.Одеська національна академія харчових технологій
E-mail: ogah-intit@yandex.ua**Термодинамічна теорія процесів випаровування. Математичне моделювання та апробація.**

Стаття присвячена математичному моделюванню процесів випаровування рідин з поверхні капілярно пористого тіла та сублімації твердих речовин в газове середовище довільного складу. Моделювання проходить у рамках висунутої авторами ізобарно-ізоентальпійної теорії протікання процесів випаровування. В основу методики покладено теоретично обґрунтовані рівняння стану з віральними коефіцієнтами.

Вступ. Процеси випаровування зустрічаються як у природі, так і в технологічних процесах. Вони визначають енергетичні та технічні характеристики обладнання, природні втрати сировини й продукції від усихання та мікробіологічного псування. Певна річ, що ці процеси викликають інтерес до більш детального вивчення. Емпіричні та дифузійні підходи моделювання цих процесів не можна вважати надійними. Тому актуальною залишається задача розробки єдиного термодинамічного та теоретично обґрунтованого підходу до моделювання тепловологісних процесів випаровування, який дозволить надійно прогнозувати температурні, енергетичні та масові ефекти під час випаровування [1].

Результати. Представлена математична модель базується на тому, що процес випаровування розглядається як ізобарно-ізоентальпійний [2]. Приймається, наприклад, що ентальпійні втрати змоченої кульки термометра за рахунок випаровування рідини у потік газу компенсуються притоком теплоти від газу, а саме газ вбирає в себе пару рідини в максимально можливій кількості, до досягнення відносної вологості рівної одиниці. Під вологим компонентом розуміємо речовину, якою насичується газове середовище у тепловологісному процесі.

Для опису газової суміші, що містить тільки один компонент, який терпить фазове перетворення рідина-газ (в заданому діапазоні температур), введемо такі її характеристики: барометричний (загальний) тиск газової суміші – P , (Па); температура – T , (К); концентрації компонент. Оскільки «волога» компонента тільки одна, достатньо поняття абсолютного вологовмісту d , (кг_{«вологи»}/кг_{«сух.ч.»}); молекулярні маси компонент μ (всього N найменувань); відносна вологість газової суміші (по N -ій компоненті суміші) $\varphi = \frac{P_N}{p(T)_N}$.

Термічне рівняння стану повинно дати взаємозв'язок між зазначеними характеристиками газової суміші. Якщо $G_{\text{сух}}$ – маса «сухої» частини газової суміші, а G_N – маса «вологої», то вологовміст d_N буде визначатись як відношення

$$d_N = \frac{G_N}{G_{\text{сyx}}}$$

Звідси виразимо масу «вологої» частини газової суміші: $G_N = d_N G_{\text{сyx}}$. Відповідна кількість молів кожного з компонент газовой суміші буде дорівнювати $N_k = \frac{G_k}{\mu_k}$, де $k = 1 \div (N-1)$ – компоненти «сухої» частини; μ_k – молекулярні маси компонент «сухої» частки газу.

Аналогічно можна записати вираз для кількості молів «вологого» компонента газовой суміші: $N_N = \frac{G_N}{\mu_N}$.

Через число молів компонент співвідношення між характеристиками газовой суміші з одним вологим компонентом в ідеально-газовому наближенні:

$$\frac{P_N \cdot V}{R \cdot T} = N_N = \frac{G_N}{\mu_N},$$

де V – загальний об'єм газовой суміші, м³.

Враховуючи, що $G_N = d_N G_{\text{сyx}}$, одержимо:

$$\frac{P_N \cdot V}{R \cdot T} = \frac{d_N \cdot G_{\text{сyx}}}{\mu_N}$$

З рівняння стану для «сухої» частини газовой суміші виразимо її масу:

$$G_{\text{сyx}} = \frac{P_{\text{сyx}} \cdot V \cdot \mu_{\text{сyx}}}{R \cdot T}$$

Об'єднуючи два останні вирази, отримаємо зв'язок між парціальними тисками «вологої» та «сухої» частин суміші:

$$P_N \cdot \mu_N = d_N \cdot P_{\text{сyx}} \cdot \mu_{\text{сyx}} \quad \text{або} \quad P_N \cdot \mu_N = d_N \cdot (P - P_N) \cdot \mu_{\text{сyx}}$$

Тепер вологовміст можна визначити за формулою:

$$d_N = \frac{P_N \cdot \mu_N}{(P - P_N) \cdot \mu_{\text{сyx}}}$$

Якщо відносну вологість газовой суміші приблизно записати як $\varphi = \frac{P_N}{P_N^*(T)}$,

то одержимо:

$$d_N = \frac{P_N^*(T) \cdot \mu_N}{(P - \varphi \cdot P_N^*(T)) \cdot \mu_{\text{сyx}}} \quad (1)$$

Завдяки засвоєнню води в тепловологісному процесі повітря є об'єктом змінної маси. Саме це вимагає використовувати термодинамічний потенціал для відображення термодинамічних параметрів вологого повітря.

Зміну питомої ентальпії Δi вологовміщуючої газовой суміші в тепловологісному процесі можна подати у вигляді повного диференціалу:

$$\Delta i = \left(\frac{\partial i}{\partial T} \right)_{P,d} \Delta T + \left(\frac{\partial i}{\partial d} \right)_{P,T} \Delta d + \left(\frac{\partial i}{\partial P} \right)_{T,d} \Delta P,$$

звідки можна отримати вираз для зміни вологовмісту газової суміші:

$$\Delta d = \frac{\Delta i - \left(\frac{\partial i}{\partial p}\right)_{\varphi,d} \cdot \Delta P - \left(\frac{\partial i}{\partial \varphi}\right)_{P,d} \cdot \Delta \varphi}{\left(\frac{\partial i}{\partial d}\right)_{P,\varphi}}. \quad (2)$$

Вираз (2) справедливий, якщо питому ентальпію розглядати як функцію трьох незалежних змінних стану газової суміші температури T , тиску P та вологовмісту d . У разі, якщо ж ентальпію розглядати як функцію P , d та відносної вологості φ , то аналогічно можна записати:

$$\Delta d = \frac{\Delta i - \left(\frac{\partial i}{\partial p}\right)_{T,d} \cdot \Delta P - \left(\frac{\partial i}{\partial T}\right)_{P,d} \cdot \Delta T}{\left(\frac{\partial i}{\partial d}\right)_{P,T}}. \quad (3)$$

Комбінуючи (2) та (3), одержимо вираз для Δd :

$$\Delta d = \frac{c_{\text{вол.н}} \cdot \Delta T - \left(\frac{\partial i}{\partial \varphi}\right)_{P,d} \cdot \Delta \varphi - \left[\left(\frac{\partial i}{\partial P}\right)_{P,\varphi} - \left(\frac{\partial i}{\partial P}\right)_{T,d} \right] \cdot \Delta P}{\left(\frac{\partial i}{\partial d}\right)_{P,\varphi} - i_{H_2O}(P,T)}, \quad (4)$$

де враховано, що $\left(\frac{\partial i}{\partial T}\right)_{P,d} = c_{\text{вол.н}}$ – питома теплоємність вологого повітря, а

$\left(\frac{\partial i}{\partial d}\right)_{P,T} = i_{H_2O}(P,T)$ – питома ентальпія водяної пари. У такому разі розрахунок

Δd необхідно проводити через розрахунок температурних (ентальпійних) полів об'єктів.

Таким чином, розрахунок кількості вологи, що може засвоїти газове середовище в тепловологісному процесі, потребує розрахунку шести тепловологісних похідних ентальпії газових сумішей, дві з яких $c_{\text{вол.н}}$, $i_{H_2O}(P,T)$ є традиційними в теорії кондиціонування повітря. У реальних технологічних умовах змінами загального барометричного тиску ΔP повітря здебільшого можна знехтувати, а з ним і двома похідними ентальпії по тиску. Тому для розрахунків кількості вологи, що засвоює газове середовище в тепловологісному процесі холодильних технологій достатньо знати дві похідні ентальпії $\left(\frac{\partial i}{\partial \varphi}\right)_{P,d}$ та $\left(\frac{\partial i}{\partial d}\right)_{P,\varphi}$.

Вони, як і величини $c_{\text{вол.н}}$, $i_{H_2O}(P,T)$ є термодинамічними функціями стану газових сумішей (повітря) і можуть бути розраховані при наявності рівняння стану в P – p – T – d зображенні ідеально-газових функцій компонент газової суміші.

Знайдемо тепловологісні похідні ентальпії газової суміші з одним «вологим» компонентом в ідеально-газовому наближенні. Найбільш складний для

розрахунку тепловолігнісний процес – випаровування якоїсь рідини, чи її конденсація у вологому повітрі, п'ятикомпонентної суміші ($N_2+O_2+CO_2+Ar+H_2O$). Можна ці гази пронумерувати в подальшому чисельному алгоритмі: $N_2 - k = 1$; $O_2 - k = 2$; $CO_2 - k = 3$; $Ar - k = 4$; $H_2O - k = 5$.

Якщо зміни температури такої газової суміші не супроводжуються конденсацією H_2O , то питому ентальпію цієї суміші можна записати як:

$$i_0(P, T, d) = \sum_{k=1}^4 \frac{m_k}{(1+d) \cdot \sum_{j=1}^4 m_j} \cdot i_{0k}(T) + \frac{d}{1+d} \cdot i_N(T), \quad (5)$$

де індекси k, j відносяться до компонент «сухої» частини, індекс N – до «влагої» частини; $m_k, k=1 \div 4$ – маси компонент сухої частини ($\sum_{k=1}^4 m_k = 1$, кг); індекс o – ідеальний газ.

Оскільки в (5) незалежних змінних три, то часткові похідні ентальпії мають сенс при постійних значеннях "інших" двох змінних, зокрема, похідна $\left(\frac{\partial i}{\partial T}\right)_{P,d}$ буде мати сенс питомої ізобарної теплоємності газової суміші:

$$c_P^0 = \left(\frac{\partial i_0(P, T, d)}{\partial T}\right)_{P,T} = \sum_{k=1}^4 \frac{m_k}{(1+d) \cdot \sum_{j=1}^4 m_j} \cdot c_{Pk}^0(T) + \frac{d}{1+d} \cdot c_{PN}^0(T). \quad (6)$$

Представляє в подальшому інтерес похідна $\left(\frac{\partial i}{\partial d}\right)_{P,T}$, яка вже має «тепловолігнісний» характер:

$$\left(\frac{\partial i_0}{\partial d}\right)_{P,T} = \sum_{k=1}^4 \frac{m_k}{(1+d)^2 \cdot \sum_{j=1}^4 m_j} \cdot i_0(T) + \frac{d}{(1+d)^2} \cdot i_N(T) \quad (7)$$

Для визначення похідних $\left(\frac{\partial i}{\partial d}\right)_{P,\varphi}$ та $\left(\frac{\partial i}{\partial \varphi}\right)_{P,d}$ проведемо аналіз тепловолігнісних процесів в термінах незалежних змінних P, d, φ .

Похідні $\left(\frac{\partial i}{\partial d}\right)_{P,\varphi}$ і $\left(\frac{\partial i}{\partial \varphi}\right)_{P,d}$ визначимо з (5):

$$\left(\frac{\partial i_0(P, T, \varphi)}{\partial d}\right)_{P,\varphi} = \left(\frac{\partial i_0(P, T, \varphi)}{\partial T}\right)_{P,d} \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial d}\right)_{P,\varphi} + \left(\frac{\partial i_0(P, d, \varphi)}{\partial d}\right)_{P,T},$$

$$\left(\frac{\partial i_0(P, T, d)}{\partial \varphi}\right)_{P,d} = \left(\frac{\partial i_0(P, T, \varphi)}{\partial T}\right)_{P,d} \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial \varphi}\right)_{P,d}.$$

З урахуванням (6) вони приймуть остаточні вирази:

$$\left(\frac{\partial i_0(P, T, d)}{\partial d}\right)_{P, \varphi} = c_p^0(P, T, d) \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial d}\right)_{P, \varphi} - \sum_{k=1}^4 \frac{m_k}{(1+d)^2 \cdot \sum_{j=1}^4 m_j} \cdot i_0(T) + \frac{d}{(1+d)^2} \cdot i_N(T), \quad (8)$$

$$\left(\frac{\partial i_0(P, T, d)}{\partial \varphi}\right)_{P, d} = \sum_{k=1}^4 \frac{m_k}{(1+d) \cdot \sum_{j=1}^4 m_j} \cdot c_{pk}^0(T) \cdot \left(\frac{dT}{d\varphi}\right)_{P, d} + \frac{d}{1+d} \cdot c_{pN}^0(T) \cdot \left(\frac{dT}{d\varphi}\right)_{P, d}. \quad (9)$$

Розрахунок тепловологісних похідних ентальпії (8, 9) потребує виразів для $\left(\frac{\partial T}{\partial d}\right)_{P, \varphi}$ та $\left(\frac{\partial T}{\partial \varphi}\right)_{P, d}$. Ці похідні можна отримати диференціюванням (1) по d і φ .

В результаті отримаємо:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial d}\right)_{P, \varphi} = \frac{(P - \varphi \cdot P_N^*(T))^2 \cdot \mu_{\text{вх}}}{P \cdot \varphi \cdot \mu_N \cdot \frac{dP_N^*(T)}{dT}},$$

$$\left(\frac{\partial T}{\partial \varphi}\right)_{P, d} = (-1) \cdot \frac{P_N^*(T)}{\varphi \cdot \frac{dP_N^*(T)}{dT}}.$$

Якщо співвідношення (2) і (3) розглянути в рамках ізобарно-ізоентальпійного ($\Delta P = 0$, $\Delta i = 0$) процесу, то можна записати, відповідно:

$$\Delta d = -\frac{\left(\frac{\partial i}{\partial \varphi}\right)_{P, d} \cdot \Delta \varphi}{\left(\frac{\partial i}{\partial d}\right)_{P, \varphi}}, \quad \Delta d = -\frac{\left(\frac{\partial i}{\partial T}\right)_{P, d} \cdot \Delta T}{\left(\frac{\partial i}{\partial d}\right)_{P, T}}. \quad (10)$$

Звідси знаходимо диференціальне співвідношення для зміни температури повітря зі зміною його відносної вологості в ізобарно-ізоентальпійному тепловологісному процесі. З виразів (10) відносно Δd отримаємо:

$$\left(\frac{\Delta T}{\Delta \varphi}\right)_{P, i} = -\frac{\left(\frac{\partial i}{\partial d}\right)_{P, T} \cdot \left(\frac{\partial i}{\partial \varphi}\right)_{P, d}}{\left(\frac{\partial i}{\partial T}\right)_{P, d} \cdot \left(\frac{\partial i}{\partial d}\right)_{P, \varphi}}. \quad (11)$$

Апробацію моделі можна легко провести інтегруючи праву частину (11) по φ від його початкового значення, характерного для довкілля, наприклад, психрометра, до максимально можливого 1. Інтегрування проводилось чисельним методом. У результаті такого інтегрування ми одержимо значення ΔT підохолодження кульки мокрого термометра відносно сухого за рахунок випаровування води з кульки мокрого термометра.

Таким чином, в ідеально-газовому наближенні ми маємо можливість розраховувати всі чотири необхідні тепловологісні похідні, для розрахунку дифе-

ренціального співвідношення змін температури повітря зі зміною його відносної вологості в ізобарно-ізоентальпійному тепловологісному процесі.

Крім того, аналізуючи рівняння (11) можна зробити висновок, що в ньому немає ніяких величин, що потребують використання коефіцієнта масовіддачі з поверхні випаровування, не використовується традиційна для таких задач аксіома Дальтона. Вираз (11) не потребує знання кількості повітря, що омиває поверхню випаровування за одиницю часу, чи величини поверхні випаровування води. Все це звертає увагу на недифузійний характер тепловологісного процесу, який наприклад розглядається в холодильних технологіях.

Класичним загальноприйнятим експериментом є визначення різниці температур сухого та мокрого термометрів у залежності від стану атмосфери, в якій вони знаходяться. Якщо незалежним способом виміряти барометричний тиск, то вимірювання різниці температур сухого та мокрого термометрів дозволяє розрахувати значення відносної вологості чи вологовмісту атмосферного повітря. В основу такого розрахунку покладено емпіричні вирази, що апроксимують експериментальні дані по тиску насиченої пари в повітрі в залежності від барометричного тиску, температури та відносної вологості, з урахуванням коефіцієнта Пойтінга.

Для апробації розглянутої термодинамічної теорії тепловологісних процесів виникає питання – «чи може ця теорія описати закономірності формування різниці температур сухого та мокрого термометрів без апроксимації експериментальних даних, базуючись на рівнянні стану вологого повітря та водяної пари?» Позитивна відповідь на це може бути сформульована, якщо гіпотетично вважати процес взаємодії повітря з кулькою мокрого термометру ізоентальпійним процесом. Крім того, цей тепловологісний процес є ще й ізобарним.

Експериментальні дані щодо різниці температур термометрів при тисках, менших 1 атм, будуть основою для апробації можливостей експериментального стенду при таких параметрах стану газового середовища. Кінцевий результат апробації розробленої теорії полягає у вимірюванні різниці температур та співставлення експериментальних та розрахункових даних з випаровування рідин, відмінних від води у повітря та інші гази.

Для дослідження та виміру різниці температур сухого та мокрого термометрів при випаровуванні (сублімації) робочої речовини в потік газу, що його омиває, був обладнаний експериментальний стенд. Під час проектування стенда була поставлена задача реалізувати ізобарно-ізоентальпійний процес випаровування аналогічно до аспіраційного психрометра. Принципова схема стенда зображена на рис. 1. Вимірювальний робочий простір це скляний ковпак 1, який встановлюється на металеву пластину 6. Конструкція робочого простору дозволяє змінювати тиск від атмосферного і нижче. Гранічна межа тиску в робочому просторі визначається якістю монтажу та тиском насиченої пари мастила вакуумного насоса при робочій температурі (в експерименті досягались значення 0.13 бар) Для зниження тиску та організації циркуляції газу через робочий простір використовувався вакуумний насос 12 та два вентиля – «тонкого» регулювання 16, для зміни витрати циркулюючого газу та «грубого» регулювання 9, для зміни рівня вакууму. Робоча речовина (газ) подається через трубку 8, яка

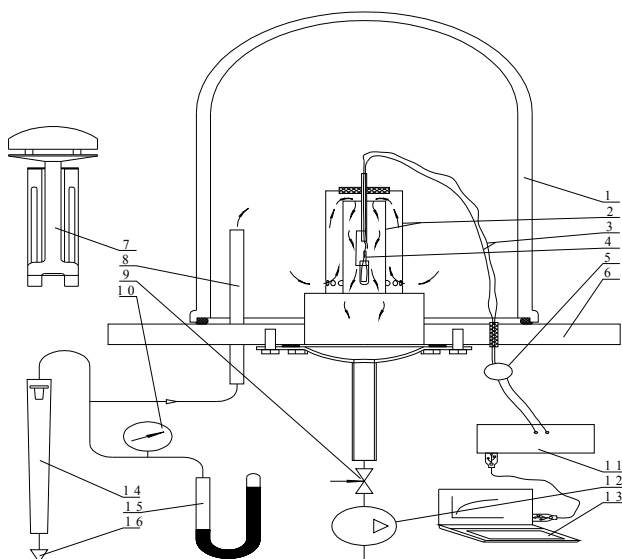


Рис. 1. Принципова схема експериментального стенду.

введена через вакуумне ущільнення, до робочого простору. Між вентилем 16 і трубкою 8 підключений вимірювач об'ємної витрати робочої речовини, рота-метр 14. До робочого простору підключений зразковий манометр 10 для орієнтовного виміру тиску. Точний вимір проводиться інспекторським ртутним барометром 15, в діапазоні від 10 до 1013 мбар та з похибкою 5 мбар. У середині робочого простору розміщений вимірювальний осередок 4 з досліджуваною речовиною, яка екранована двома циліндрами 2, що виконані з дзеркальної нержавіючої сталі. Між циліндрами утворюється кільцевий зазор, який примушує рухатись робочу речовину лабіринтним шляхом, що додатково створює умови для термічної стабілізації потоку газу. У разі дослідження рідкої речовини (вода, чотирьоххлористий вуглець) використовувалась батистова тканина, якою обгортався «мокрый» термометр (термопара). Якщо досліджувалась тверда речовина, наприклад нафталін, тоді він наплавлявся безпосередньо на спай термомпари. В потоці газу, що омиває робочу речовину, встановлена «суха» термопара для вимірювання його температури. Для більш точного виміру різниці температур додатково використовувалась диференціальна термопара. В якості вимірювачів температури використовувались мідь-константанові термоелектричні датчики температури 3. До вимірювального комплексу 11 термопари були підключені через перемикач 5. Схема включення з індивідуальним холодним спаєм, який термостатований у термостаті з льодом. Вимірювальний комплекс підключався до комп'ютера 13. Для виміру початкової абсолютної вологості повітря при атмосферному тиску використовувався аспіраційний психрометр із електромотором 7.

Розроблений стенд та методики дозволили провести ряд досліджень розчинності різних речовин (вода, чотирихлористий вуглець, нафталін) у різні газові середовища (атмосферне повітря, двоокис вуглецю, азот).

Апробація термодинамічної теорії тепловологісних процесів проводилася шляхом співставлення власних експериментальних і розрахованих за наведеною вище методикою даних.

Порівняння розрахункових та експериментальних даних при різних умовах випаровування та різних комбінаціях речовин та газових середовищ наведено в табл. 1-5.

Індекс «а» відповідає параметрам атмосферного повітря на вході до робочого осередку, «Е» – експериментальні дані, «роз» – 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.

Висновки. На базі отриманих чисельних експериментальних даних по розчинності різних речовин у газове середовище різного складу проведено апробацію приведених співвідношень для прогнозування характеристик тепловологісних процесів випаровування рідини з поверхні капілярно-пористого тіла. Для підвищення впевненості в роботоспроможності математичної моделі зроблено співставлення стандартизованих даних по випаровуванню води в атмосферне повітря з розрахунковими за нашою методикою, які отримані для тих же умов. Для проведення необхідних обчислень нами розроблено відповідні розрахункові процедури на алгоритмічній мові Turbo-Pascal. Проведені експерименти в широкому діапазоні тисків, температур та комбінацій речовин і газових середовищ, в яке проходило випаровування, дають змогу комплексно провести апробацію поданої термодинамічної моделі. 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 визначенні умов проведення експерименту.

Можна сміливо зробити висновок, що ізобарно-ізоентальпійний підхід до моделювання тепловологісних процесів випаровування є фундаментальним і теоретично обґрунтованим.

Література:

1. *Онiщенко В.П., Желiба Ю.О., Харченко С.В., Онiщенко М.В.* Експериментальне дослідження розчинності в газове середовище довільного складу // Холодильная техника и технология. – 2012. – № 137. – С. 57-62.
2. *Онiщенко В.П., Желiба Ю.О., Харченко С.В.* Математичне моделювання тепловологісних процесів випаровування // Харчова наука і технологія. – 2013. – №1. – С. 97-100.

Таблиця 1. 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	Δt^{p03} , °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

Таблиця 2. Порівняння розрахункових та експериментальних даних при випаровуванні води в середовище азоту при різних тисках.

Р. мбар	T_c , °C	T_m , °C	Δt^E , °C	Δt^{p03} , °C
836	23.35	10.14	13.72	14.52
843	23.37	10.16	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

Таблиця 3. Порівняння розрахункових та експериментальних даних при випаровуванні чотирихлористого вуглецю в середовище двоокису вуглецю при різних тисках (CCL_4 в CO_2).

Р. мбар	T_c , °C	T_m , °C	Δt^E , °C	Δt^{p03} , °C
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	26.10

Таблиця 4. Порівняння розрахункових та експериментальних даних при випаровуванні чотирьоххлористого вуглецю в середовищі азоту при різних тисках (CCL_4 в N_2).

Р, мбар	$T_c, ^\circ C$	$T_m, ^\circ C$	$\Delta t^E, ^\circ C$	$\Delta t^{poz}, ^\circ C$
920	16.08	3.77	12.31	14.11
675	15.73	1.94	13.80	15.80
564.25	15.76	0.83	14.93	16.88
465	15.46	-0.73	16.20	18.10
342.5	15.16	-2.83	18.00	20.10

Таблиця 5. Порівняння розрахункових та експериментальних даних при випаровуванні нафталіну в середовищі двоокису вуглецю при різних тисках ($C_{10}H_8$ в CO_2).

Р, мбар	$T_c, ^\circ C$	$T_m, ^\circ C$	$\Delta t^E, ^\circ C$	$\Delta t^{poz}, ^\circ C$
80	39.28	34.41	4.87	6.00
80	39.3	34.49	4.81	6.13
77.5	39.15	34.38	4.77	6.17
78.5	39.4	34.70	4.70	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	1.70	2.30
625	45.83	43.53	2.30	1.87
634	45.54	43.53	2.01	1.95

Харченко С.В., Желиба Ю.А., Онищенко В.П.

**Термодинамическая теория процессов испарения.
Математическое моделирование и апробация.**

АННОТАЦИЯ

Статья посвящена математическому моделированию процессов испарения жидкостей с поверхности капиллярно-пористого тела и сублимации твёрдых веществ в газовую среду произвольного состава. Моделирование проходит в рамках предложенной авторами изобарно-изоэнтальпийной теории протекания процессов испарения. В основу методики положены теоретически обоснованные уравнения состояния с вириальными коэффициентами.

Kharchenko S.V., Zheliba Y.A., Onistchenko V.P.

**Thermodynamic theory for evaporation processes.
Mathematical modeling and verification.**

SUMMARY

This paper presents the mathematical modeling of liquid evaporation processes from the capillary-porous solid surface and solids sublimation into gaseous medium of arbitrary composition. The authors proposed to describe evaporation processes in terms of the Isobaric-Isenthalpic Theory Framework. The equations of state with virial coefficients are suggested as groundwork of the method.