

Автореф
Х 22

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ ХАРЧОВИХ
ТЕХНОЛОГІЙ



ХАРЧЕНКО СЕРГІЙ ВІКТОРОВИЧ

УДК 621.564; 641.546.44

ДОСЛІДЖЕННЯ ВИПАРОВУВАННЯ У ГАЗОВЕ
СЕРЕДОВИЩЕ ДОВІЛЬНОГО СКЛАДУ

05.14.06 – Технічна теплофізика і
промислова теплоенергетика

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Одеса – 2014

Дисертація є рукописом.
Робота виконана в Одеській національній академії харчових технологій МОН України.

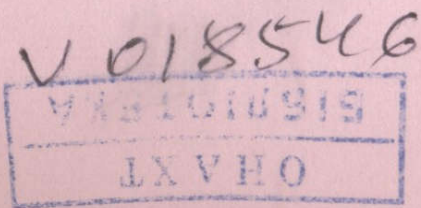
Науковий керівник:

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, доцент
Желіба Юрій Олександрович,
Одеська національна академія харчових технологій, доцент кафедри холодильних машин, установок і кондиціонування повітря

Офіційні опоненти:

доктор фізико-математичних наук, професор,
Калінчак Валерій Володимирович
Одеський національний університет імені І.І. Мечникова,
завідувач кафедри теплофізики

доктор технічних наук, професор,
Ткаченко Станіслав Йосипович
Вінницький національний технічний університет,
завідувач кафедри теплоенергетики



Захист відбудеться «22» грудня 2014 року в ауд. 108 о 12⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 41.088.03 при Одеській національній академії харчових технологій, Дворянська, 1/3, м. Одеса, Україна, 65082.

бібліотеці ОНАХТ за адресою: вул.

ОНАХТ Автореф
Дослідження випарову



v018546

Голованов В.І

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Забезпечення продовольчої безпеки держави не можливо без удосконалення процесів холодильних технологій, які базуються на фундаментальних наукових дослідженнях тепловологісних процесів.

Однією з важливих складових удосконалення технологій є зменшення та контролювання втрат маси від випаровування під час холодильної обробки. Вся харчова сировина під час переробки і зберігання не пакована та контактує з газовим середовищем. Зазвичай це повітря з різними технологічними показниками (температура, відносна вологість, вологовміст, швидкість потоку, кратність циркуляції, тиск), які визначені нормативно-технічною документацією (НТД). Все ширше використовуються й технології регульованого та модифікованого газового середовища, де основним компонентом є азот або двоокис вуглецю. Для якісного проектування та забезпечення таких процесів важливо знати не тільки їх теплообмінні, а й масообмінні характеристики.

Чисельні підходи до моделювання тепловологісних процесів випаровування, яким є процес формування втрат від усушки, базуються на дифузійній та емпіричній моделях, які не є надійними та достовірними для побудови систем технологічного контролю й управління та для якісного проектування. Відсутні теоретичні доробки цього ж плану і в інших галузях знань та технологіях: вакуумне охолодження, сублімаційне сушіння, системи технологічного контролю, газова екстракція, випарне охолодження, сушіння. Тому актуальною є розробка єдиного термодинамічного, теоретично обґрунтованого підходу до моделювання тепловологісних процесів випаровування. Розв'язання цієї задачі у прикладному напрямку дозволить надійно розраховувати температурні, енергетичні та масові ефекти від випаровування води з поверхні харчової сировини й продуктів під час їх холодильної обробки.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана відповідно до планів, затверджених МОН України і є складовою частиною держбюджетних НДР (№ ДР 0109U000409) за темою «Розробка методології енерготехнологічного моніторингу об'єктів холодильного господарства міжгалузевої структури зберігання продовольчих запасів України», наказ МОН від 17.11.2008 р. №1043; НДР (№ ДР 0112U000728) «Наукові основи логістики, моніторингу та проектування охолоджуючих систем агропромислового комплексу», наказ МОН від 28.10.2011 р. №1241.

Мета і завдання досліджень. Метою роботи є розробка єдиного теоретично обґрунтованого підходу до вирішення задачі моделювання тепловологісних процесів випаровування. Відповідно було визначено такі основні завдання:

- розробити теорію на базі віріальних рівнянь стану речовин для моделювання характеристик газової суміші змінного складу в тепловологісному процесі;
- розробити термодинамічну теорію тепловологісних процесів для розрахунку втрат маси від випаровування не упакованої харчової сировини;
- розробити експериментальний стенд і провести експериментальні дослідження по випаровуванню води, нафталіну, чотирьоххлористого вуглецю у газове середовище (атмосферне повітря, азот, двоокис вуглецю) з метою практичного підтвердження запропонованої теорії;

- розробити рівняння стану чотирьоххлористого вуглецю для перевірки математичної моделі тепловологісних процесів на власних експериментах;

- розробити диференційовані за температурою охолоджуючого середовища норми втрат маси м'яса в напівтушах від випаровування для процесів охолодження в умовах виробничих холодильників.

Об'єкт дослідження - тепловологісні процеси випаровування різних речовин у газове середовище довільного складу.

Предмет дослідження – формування різниці температур між сухим та змоченим термометрами під час тепловологісних процесів випаровування у газове середовище довільного складу. Втрати маси від усушки в процесах охолодження м'яса в умовах виробничих холодильників.

Методи дослідження: математичне моделювання тепловологісних процесів випаровування в газове середовище, розрахунки, експериментальні дослідження різниці температур між сухим та мокрим термометрами при випаровуванні в лабораторних умовах.

Наукова новизна одержаних результатів:

- вперше розроблена універсальна, теоретично обґрунтована модель тепловологісних процесів випаровування різних речовин в газове середовище довільного складу;
- на відміну від традиційних емпіричних та дифузійних підходів в основу математичної моделі покладено рівняння стану компонент газової суміші з віріальними коефіцієнтами. Багатокомпонентність газового середовища враховували через сумішеві віріальні коефіцієнти;
- вперше, за допомогою розробленого стенду, отримані експериментальні дані з різниці температур сухого та мокрого термометрів під час випаровування чотирьоххлористого вуглецю, нафталіну в середовище азоту, двоокису вуглецю, повітря які підтверджують розрахункові дані за наведеною моделлю;
- вперше розроблено рівняння стану чотирьоххлористого вуглецю у віріальній формі;
- вперше теоретично обґрунтовані розрахункові процедури для визначення різниці температур сухого та мокрого термометрів при випаровуванні різних речовин в газове середовище довільного складу.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і результатів визначаються: коректністю постановки математичної задачі та сучасними методами математичного моделювання; використанням сучасного вимірювального обладнання, проведенням тарувальних експериментів і виконаним аналізом похибок вимірів; результатами порівняння експериментальних і розрахункових даних з різниці температур сухого і мокрого термометрів для різних речовин під час випаровування в газове середовище довільного складу, що підтверджує адекватність моделі; співставленням розрахункових та експериментальних даних з формування втрат маси харчової сировини під час її холодильної обробки.

Практичне значення отриманих результатів:

– розроблена методика математичного моделювання формування втрат маси від випаровування м'яса під час його холодильної обробки на базі розробленого універсального підходу до моделювання тепловологісних процесів. Методика передана для апробації та впровадження у виробничий процес ТОВ Науково-інженерне об'єднання «Холод» (м. Одеса);

– отримані експериментальні дані з формування різниці температур сухого і мокрого термометрів під час випаровування води, нафталіну, чотирьоххлористого вуглецю у різні газові середовища (атмосферне повітря, азот, двоокис вуглецю);

– отримані результати по втратам від випаровування використані у технічній документації “Збірник технологічних інструкцій з холодильної обробки та зберігання м'ясної сировини” (до ДСТУ6028:2008, ДСТУ6030:2008, ДСТУ 7158: 2010, ДСТУ 1588:91, ГСТУ 46.019-2002, ГОСТ 27095-86, ГОСТ 1935-55).

Особистий внесок здобувача. Дослідження, які викладені в роботі, виконані автором особисто або за його безпосередньої участі на всіх етапах. Розроблений та створений експериментальний стенд, проведені експериментальні дослідження по випаровуванню води, нафталіну, чотирьоххлористого вуглецю в атмосферне повітря, азот, двоокис вуглецю. Розроблено рівняння стану чотирьоххлористого вуглецю у віршальній формі. Побудована математична модель тепловологісних процесів випаровування. Розроблені розрахункові процедури, проведені розрахунки, їх обробка та інше.

Апробація результатів дисертації. Основні результати роботи обговорювалися на 11 наукових конференціях, у тому числі: ВНТК "Стан, досягнення і перспективи холодильної техніки і технології", Одеса, ОНАХТ, 2013 р.; VIII МНТК “Сталий розвиток і штучний холод”, Одеса, ОНАХТ, 2012 р.; МНТК "Сучасні проблеми холодильної техніки і технології", Одеса, ОДАХ, 2011, 2009, 2007 рр.; МНТК "Прогресивна техніка та технології харчових виробництв, ресторанного та готельного господарства і торгівлі. Економічна стратегія і перспективи розвитку сфери торгівлі та послуг", Харків, ХДУХТ, 2011 р.; ВНПК "Проблеми енергоефективності та якості в процесах сушіння харчової сировини", Харків, ХТУХТ, 2011 р.; МНПК «Прогресивна техніка та технології харчових виробництв, ресторанного та готельного господарства і торгівлі. Економічна стратегія і перспективи розвитку сфери торгівлі та послуг.». Одеса, ОНАХТ, 2011 р.; XIII МНМК «Людина та навколишнє середовище-проблеми безперервної екологічної освіти в вузах». Одеса, ОДАХ, 2009; МНПК „Стратегічні напрямки розвитку підприємств харчових виробництв, ресторанного господарства і торгівлі”. Харків, ХДУХТ, 2008 р.; 72-а НКМВАіС «Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування у XXI столітті», Київ, НУХТ, 2006.

Публікації

За темою дисертації опубліковано 21 роботу, в тому числі 9 у періодичних виданнях, які рекомендовані ДАК України (дві за кордоном), та 12 доповідей та тез у збірниках регіональних та міжнародних конференцій.

Структура дисертації.

Дисертаційна робота містить вступ, чотири розділи, висновки, перелік викори

станої літератури та додатки. Загальний об'єм дисертаційної роботи складає 192 сторінки, 31 таблиця, 3 додатки та 149 літературних джерел.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовується актуальність теми дисертації, відображається зв'язок з державними програмами, сформульовані мета та задачі дослідження. Приведені наукова новизна і практичне значення роботи, особистий вклад здобувача, відомості про апробації результатів дисертації та публікації.

Перший розділ присвячений оцінці теоретичних методів досліджень тепловологісних процесів холодильних технологій та експериментальних досліджень з втрат сировини та продукції від випаровування (ΔG). Визначено, що проблемним питанням в математичному моделюванні цих процесів є опис кінетики випаровування води. У роботах більшості дослідників домінувало застосування дифузійного трактування, зокрема співвідношення Льюїса для розрахунку коефіцієнтів вологовіддачі, а також розділення загальної кількості теплоти, яка приймає участь в процесі випаровування, на "суху" і "вологу" частки. Такі співвідношення і підходи не дають прийнятних результатів та не використовуються в ГОСТ 8.854-85 для станційного і аспіраційного психрометрів, методів визначення різниці температур сухого і мокрого термометрів або відносної вологості повітря, які побудовані на базі експериментальних даних. Відмічено, що є потреба в знаннях кінетики випаровування рідин в газове середовище відмінне за складом від атмосферного повітря. Також слід зазначити, що багато досліджень базуються на розгляді відносної вологості повітря як одного з головних факторів у тепловологісних процесах. Опис кінетики випаровування води, відомої під назвою тепловологісні процеси, базується, зазвичай, на емпіричному та дифузійному підходах. Таке трактування та й розрахункові формули для коефіцієнтів вологовипадіння чи тепловологісних співвідношень не визнані коректними.

В роботах В.М. Стефановського, зроблений детальний статистичний аналіз норм втрат маси від усушки. Зазначено, що дифузійний підхід до моделювання процесів випаровування не враховує кількість теплоти, що відводиться або відводиться від об'єкту під час теплообміну, а в дифузійному сенсі речовина із зони з великою концентрацією рухається в зону з низькою концентрацією цієї речовини. Теорія процесу поверхневого випаровування на аксіомах Дальтона часто дістає назву психрометричної, а не дифузійної. Принципово по іншому розвивались дослідження Ф. Меркеля, В.З. Жадана, А.А. Гоголіна, але вони також дістали назву термодинамічних, психрометричних. Через це є розбіжність трактовок і плутанина цих різних підходів. Основним фактором, що впливає на формування втрат маси від випаровування вважається кількість теплоти, що відводиться (підводиться) від об'єкта. В.З. Жадан вважав, що тепловологісні процеси в охолоджуючих пристроях не впливають на втрати маси від усушки, а визначаються зміною стану охолоджуючого повітря при взаємодії з об'єктом охолодження. Цю зміну стану він визначав тепловологісним відношенням ε , як відношенням зміни питомої ентальпії до зміни вологовмісту повітря. Ідеї В.З. Жадана підтримав А.А. Гоголін, але розвитку в їх роботах вони не набули. Теоретично обґрунтовані модель для розрахунку ΔG в залежності від характеристик охолоджуючого повітря чи іншого газового середовища мають

прикладний інтерес для систем технологічного контролю. Тому з розглянутих підходів (емпіричного та дифузійного) до тепловологісних процесів більше відповідає підхід В.З. Жадана. Аналогічна точка зору представлена і в закордонних дослідженнях та науковою школою І.Г. Чумака, В.П. Оніщенка.

Для теоретичного опису тепловологісних процесів, необхідно мати рівняння стану вологого повітря (як основного робочого середовища) чи газових сумішей з тих же компонент у широкому діапазоні T та P .

Прийнято розраховувати термодинамічні властивості вологого повітря тільки в рамках ідеально-газового наближення або користуватись $h-d$ діаграмою вологого повітря при барометричному тиску $P=1$ бар. Ряд залежностей при побудові рівняння стану відображено поліномами, коефіцієнти яких опубліковані з помилками. Структура рівняння стану така, що не дозволяє перейти до розрахунку властивостей газових сумішей з тих же компонент, що й вологе повітря (регульовані газові середовища). Тому використання рівняння стану для розрахунку тепловологісних похідних типу ϵ неможливе, отже є необхідність розвитку досліджень В.П. Оніщенка з побудови рівняння стану вологого повітря.

Спираючись на доступні результати досліджень попередників (Льюїса, Ф. Меркеля, В.З. Жадана, А.А. Гоголіна, Г.К. Мнацаканова, А.В. Алексеєва, І.Г. Алямовського, В.М. Стефановського, Д.Г. Рютова, В.О. Загоруйка, І.Г. Чумака, В.П. Оніщенка, Ю.О. Желіби), дані нормативних документів та на основі їх узагальнення й аналізу визначені мета, задачі та напрямки досліджень.

У другому розділі викладено опис експериментального стенду, обґрунтування, оцінку похибок, постановку завдань та методику експериментальних досліджень розчинності рідин, твердого тіла в газове середовище змінного складу та результати експериментальних вимірювань.

Процес випаровування розглядався як взаємодія потоку газового середовища з поверхнею капілярно-пористого тіла. Подібні процеси є і в холодильних технологіях. Визнано класичний експеримент з випаровування - експеримент по визначенню різниці температур сухого та мокрого термометрів у залежності від стану атмосфери, в якій вони знаходяться. Вимірювана різниця температур та тиск дають можливість розрахувати значення відносної вологості. Але такий розрахунок базується на апроксимації експериментальних даних. Для нашої теорії, базуючись на рівнянні стану розчинника та речовини, що розчиняється, прийнято, що процес випаровування є ізоентальпійним.

Кінцевий результат проведення апробації розробленої термодинамічної теорії - вимірювання різниці температур та співставлення експериментальних та розрахункових даних з випаровування рідин, відмінних від води. Доступними для проведення експериментів речовинами, що не киплять при кімнатних температурах і тиску 1 бар, є чотирихлористий вуглець та нафталін. У роботі були проведені експериментальні дослідження випаровування нафталіну ($C_{10}H_8$), чотирихлористого вуглецю (CCl_4), води (H_2O) в азот, двоокис вуглецю, атмосферне повітря. У спроектованому стенді, рис 1, був реалізований ізобарно-ізоентальпійний процес випаровування, як в аспіраційному психрометрі. Вимірювальний робочий простір - скляний ковпак (1) на металевій пластині (6). Конструкція дозволяла змінювати тиск від атмосферного до 0,15 бар. Для створення зниженого тиску та циркуляції газу через робочий простір використовувався вакуумнасос (12) та два вентиля, "тонкого" (16) для зміни ви-

трати циркулюючого газу, та "грубого" регулювання (9) для зміни рівня вакууму в робочому просторі. Робоча речовина (газ) подавалась через трубку (8). Між вентилем (16) і трубкою (8) підключений ротаметр (14). До робочого простору підключений зразковий манометр (10) та інспекторський ртутний барометр (15), який дозволяв вимірювати тиск в діапазоні від 0,01 до 1,013 бар з похибкою 0,005 бар. У під вакуумним ковпаком розміщений вимірювальний робочий простір (4) (рис. 2, 3, 4) з досліджуваною речовиною, яка екранована двома циліндрами (2) з дзеркальної нержавіючої сталі. Між ними утворений кільцевий зазор, який примушує рухатись робочу речовину лабіринтним шляхом, що додатково створює умови для термічної стабілізації потоку. У разі використання рідкої речовини (вода, чотирихлористий вуглець) використовувалась батистова тканина. В разі досліджування твердої речовини (нафталін), його наплавляли на спай термопари. У потоці газу, що омиває робочу речовину, була встановлена "суха" термопара. В якості вимірювачів температури використовувались мідь-константанові термопари (3). До вимірювального комплексу (11) термопари підключені через перемикач (5). Схема включення з індивідуальним холодним спаєм, який термостатований у термостаті з

Рис. 1 Принципова схема
стенду

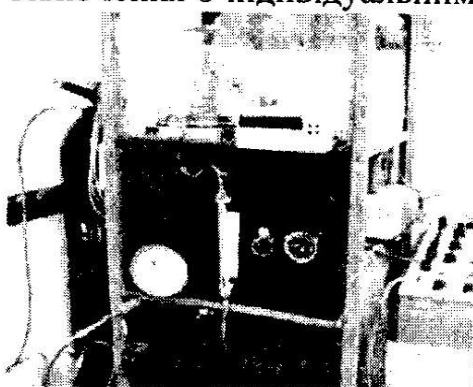


Рис. 2. Зовнішній вигляд
стенду



Рис. 3. Вимірюваний робо-
чий простір при досліджен-
ні випаровування CCl₄



Рис. 4. Вимірюваний робо-
чий простір при дослідженні
випаровування C₁₀H₈

льодом, що тане. Для виміру початкової абсолютної вологості повітря при атмосферному тиску використовувався аспіраційний психрометр із електромотором (7). Експериментальні дослідження проводились у діапазоні температур 15-34 °С. Враховуючи умови розрахунку, під час випаровування у середовище двоокису вуглецю та азоту початкова вологість газу за досліджуваними речовинами дорівнювала нулю, а кінцева одиниці. В ізобарно – ізоентальпійних тепловологісних процесах ентальпійні втрати змоченої кульки термометра за рахунок випаровування рідини у потік газу компенсуються притоком теплоти від нього, а саме газове середовище вбирає в себе пару рідини (твердого тіла) в максимально можливої кількості – до досягнення відносною вологістю значення 100%. Отримані чисельні експериментальні дані з розчинності різних речовин у газове середовище різного складу подані у вигляді

Табл.1 - Експериментальні дані з випаровування води в атмосферне повітря

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

Індекс 'а' відповідає параметрам атмосферного повітря на вході до робочого простору, 'Е' – параметрам в робочому просторі, t_c , t_m – температури сухого та мокрого термометрів відповідно, Δt – різниця температур між сухим та мокрим термометрами в експериментальному робочому просторі

в рамках термодинамічної теорії тепловологісних процесів випаровування в газове середовище змінного складу в якості вологої компоненти розуміється речовина, якою насичується газове середовище. Завдяки засвоєнню вологи в тепловологісному процесі, повітря є об'єктом змінної маси. Це вимагало використовувати термодинамічний потенціал для відображення термодинамічних параметрів вологого повітря. В тепловологісних процесах, які розглядаються в роботі, незмінним є тиск газового середовища (повітря) P , в такому разі достатньо обмежитись моделюванням на рівні змін ентальпії. В цьому немає ніякого "конфлікту" з другим законом термодинаміки.

Зміну питомої ентальпії Δi вологовміщуючої газової суміші в тепловологісному процесі можливо подати у вигляді повного диференціалу:

$$\Delta i = \left(\frac{\partial i}{\partial T} \right)_{P,d} \Delta T + \left(\frac{\partial i}{\partial d} \right)_{P,T} \Delta d + \left(\frac{\partial i}{\partial P} \right)_{T,d} \Delta P, \text{ чи} \quad (1)$$

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

Прирівнявши вирази (1) та (2) для Δi одержимо вираз для Δd газової суміші

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

таблиць (наприклад табл.1) і дозволяють у подальшому провести апробацію теоретично обґрунтованих співвідношень для розрахунку тепловологісних процесів випаровування рідини з поверхні капілярно-пористого тіла в холодильних технологіях. Математична модель підтверджена результатами експериментальних досліджень в тепловологісному процесі випаровування.

В третьому розділі розглядається математичне моделювання процесів випаровування та сублімації в газове середовище. В

де $\left(\frac{\partial i}{\partial T}\right)_{P,d} = C_{\text{ст.н}}$ - питома теплоємність вологого повітря, а

$\left(\frac{\partial i}{\partial d}\right)_{P,T} = i_{\text{H}_2\text{O}}(P,T)$ - питома ентальпія водяної пари.

Таким чином, розрахунок кількості вологи, що засвоїло газове середовище в тепловологісному процесі, потребує розрахунку шести тепловологісних похідних ентальпії газових сумішей. У реальних технологічних процесах змінами ΔP можна нехтувати, а з ними і двома тепловологісними похідними ентальпії по тиску. Тому для розрахунків кількості вологи, що засвоїло газове середовище, необхідно знати чотири похідні ентальпії, що залишились $\left(\frac{\partial i}{\partial T}\right)_{P,d}$, $\left(\frac{\partial i}{\partial d}\right)_{P,T}$, $\left(\frac{\partial i}{\partial \varphi}\right)_{P,d}$ та $\left(\frac{\partial i}{\partial d}\right)_{P,\varphi}$.

Ці похідні є термодинамічними функціями стану газових сумішей (повітря), можуть бути розраховані при наявності рівняння стану в P - ρ - T - d - зображенні плюс ідеально-газових функцій компонент газової суміші.

Диференціальне рівняння для змін температури повітря зі зміною його відносної вологості в ізобарно-ізоентальпійному тепловологісному процесі:

$$\left(\frac{\Delta T}{\Delta \varphi}\right)_{P,d} = - \frac{\left(\frac{\partial}{\partial d}\right)_{P,T} \cdot \left(\frac{\partial}{\partial \varphi}\right)_{P,d}}{\left(\frac{\partial}{\partial T}\right)_{P,d} \cdot \left(\frac{\partial}{\partial d}\right)_{P,\varphi}} \quad (4)$$

Інтегруючи праву частину (4) за φ від його початкового значення, характерного для атмосферного повітря, до максимально можливого значення, яке дорівнює 1, одержали значення ΔT додаткового охолодження кульки мокрого термометра відносно сухого за рахунок випаровування води. В рівнянні (4) немає величин, що потребують використання коефіцієнта масовіддачі, не використовується аксіома Дальтона, не потрібно знання кількості повітря, що омиває кульку термометра за одиницю часу, чи величини поверхні випаровування. Як наслідок, тепловологісний процес має недифузійний характер.

Газову суміш з однією "вологою" компонентою характеризуємо чотирма змінними - P , T , d , φ , з яких три змінних незалежні. Одна з них виражається через три інших, наприклад:

$$d_N = \frac{P_N''(T) \cdot \mu_N}{(P - \varphi \cdot P_N''(T)) \cdot \mu_{\text{сух}}} \quad (5)$$

де $P_N''(T)$ - температурна залежність тиску насиченої пари "вологої" компоненти, P - загальний, "барометричний" тиск газової суміші (за "вологою" компонентою, $\varphi = \frac{P_N^{\text{пар.}}}{P_N''(T)}$), μ_N - молекулярна маса "вологої" компоненти, $\mu_{\text{сух}}$ - позірна молекулярна маса "сухої" частини газової суміші.

Ентальпію цієї суміші записано як:

$$i_o(P, T, d) = \sum_{i=1}^4 \frac{m_i}{(1+d) \cdot \sum_{j=1}^4 m_j} \cdot i_{o_i}(T) + \frac{d}{1+d} \cdot i_N(T)$$

де: індекси i, j відносяться до компонент "сухої" частини; індекс N – до "вологої" частини; $m_i, i=1 \div 4$ – маси компонент сухої частини ($\sum_{i=1}^4 m_i = 1$ кг). Тут треба зверну-

ти увагу на розмірність величини ентальпії $\Rightarrow [i_o] = \frac{\text{Дж}}{\text{кг суміші}}$.

З позиції подальшого аналізу представляє інтерес аналіз тепловологісних процесів у термінах незалежних змінних P, d, φ . Відповідні похідні можна отримати, якщо врахувати, що $\varphi \equiv \varphi(T, d)$ в рамках співвідношення (5).

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

$$C_p^o = \left[\left(\frac{\partial i_o(P, T, d)}{\partial T} \right)_{P, d} \right] = \sum_{i=1}^4 \frac{m_i}{(1+d) \sum_{j=1}^4 m_j} \cdot C_{p,i}^o(T) + \frac{d}{1+d} \cdot C_{p,N}^o(T)$$

$$\left(\frac{\partial i_o}{\partial d} \right)_{P, T} = \sum_{i=1}^4 \frac{m_i}{(1+d)^2 \cdot \sum_{j=1}^4 m_j} \cdot i_{o_i}(T) + \frac{d}{(1+d)^2} \cdot i_N(T)$$

$$\left(\frac{\partial i_o(P, T, d)}{\partial d} \right)_{P, \varphi} = C_p^o(P, T, d) \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial d} \right)_{P, \varphi} - \sum_{i=1}^4 \frac{m_i}{(1+d)^2 \cdot \sum_{j=1}^4 m_j} \cdot i_{o_i}(T) + \frac{d}{(1+d)^2} \cdot i_N(T)$$

$$\left(\frac{\partial i_o(P, T, d)}{\partial \varphi} \right)_{P, d} = C_p^o(T) \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial \varphi} \right)_{P, d}, \text{ де}$$

$$\left(\frac{\partial T}{\partial d} \right)_{P, \varphi} = \frac{(P - \varphi \cdot P_N^*(T))^2 \cdot \mu_{\text{свх}}}{P \cdot \varphi \cdot \mu_N \cdot \frac{dP_N^*(T)}{dT}} \text{ та } \left(\frac{\partial T}{\partial \varphi} \right)_{P, d} = (-1) \cdot \frac{P_N^*(T)}{\varphi \cdot \frac{dP_N^*(T)}{dT}}$$

Найбільш складний для розрахунку тепловологісний процес випаровування якоїсь рідини у вологому повітрі, як п'яти компонентної суміші ($N_2 + O_2 + CO_2 + Ar_2 + H_2O$). Зміни відносної вологості повітря в процесах холодильної обробки відносно малі, їх вимірювання характеризується похибкою, що дорівнює або перевищує самі вимірювані величини. Тому для вирішення поставлених завдань використано рівняння стану, що описує достатньо прецизійно залежності термодинамічних потенціалів від вологовмісту повітря на рівні їх перших похідних по вологовмісту чи відносній вологості. При значеннях температур до 700 К та тиску до 5 МПа достатньо проводити розрахунки на рівні другого, максимум третього віріальних коефіцієнтів, коли обчислюються термічні (P, T, ρ) властивості. А вже при обчисленні калоричних властивостей врахування третього віріального коефіцієнта стає необхідним, дозволяє контролювати похибки. Тому для побудови рівняння стану вологого повітря в наведених вище діапазонах температур та тисків вибрано рівнян-

ня стану з віріальними коефіцієнтами, з урахуванням, як мінімум, третього віріального коефіцієнта. В роботі використане розроблене професором Оніщенко В.П. рівняння стану газових сумішей змінного складу, у тому числі вологого повітря, отримані всі необхідні співвідношення для виведення формул розрахунку тепловологісних похідних в P , d , φ – зображенні стану газової суміші, на базі співвідношень для другого, третього віріальних коефіцієнтів та їх трьох похідних $\frac{\partial B}{\partial T}$, $\frac{\partial C}{\partial T}$, $\frac{\partial^2 B}{\partial T \cdot \partial d}$, $\frac{\partial^2 C}{\partial T \cdot \partial d}$, $\frac{\partial^2 B}{\partial T^2}$, $\frac{\partial^2 C}{\partial T^2}$. У роботі розроблені розрахункові процедури на алгоритмічній мові Turbo-Pascal та проведена їх апробація.

Необхідні похідні температури знайдено із співвідношення, яке визначає самі поняття вологовмісту та відносної вологості газової суміші:

$$d = \frac{\varphi P''(T) \mu_{H_2O}}{\mu_{сух} (P - \varphi P''(T))}, \quad \mu_{сух} = \sum_{i=1}^4 \frac{y_i}{\mu_i},$$

де: P – загальний барометричний тиск; $P''(T)$ – тиск насиченої водяної пари в газовій суміші і дорівнює добутку тиску насиченої водяної пари над чистою водою чи льодом на коефіцієнт Пойтінга, зумовлений присутністю в газовій суміші інертних по відношенню до води (чи льоду) газів.

Для використання рівнянь стану обрані змінні P , T , d , ρ . В такому випадку воно має вигляд:

$$P = \frac{R \cdot T \cdot \rho}{\mu(d)} \left[1 + B(T, d) \frac{\rho}{\mu(d)} + C(T, d) \frac{\rho^2}{\mu^2(d)} \right],$$

де: ρ – густина вологого повітря; $B(T, d)$ – другий віріальний коефіцієнт вологого повітря; $C(T, d)$ – третій віріальний коефіцієнт вологого повітря; $\mu(d)$ – позірна молекулярна маса вологого повітря, що залежить тільки від вологовмісту, враховуючи, що вагова частка перших чотирьох компонент повітря не змінюється відносно одного кілограма (моля) сухого повітря.

У роботі розроблено рівняння стану чотирихлористого вуглецю з віріальними коефіцієнтами, як речовини, яка використана для апробації розробленої та поданої теорії випаровування. $Pv = RT(1 + B(T)\rho + C(T)\rho^2 + \dots)$. Для того, щоб скласти рівняння стану у віріальній формі, необхідно знати параметри потенційної функції міжмолекулярної взаємодії. В роботі використовується потенціал Леннарда – Джонса (6-12) $\varphi(r) = 4\varepsilon \left[\left(\frac{\sigma}{r} \right)^{12} - \left(\frac{\sigma}{r} \right)^6 \right]$. Для даного потенціала є табульовані значення коефіцієнтів

для розрахунку другого і третього зведених віріальних коефіцієнтів:

$$B(T) = b_0 B^*(T^*), \quad C(T) = b_0^2 C^*(T^*), \quad b_0 = \frac{2}{3} N \pi \sigma^3, \quad T^* = \frac{K_b T}{\varepsilon}$$

$$B^*(T^*) = \sum_{j=0}^{\infty} b_j (T^*)^{\frac{-(2j+1)}{4}}, \quad C^*(T^*) = \sum_{j=0}^{\infty} c_j (T^*)^{\frac{-(j+1)}{2}}$$

де: σ - значення r , при якому $\varphi(r) = 0$; $\frac{\varepsilon}{K_B}$ - глибина потенційної ями; T^* - зведена температура. Коефіцієнти b_i , c_i пов'язані з розрахунком Гама - функції Ейлера і незведених інтегралів.

Четвертий і п'ятий віріальні коефіцієнти розраховувались за аналогічними формулами:

$$D(T) = b_0^3 D^*(T^*), \quad E(T) = b_0^4 E^*(T^*), \quad b_0 = \frac{2}{3} N \pi \sigma^3, \quad T^* = \frac{K_B T}{\varepsilon}.$$

Для пошуку параметрів потенціалу Ленарда - Джонса чотирихлористого вуглецю були використані дані з термодинамічних і калоричних властивостей - p , v , T -дані, експериментальні дані по другому і третьому віріальному коефіцієнтам, дані по C_p .

Для отримання коефіцієнтів була застосована цільова функція:

$$\delta_{\text{ц}}^2 = \sum_1^n (\delta_{\text{pv}} x_{\text{pv}}^{\text{вс}})^2 + \sum_1^n (\delta_{\text{H}} x_{\text{H}}^{\text{вс}})^2 + \sum_1^n (\delta_{\text{S}} x_{\text{S}}^{\text{вс}})^2 + \sum_1^n (\delta_{\text{B}} x_{\text{B}}^{\text{вс}})^2 + \sum_1^n (\delta_{\text{C}} x_{\text{C}}^{\text{вс}})^2.$$

Ця функція описана в розрахункових процедурах як: FUNCTION FTFR. Вона дозволяє при необхідності використовувати статвагу $x_i^{\text{вс}}$.

Рівняння стану з віріальними коефіцієнтами для суміші газів, якою є вологе повітря, має такий же вигляд, як і для чистого, однокомпонентного газу, віріальні коефіцієнти суміші залежать від температури та концентрації суміші. Розрахунок віріальних коефіцієнтів $B_{\text{см}}$, $C_{\text{см}}$ газової суміші проводився за виразами:

$$B_{\text{см}} = \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^5 x_i x_j B_{ij}, \quad C_{\text{см}} = \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^5 \sum_{k=1}^5 x_i x_j x_k C_{ijk},$$

де: компоненти з номерами $i=1,2,3,4$ є відповідно N_2 , O_2 , CO_2 , Ar , компонента під номером п'ять є водяна пара, а x_i - мольні частки компонент газової суміші.

Таблиця 2.

Різниця температур сухого та мокрого термометрів в атмосферному повітрі при різних значеннях його температури ($^{\circ}C$) і відносної вологості:

ф, %	1			2			3		
	$T_{\text{сyx}} = -30,0$			$T_{\text{сyx}} = -20,0$			$T_{\text{сyx}} = -10,0$		
20	0,45	0,38	0,49	1,12	0,95	1,22	2,42	2,1	2,65
40	0,34	0,29	0,37	0,84	0,72	0,92	1,81	1,57	1,97
60	0,23	0,19	0,24	0,56	0,48	0,61	1,2	1,05	1,31
80	0,11	0,1	0,12	0,29	0,24	0,3	0,61	0,53	0,65
ф, %	1			2			3		
	$T_{\text{сyx}} = -0,0$			$T_{\text{сyx}} = +0,0$			$T_{\text{сyx}} = 10,0$		
20	4,53	4,01	4,92	4,72	4,16	5,14	7,43	6,68	7,52
40	3,34	2,97	3,62	3,49	3,09	3,8	5,42	4,9	5,48
60	2,2	1,96	2,37	2,3	2,14	2,49	3,52	3,2	3,55
80	1,09	0,98	1,16	1,15	1,02	1,03	1,73	1,58	1,73

1 - ГОСТ 8.524-85 (аспіраційний психрометр $A_p=7.947e-4$), 2 - ГОСТ 8.524-85 (станційний психрометр $A_p=6.620e-4$), 3 - розрахункові дані

Отримані розрахункові дані співставленні з експериментальними по значенням другого сумішевого віріального коефіцієнту.

Розроблена математична модель процесів випаровування дозволяє розраховувати значення температури мокрого термометра та різниці температур сухого та мокрого термометрів.

Роботоспроможність

моделі перевірена шляхом порівняння розрахункових даних зі стандартизованими, що наведено в таблиці (2). Розрахункові дані відрізняються від стандартних в межах 10-15 %, особливо від значень температур для аспіраційного термометра.

Це підтверджує правильність обраних умов проведення експериментів відповідно до умов аспіраційного психрометра. Наступним етапом апробації математичної моделі випаровування було співставлення результатів власних експериментальних вимірювань різниці температур між сухим та мокрим термометром з їх розрахунками. Результати порівняння наведені на рисунках (5-9) і свідчать про достовірність термодинамічної теорії тепловологісних процесів. Це дає змогу використати теорію для аналізу процесів формування втрат від випаровування під час холодильної обробки. Апробація математичної моделі додатково проведена на порівнянні експериментальних та розрахункових даних по різниці температур під час випаровування в атмосферне повітря етилового спирту, в залежності від тиску.

Рис. 5. Експериментальні та розрахункові дані ΔT під час випаровування води в атмосферне повітря при різних тисках і температурах сухого термометра.

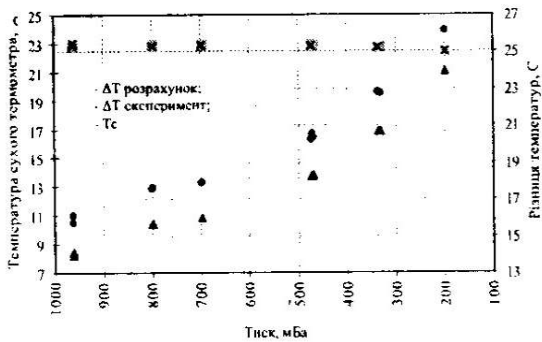


Рис. 7. Порівняння розрахункових та експериментальних даних ΔT під час випаровування чотирьоххлористого вуглецю в середовище азоту при різних тисках. (CCl_4 в N_2).

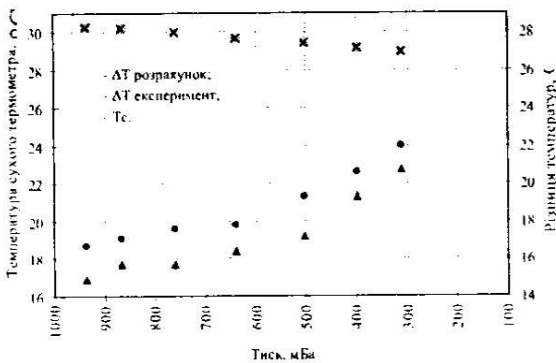


Рис. 6. Порівняння розрахункових та експериментальних даних ΔT під час випаровування чотирьоххлористого вуглецю в середовище двоокису вуглецю при різних тисках. (CCl_4 в CO_2)

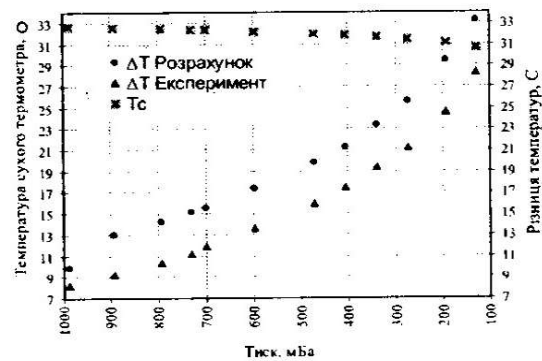


Рис. 8. Порівняння розрахункових та експериментальних даних ΔT під час випаровування води в середовище азоту при різних тисках. (вода в азот)

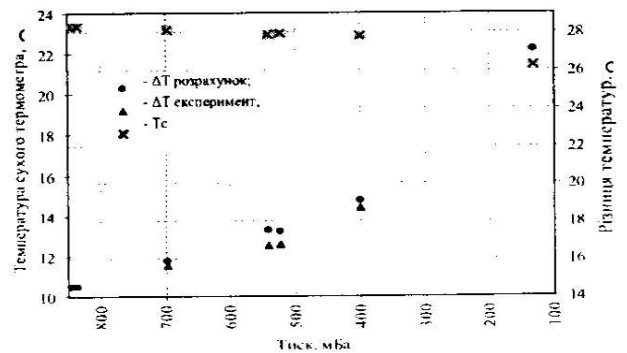
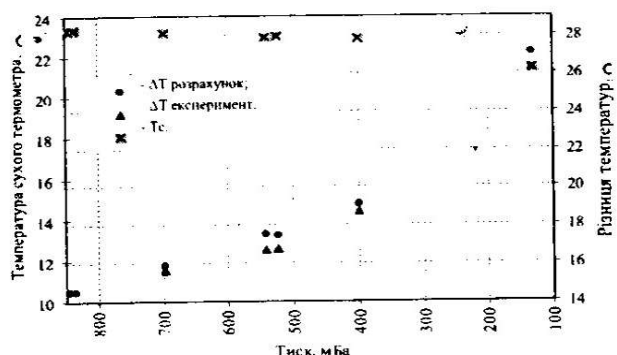


Рис. 9. Порівняння розрахункових та експериментальних даних ΔT під час випаровування нафталіну в середовищі двоокису вуглецю при різних тисках. ($C_{10}H_8$ в CO_2)



Таким чином, розроблена термодинамічна теорія тепловологісних процесів на прикладі процесів формування різниці температур сухого та мокрого термометрів може бути застосована при дослідженні розчинності води та інших речовин в атмосферному повітрі та відмінному від нього за складом газовому середовищі при різних значеннях тиску.

В четвертому розділі розглядається практичне застосування отриманих в дисертаційній роботі результатів. Виведені співвідношення для опису тепловологісних процесів холодильних технологій у камерах виробничих холодильників

З формул (1, 2) знайдено Δd , або кількість (масу) вологи $\Delta G = m \Delta d$, що засвоєна газовою сумішшю масою m в тепловологісному процесі:

$$\Delta G = \frac{\Delta Q - m \left(\frac{\partial i}{\partial \varphi} \right)_{P,d} \Delta \varphi - m \left(\frac{\partial i}{\partial P} \right)_{P,\varphi} \Delta P}{\left(\frac{\partial i}{\partial d} \right)_{P,\varphi}}, \quad (6) \quad \Delta G = \frac{\Delta Q - m \cdot C_{\text{вл.п}} \cdot \Delta T - m \left(\frac{\partial i}{\partial P} \right)_{T,d} \Delta P}{i_{H_2O}(P, T)}, \quad (7)$$

Знаменники формул (6) і (7) принципово відрізняються як кількісно, так і за фізичним змістом. Величина $\Delta Q = m \Delta i$ характеризує загальну зміну ентальпії повітря, як за рахунок зміни його температури, так і вологовмісту. Але розраховуватись ця величина повинна в рамках законів збереження теплоти та маси, повинна дорівнювати величині зміни ентальпії об'єктів взаємодії з повітрям – крапля рідини, капілярно-пористе тіло, продукт тощо. В цьому разі розрахунок ΔQ треба проводити через розрахунок температурних (ентальпійних) полів об'єктів.

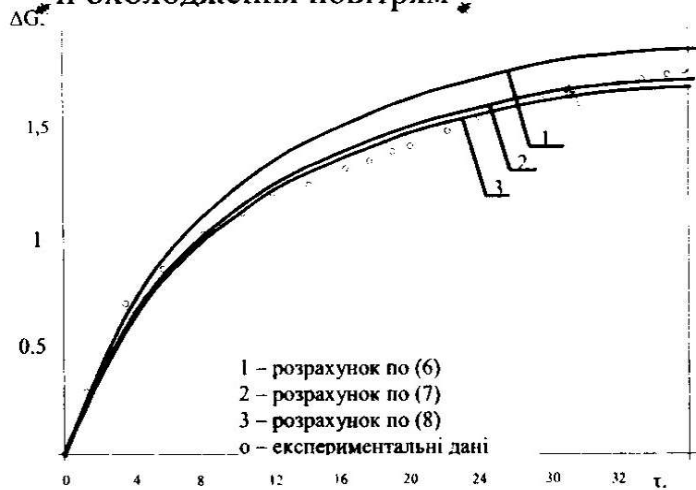
Таким чином, розрахунок втрат маси від усушки чи кількості вологи, що за своєю газовою середовище в тепловологісному процесі випаровування, потребує розрахунку тепловологісних похідних ентальпії повітря. В камерах холодильників зміни загального барометричного тиску повітря можна не враховувати, а з ним і тепловологісні похідні ентальпії по тиску.

Величину ΔQ не завжди можна віднести до фізичних величин, які можна безпосередньо виміряти. Тому є інтерес в комбінації формул (6) та (7) з виключенням ΔQ , що дає можливість одержати співвідношення, які містять тільки фізичні величини, отримані прямими вимірами:

$$\Delta G = m \frac{C_{\text{вл.п}} \Delta T - \left(\frac{\partial i}{\partial \varphi} \right)_{P,d} \Delta \varphi - \left[\left(\frac{\partial i}{\partial P} \right)_{d,\varphi} - \left(\frac{\partial i}{\partial P} \right)_{T,d} \right] \Delta P}{\left(\frac{\partial i}{\partial d} \right)_{P,\varphi} - i_{H_2O}(P, T)} \quad (8)$$

Якщо під час проведення експериментального дослідження випаровування вимірювати величини ΔG , m , ΔT , $\Delta \phi$, ΔP , то за допомогою (8) можлива апробація наведених співвідношень на адекватність експериментальним даним. Використовуючи співвідношення (8) необхідно, крім маси та її змін, вимірювати температуру та відносну вологість охолоджуючого повітря та їх зміну (від значень до взаємодії з об'єктом охолодження до значень після). Для підвищення точності розрахунків термодинамічних величин слід вимірювати тиск.

Рис. 10. Динаміка формування втрат маси четвертини з яловичини в процесі її охолодження повітрям



Апробацію розрахункових залежностей проведено на лабораторних дослідженнях тепловологісного процесу охолодження яловичини інших авторів. Результати порівняння розрахункових та експериментально визначених втрат від випаровування наведені в роботі в таблицях та показані на рис. 10. Запропонована методика розрахунків була підтверджена результатами експериментальних досліджень розчинності речовин в газовому середовищі та на дослідженнях усушки в процесах холодильної обробки м'яса.

Кращі результати отримані за використання співвідношення (8). Тому це співвідношення використано для розробки бази даних з величин усушки для систем технологічного контролю на виробничих холодильниках. Експериментальні дослідження не можуть охопити усю різноманітність умов та об'єктів охолодження, тому саме математичне прогнозування втрат від випаровування значно спрощує процеси побудови систем технологічного контролю та проектування.

Для оцінки впливу технологічних параметрів охолоджуючого середовища (t , v) та вагових кондицій сировини на тепломасообмінні характеристики процесів охолодження напівтуш було використано, інтерполяційну, одномірну крайову задачу теплопровідності в процесах холодильної обробки тіл неправильної геометричної форми. Розрахункові процедури дають результати прогнозування температурних полів та теплових потоків. Результати розрахунків за цією моделлю є вихідними

Таблиця 3.

Характеристики процесів охолодження напівтуші яловичини (масою 80, 100, 120 кг) під час реалізації швидкого способу охолодження

Трив. ГОД.	m=80 кг				m=100 кг				m=120 кг			
	$t_{пов}$	t_6	t_h	q	$t_{пов}$	t_6	t_h	q	$t_{пов}$	t_6	t_h	q
0	35,6	37,0	36,9	572,9	35,6	37,0	36,9	560,2	35,6	37,0	36,9	550
2	13,4	33,2	26,3	243,5	13,8	33,4	27,1	243,7	14,1	33,6	27,8	243,6
4	8,9	26,1	19,7	175,8	9,3	26,9	20,9	178,6	9,7	27,4	21,9	180,4
6	6,1	20,0	14,8	135,0	6,7	21,3	16,3	139,9	7,1	22,2	17,4	143,3
8	4,1	15,2	11,0	105,4	4,7	16,7	12,6	111,9	5,2	17,8	13,9	116,5
10	2,6	11,4	8,1	82,8	3,2	13,0	9,6	90,2	3,7	14,2	11,0	95,7
12	1,4	8,3	5,7	65,1	2,0	10,0	7,2	72,9	2,5	11,3	8,5	78,9
14	0,5	5,9	3,8	51,2	1,1	7,5	5,3	59,0	1,6	8,8	6,5	65,1
16	-0,3	4,0	2,4	40,2	0,3	5,5	3,7	47,7	0,8	6,8	4,9	53,8
18					-0,3	3,9	2,4	38,6	0,1	5,1	3,5	44,4
20									-0,3	4,0	2,6	38,4

Результати розрахунків за цією моделлю є вихідними

Результати розрахунків за цією моделлю є вихідними

даними для визначення втрат сировини від випаровування та представлені в роботі у вигляді графіків та таблиць, наприклад (табл. 3).

У роботі розроблені та рекомендовані норми втрат маси парного м'яса в напівтушах від усушки в процесах охолодження. Рекомендовані норми подані в таблицях, наприклад:

Таблиця 4.

Рекомендовані норми втрат маси парного м'яса від випаровування (усушки) в процесах охолодження яловичини дорослих тварин (перша категорія).

№	Середнє значення температури повітря в камері, °C	Середнє значення швидкості повітря за процес, м/с	Тривалість процесу (не більше), годин	Середня маса напівтуш в камері (не більше), кг	Категорія м'яса	Мінімальні розрахункові втрати від усушки	Максимальні розрахункові втрати від усушки	Рекомендовані розрахункові втрати від усушки
1	-3.0	0.8	17.6	130	1	1.38	1.40	1.40
2	-2.8	0.5	21.4	130	1	1.39	1.41	1.41
3	-2.6	0.5	21.4	130	1	1.40	1.42	1.42
4	-2.2	0.5	22.3	130	1	1.42	1.45	1.45
5	-2.0	0.5	22.3	130	1	1.44	1.46	1.46
6	-1.6	0.5	23.2	130	1	1.46	1.49	1.49
7	-1.4	0.5	24.2	130	1	1.47	1.50	1.50
8	-1.0	0.5	24.2	130	1	1.50	1.53	1.53
9	-0.6	0.5	25.3	130	1	1.52	1.56	1.56
10	-0.2	0.5	26.6	130	1	1.55	1.59	1.59
11	0.2	0.5	28.0	130	1	1.57	1.62	1.62
12	0.6	0.5	29.8	130	1	1.56	1.60	1.60
13	1.0	0.5	29.8	130	1	1.58	1.62	1.62

ВИСНОВКИ ТА РЕЗУЛЬТАТИ

1. Розроблена теоретично обґрунтована модель тепловологісних процесів випаровування на базі рівнянь стану з вірйальними коефіцієнтами, що дозволяє розраховувати характеристики газової суміші змінного складу в тепловологісному процесі.

2. Вперше використана розроблена термодинамічна теорія тепловологісних процесів для розрахунку втрат маси від усушки не упакованої харчової сировини яка також дозволяє розраховувати інші тепловологісні процеси (вакуумне охолодження харчових продуктів зі складною поверхнею теплообміну).

3. Спроектований та виготовлений експериментальний стенд та проведені експериментальні дослідження випаровування води, нафталіну, чотирьоххлористого вуглецю у газове середовище атмосферного повітря, азоту, двоокису вуглецю. Отримані експериментальні дані підтверджують розрахункові дані за розробленою моделлю. Розрахунки за виразом (4) відрізняються на рівні 5%, від стандартних експериментальних даних по аспіраційному психрометру.

4. Розроблено рівняння стану чотирьоххлористого вуглецю, що дозволило перевірити математичну модель тепловологісних процесів на власних експериментах по випаровуванню речовини відмінної від традиційної для таких експериментів води. Також проведено порівняння з характеристиками тепловологісних процесів інших досліджень, при цьому розбіжність не перевищує 10%.

5. Розроблено диференційовані норми втрат від випаровування в процесах охолодження м'яса в напівтушах у залежності від його виду, категорії, середньої за процес температури повітря в холодильній камері та швидкості руху повітря.

6. Отримані результати з моделювання втрат від випаровування були використані у технічній документації "Збірник технологічних інструкцій з холодильної обробки та зберігання м'ясної сировини" (до ДСТУ 6028:2008, ДСТУ 6030:2008, ДСТУ 7158:2010, ДСТУ 1588:91, ГСТУ 46.019-2002, ГОСТ 27095-86, ГОСТ 1935-55). *

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Желіба Ю.О. Дослідження процесів охолодження яловичини в напівтушах [Текст] / Ю.О. Желіба, М.В. Оніщенко, С.В. Харченко // Холодильна техніка і технологія. – 2008. – № 4 (114). – С. 54-58.

Особистий внесок здобувача: проведені розрахунки, виконано оформлення результатів.

2. Желіба Ю.О. Математичне моделювання характеристик процесів охолодження свинини в напівтушах [Текст] / Ю.О. Желіба, М.В. Оніщенко, С.В. Харченко // Холодильна техніка і технологія. – 2008. – № 6 (116). – С. 46-51.

Особистий внесок здобувача: проведені модельні розрахунки, виконано оформлення результатів, підготовлені матеріали до друку.

3. Експериментальне дослідження розчинності в газове середовище довільного складу [Текст] / В.П. Оніщенко, Ю.О. Желіба, С.В. Харченко, М.В. Оніщенко // Холодильна техніка і технологія. – 2012. – № 3 (137). – С. 57-62.

Особистий внесок здобувача: розроблено стенд, проведені тарировочні експериментальні дослідження, побудована методика досліджень.

4. Желиба Ю.А. Математическое моделирование формирования потерь массы пищевого сырья от усушки при его холодильной обработке и хранении [Текст] / Ю.А. Желиба, С.В. Харченко // "Сталий розвиток і штучний холод": Збірник наукових праць VIII-ї міжнародної науково-технічної конференції. – Гринь Д.С., – 2012. – С. 288-290.

Особистий внесок здобувача: проведені чисельні розрахунки різних варіантів технологічних процесів.

5. Оніщенко, В.П. Математичне моделювання тепловологісних процесів випаровування [Текст] / В.П. Оніщенко, Ю.О. Желіба, С.В. Харченко // Харчова наука і технологія. – 2013. – № 1 (22). – С. 97-101.

Особистий внесок здобувача: розроблені процедури розрахунків для апробації математичної моделі, проведено літературний пошук.

6. Оніщенко, В.П. Экспериментальное исследование тепловлажностных процессов испарения на примере нафталина и четырёххлористого углерода [Текст] / В.П. Оніщенко, Ю.А. Желиба, С.В. Харченко // Пищевая промышленность: наука и технологи. – 2013. – № 4 (22). – С. 86-91.

Особистий внесок здобувача: проведені експериментальні виміри, проведена обробка результатів.

7. Оніщенко, В.П. Термодинамічна теорія випаровування. Математичне моделювання та апробація [Текст] / В.П. Оніщенко, Ю.О. Желіба, С.В. Харченко // Фізика аеродисерсних систем: Межведомственный научный сборник. – Одесса: ОНУ ім. Мечникова І.І., 2013. – Випуск 50. – С. 12-22

Особистий внесок здобувача: проведені експериментальні виміри, розроблена методика обробки результатів, проведено співставлення розрахункових та експериментальних величин, підготовлені матеріали до друку.

8. Онiщенко, В.П. Експериментальне дослідження тепловологісних процесів випаровування [Текст] / В.П. Онiщенко, Ю.О. Желіба, С.В. Харченко // Харчова наука і технологія. – 2013. – № 3 (24). – С. 94-96.

Особистий внесок здобувача: проведені експериментальні виміри, визначені похибки, оформлені результати.

9. Онiщенко, В.П. Исследование тепловлажностных процессов испарения в газовую среду произвольного состава [Текст] / В.П. Онiщенко, Ю.А. Желиба, С.В. Харченко // Хранение и переработка сельхоз сырья. – 1 – 2014. – С. 24-26.

Особистий внесок здобувача: експериментальні дослідження, апробація методики досліджень, розроблені розрахункові процедури.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ АПРОБАЦІЙНОГО ХАРАКТЕРУ

1. Дослідження процесів програмного охолодження м'яса [Текст] / Ю.О. Желіба, М.В. Онiщенко, В.Б. Владiмiрова, С.В. Харченко // Стратегічні напрямки розвитку підприємств харчових виробництв, ресторанного господарства і торгівлі: тези доп. міжн. наук.-практ. конф. Частина 1. – Харків: ХДУХТ. – 2008. – С. 333-334.
2. Еколого-енергетичні аспекти процесів охолодження м'ясої сировини [Текст] / Ю.О. Желіба, М.В. Онiщенко, Т.О. Желіба, С.В. Харченко // Людина та навколишнє середовище-проблеми безперервної екологічної освіти в вузах: зб. наук. пр. XIII міжвуз. наук.-метод. конф. – Одеса. – 2009. – С. 115-116.
3. Експериментальне дослідження та математичне моделювання процесу випаровування нафталіну у повітря при атмосферному та знижених тисках [Текст] / Ю.О. Желіба, В.Б. Владiмiрова, М.В. Онiщенко, С.В. Харченко // Сучасні проблеми холодильної техніки та технології: зб. тез доп. 6-ої міжнар. наук.-практ. конф. – Одеса: ОДАХ, – 2009. – С. 170-172.
4. Желіба, Ю.О. Технологічні особливості охолодження м'яса в напівтушах [Текст] / Ю.О. Желіба, В.П. Онiщенко, С.В. Харченко // Сучасні проблеми холодильної техніки і технології: зб. тез доп. міжнар. наук.-практ. конф. - Одеса: ОНАХТ, - 2011. - С. 128-130.
5. Технологічні особливості попереднього охолодження м'яса в напівтушах [Текст] / Ю.О. Желіба, Т.О. Желіба, М.В. Онiщенко, В.П. Онiщенко, С.В. Харченко // Сучасні проблеми холодильної техніки і технології: зб. тез доп. міжнар. наук.-практ. конф. – Одеса: ОНАХТ, – 2011. – С. 130-132.
6. Онiщенко В.П. Экспериментальное исследование и термодинамическое моделирование процесса испарения тетрахлорметана в атмосферу азота [Текст] / В.П. Онiщенко, Ю.А. Желиба, С.В. Харченко // Сучасні проблеми холодильної техніки і технології: зб. тез доп. міжнар. наук.-практ. конф. - Одеса: ОНАХТ, - 2011. - С. 105-107.
7. Онiщенко В.П. Термодинамическое моделирование процессов испарения жидкостей в газовые среды [Текст] / В.П. Онiщенко, Ю.А. Желиба, А.Г. Гришкорин, С.В. Харченко // Прогресивна техніка та технології харчових виробництв, ресторанного та готельного господарства і торгівлі. Економічна стратегія і перспективи розвитку сфери торгівлі та послуг: зб. тез доп. міжнар. наук.-практ. конф. Ч.2. - Одеса: ОНАХТ, - 2011. - С. 90-91.
8. Технологічні інструкції для здійснення процесів охолодження, заморожування та зберігання різних видів м'яса на промислових холодильниках [Текст] / В.П. Онiщенко,

✓ 018540

- Ю.О. Желіба, В.І. Попов, С.В. Харченко // Сучасні проблеми холодильної техніки: зб. тез доп. 7-ї міжнар. наук.-техн. конф. - Одеса: ОДАХ, - 2011. - С. 129-131.
9. Термодинамическое моделирование процессов формирования потерь массы пищевого сырья при его холодильной обработке и хранении [Текст] / В.П. Онищенко, Ю.А. Желиба, Фатхи Даях, С.В. Харченко // Сучасні проблеми холодильної техніки: зб. тез доп. 7-ї міжнар. наук.-техн. конф. – Одеса: ОДАХ, – 2011. – С. 138-141.
10. Онищенко В.П. Формування втрат харчової сировини при її холодильній обробці від усушки в рамках термодинамічної моделі [Текст] / В.П. Онищенко, Ю.О. Желіба, С.В. Харченко // Проблеми енергоефективності та якості в процесах сушіння харчової сировини: зб. тез доп. Всеукр. нау.-практ. конф. - Харків: ХДУХТ, - 2011. - С. 57-59.
11. Харченко С.В. Результати експериментального дослідження процесів випаровування у газове середовище двоокису вуглецю / С.В. Харченко // "Стан, досягнення і перспективи холодильної техніки і технології": Всеукр. наук.-техн. конф. молодих вчених та студентів. – Одеса: ОДАХ, – 2012. – С. 30-31.: табл.
12. Харченко, С.В. Математичне моделювання тепловологісних процесів випаровування [Текст] / С.В. Харченко // "Стан, досягнення і перспективи холодильної техніки і технології": Всеукр. наук.-техн. конф. молодих вчених та студентів. – Одеса: ОНАХТ, – 2013. – С. 7-9.

АННОТАЦИЯ

Харченко С.В. Исследование испарения в газовую среду произвольного состава. – Рукопись.

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.14.06 – «Техническая теплофизика и промышленная теплоэнергетика». – Одесская национальная академия пищевых технологий. Одесса 2014 г.

Решена задача разработки теории на базе вириальных уравнений состояния веществ для моделирования характеристик газовой смеси переменного состава в тепловлажностном процессе. Разработана термодинамическая теория тепловлажностных процессов для расчёта потерь массы при испарении не упакованного пищевого сырья. Разработано уравнение состояния четырёххлористого углерода с вириальными коэффициентами, что позволило проверить математическую модель тепловлажностных процессов на собственных экспериментальных данных по испарению веществ отличных от воды. Также проведено сравнение с характеристиками тепловлажностных процессов других исследований, при этом расхождение не превышало 10%. Экспериментальное исследование по определению разности температур сухого и мокрого термометров проводилось при рабочих давлениях 0,15 - 1 бар на примере испарения четырёххлористого углерода, нафталина и воды в газовую среду атмосферного воздуха, азота, двуокиси углерода. Вириальные коэффициенты рассчитывались для потенциала Леннард - Джонса, параметры которого определялись по экспериментальным данным о вириальных коэффициентах и по термодинамическим свойствам жидкостей (компоненты влажного воздуха, четырёххлористый углерод). Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена теория об изобарно-изоэнтальпийном протекании процесса испарения.

Разработана и апробирована термодинамическая теория тепловлажностных процессов в холодильной технологи. Апробация проведена путём сопоставления расчётных и экспериментальных данных различных авторов по потерям массы в

процесах охолодження. Розроблені та рекомендовані норми списання потерь маси парного м'яса в напівтушах від випаровування (усушки) в процесах охолодження. Норми диференційовані по середній за процес температурі повітря в камері, швидкості повітря, виду парного м'яса, категорії. Практичне використання отриманих результатів: розроблена методика розрахунку потерь маси харчового сировини при холодильній обробці; результати по потерям від випаровування використані в технічній документації «Збірник технологічних інструкцій з холодильної обробки та зберігання м'ясної сировини» (до ДСТУ 6028:2008, ДСТУ 6030:2008, ДСТУ 7158:2010, ДСТУ 1588:91, ГСТУ 46.019-2002, ГОСТ 27095-86, ГОСТ 1935-55)..

Ключевые слова: тепловлажностные процессы, испарение, температура мокрого термометра, нормы потерь, математическое моделирование, экспериментальное исследование.

АНОТАЦІЯ

Харченко С.В. Дослідження випаровування у газове середовище довільного складу. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.06 – «Технічна теплофізика і промислова теплоенергетика». – Одеська національна академія харчових технологій. Одеса, 2014 р.

Вирішена задача з розробки єдиного, теоретично обґрунтованого, підходу до моделювання тепловологісних процесів випаровування рідких (сублімації твердих) речовин у газове середовище. Розроблено рівняння стану з віріальними коефіцієнтами чотирьоххлористого вуглецю та газової суміші в яку проходив процес випаровування різних речовин та її компонентів. Віріальні коефіцієнти розраховувались для потенціалу Леннарда – Джонса. Теоретично обґрунтована та експериментально підтверджена теорія про ізобарно-ізоентальпійне протікання процесу випаровування. Експериментальне дослідження різниці температур сухого і вологого термометрів проводилось при робочих тисках 0,15- 1 бар на прикладі випаровування чотирьоххлористого вуглецю, нафталіну та води в газове середовище атмосферного повітря, азоту, двоокису вуглецю. Апробацію теорії проведено шляхом співставлення розрахункових та чисельних експериментальних даних.

Розроблено та апробовано термодинамічну теорію тепловологісних процесів у холодильній технології. Апробація проведена співставленням розрахункових і експериментальних даних різних авторів по втратах маси у процесах охолодження. Розроблені та рекомендовані норми втрат маси парного м'яса в напівтушах від випаровування (усушки) в процесах охолодження. Норми диференційовані по середній за процес температурі повітря в камері та подані для підвищених вагових кондицій напівтуш м'яса з урахуванням його категорії. Практичне використання отриманих результатів знайшло відображення у застосуванні в технологіях холодильної обробки харчової сировини тваринного походження; у розробці методики розрахунку втрат маси харчової сировини.

Ключові слова: тепловологісні процеси, випаровування, температура вологого термометра, норми втрат, математичне моделювання, експериментальні дослідження.

ANNOTATION

Harchenko S. Study of Evaporation Processes into gaseous medium of optional composition.-Manuscript.

Dissertation for candidate degree of technical sciences, according major "05.14.06 – Technical thermal physics and industrial heat and power engineering " – Odessa National Academy of Food Technology, Odessa, 2014.

The thesis is about solving following scientific problem pointed at developing of single, theoretically validated approach for process modelling of heat and humidity evaporating processes of liquid substance or solids sublimation into gaseous medium. Equations of state with virial coefficients for carbon tetrachloride and for gaseous mixture in which process evaporating (sublimation) for various substances and its components are developed. Virial coefficients are calculated for Lennard-Jones Potential. Isobaric-isoenthalpy behavior of process evaporation theory is theoretically well grounded and experimentally validated.

Case study for temperature difference of dry-bulb thermometer and wet-bulb thermometer is conducted for operating pressure from 0,15 to 1 bar for carbon tetrachloride evaporation, naphthalene and water into gaseous medium of atmospheric air, nitrogen, carbon dioxide. Theory approbation is conducted with calculated and numerical experimental data relation.

Thermodynamic theory for heat and humidity processes in the refrigeration technology of food is developed and validated. Approbation is conducted with calculated and numerical experimental data relation of different authors concerning mass loss in the refrigerating processes. Fresh-killed meat mass loss standards in the half-carcass from water loss (loss of weight) in the refrigerating processes are developed and mentioned recommendations. Standards are differentiated concerning average air temperature in the cold room during the refrigerating process performing and they are proposed for rising weight conditions for half-carcass of meat taking into account its category. Practical use of defined results are represented in the refrigerating technology of animal edible raw material processing in the design procedure development concerning edible raw material mass loss.

Keywords: *heat and humidity processes, evaporating processes, wet-bulb thermometer temperature, mass loss standards, mathematical modeling, case study.*