

ЦИКЛ ОХОЛОДЖУЮЧОГО ПОВІТРЯ

Федорів В.Г., д.т.н., професор Уманського державного аграрного університету
Виноградов-Салтиков В.О., к.т.н., доцент Національного університету харчових
технологій

Резюме: Для використання фахівцями з холодильної техніки і технології пропонується цикл зміни стану повітря, що циркулює в холодильних камерах. Цикл дозволяє спростити технологічні розрахунки процесів зберігання і термічної обробки продуктів, а також пояснити особливості цих процесів.

Основним теплоносієм під час термічної обробки та зберігання харчових продуктів є повітря. Повторне використання (циркуляція) повітря дозволяє зберігати енергію на його нагрівання або охолодження, а також якість продуктів. Особливе значення це питання набуває за умов заморожування та зберігання морожених продуктів, оскільки енергоємність обробки повітря при цьому різко зростає.

Розрахунки процесів охолодження, зволоження, нагрівання повітря під час його кондиціювання, а також сушіння, зберігання та холодильної обробки харчових продуктів звичайно проводяться за допомогою ***Hd***-діаграми. Крім „стандартних” параметрів, на цій діаграмі намагаються визначити інші потрібні для практичних розрахунків характеристики. Наприклад, рівноважні волого вмісти різних продуктів та матеріалів, для чого наносять ізолінії вологості цих продуктів на підставі відповідних кривих сорбції-десорбції [1].

Ми вважаємо, що корисно будувати на ***Hd***-діаграмі цикли повітря, що циркулює в камері холодильної обробки або зберігання продуктів. Найпростіше будувати цикл для замкненої циркуляції – цього разу кількість сухого повітря в камері залишається незмінною, а інфільтрація через огороження компенсується витоками повітря через нещільності в них. Це зручно тому, що основні параметри вологого повітря - ентальпію ***H*** та вологовміст ***d*** відносять до 1 кг сухого повітря, відповідно ***H* [кДж/кг_{c.n}]** та ***d* [г/кг_{c.n}]**.

Розглянемо процеси зміни стану вологого повітря під час зберігання м'ясопродуктів в штабелях (вибір продуктів не є принциповим). Після контакту із продуктом повітря має доволі високе значення відносної вологості ϕ (чим більше міра завантаженості камери, тим ϕ більше), візьмемо $\phi=90\%$. Побудувати точку **1** у *Hd*-діаграмі (рис.1), що відповідає цьому станові, дуже просто - за показами психометра, який розташовують перед повітроохолоджувачем. Під час контакту з його поверхнею повітря охолоджується до точки роси – процес **1-2**. При цьому волого вміст залишається незмінним ($d_1 = d_2$), а ентальпія зменшується за рахунок відведення „сухої” теплоти. У точці **2** починає випадати іней практично з усього потоку повітря, оскільки воно добре перемішується в охолоджувачі. Далі охолодження повітря відбувається по лінії $\phi=100\%$ - процес **2-3**, переважна більшість інею при цьому відкладається на поверхнях охолоджувача. Закінчується охолодження повітря у точці **3**, що лежить на кілька кельвінів* вище ізотерми, яка відповідає температурі холодоагенту t_x . Положення точки **3** можна визначити з рівнянь теплового балансу і теплопередачі в охолоджувачі, або простіше поміряти температуру повітря на виході з охолоджувача.

Якщо нехтувати інфільтрацією через огороження камери, то можна вважати, що процес **3-4** нагрівання повітря за рахунок будь-яких теплоприпливів до нього буде вертикальною лінією. Положення точки **4**, взагалі, може бути різним. Аналіз робіт [2, 3], що присвячені співвідношенню внутрішнього і поверхневого тепломасообміну за умов холодильної обробки та зберігання продуктів показує, що під час заморожування та зберігання м'яса вологість його поверхневого шару є значно меншою за критичну, яка відповідає закінченню першого періоду сушіння, коли температура поверхні продукту дорівнює температурі мокрого термометра. Швидкість випаровування є принаймні на порядок меншою, ніж під час конвективного сушіння, це дає підставу нехтувати ентальпією води, що у вигляді пари переходить до повітря, тобто вважати цей процес **4-1** адіабатним.

Іншими словами $H_4=H_1$. Таким чином, положення точки 4 цього разу визначається перетином ліній $d_3 = const$ та $H_1 = const$.

Побудований цикл підтверджує відомий зв'язок між теплоприпливами до повітря за якийсь час обробки або зберігання Q , $Дж$, та відповідним усиханням продукту M , $кг$

$$\varepsilon_{mv} = \frac{Q}{M} = \frac{H_4 - H_3}{d_1 - d_3}$$

де за ε_{mv} можна закріпити назву „тепловологісна характеристика”, як назвав відношення $\Delta H/\Delta d$ В.З.Жадан [4]. Різниці ΔH і Δd він запропонував назвати асиміляційною здатністю повітря по теплоті та по волозі. В роботі [5] наведено критику назви „тепловологісна характеристика” на підставі того, що ΔH складається з приросту як чисто теплового, так і вологісного компонентів. На наш погляд це зауваження не є істотним, бо і сама величина H за визначенням має вологісний компонент, оскільки до неї входить ентальпія пари у повітрі.

Під час зберігання м'ясопродуктів у камерах розподільних холодильників основну частину Q складають теплоприпливи через зовнішні огороження. Це підтверджують результати досліджень кількох холодильників у різних кліматичних регіонах України та з різними системами охолодження, що були проведені за участю авторів. Відношення Q/M коливається у дуже вузьких межах 27,7-27,9 $МДж/кг$. До речі, це дає можливість оцінити частку Q , яка витрачається безпосередньо на випаровування води з продукту. Теплота випаровування води при температурах від 0 до $-30^\circ C$ майже не змінюється і складає величину трохи більшу за 2,5 $МДж/кг$. Таким чином біля 9% теплоти, що надходить до повітря у камерах зберігання м'яса, витрачається на випаровування води з м'яса, цю величину треба враховувати при обрахунках охолоджувачів та повітропроводів. Для овоче- та фруктосховищ час зберігання соковитої рослинної сировини буде найдовшим, а якість – найкращою, якщо тепловологісна характеристика, за думкою В.З.Жадана [4], лежатиме біля 6,24 $МДж/кг$. Цикл *1-2-3-4-1* підтверджує, що стан ізоляції огорожень

холодильників визначає не лише витрати енергії на холодильні процеси, але також втрату якості та кількості продукції, що обробляється або зберігається. Висушування, доповнення або заміна теплової та гідравлічної ізоляції призведе до зменшення Q , отже точка $4'$ буде лежати нижче за точку 4 (рис.1), точка $1'$ – на лінії $\varphi = \varphi_1$, точка $2'$ – на лінії $\varphi = 100\%$ нижче за точку 2 . Для нового циклу величина ε_{mv} може лише трохи зрости за рахунок зростання кривини лінії $\varphi = 100\%$ зі зменшенням величини d , але усихання продукту M зменшиться в значно більшій мірі, майже пропорційно зменшенню Q .

Побудова циклу охолоджуючого повітря дозволяє пояснити деякі факти, які довгий час вважалися за парадоксальні. Це відомий „парадокс Рютова”: абсолютна величина усихання м'яса не залежить від кількості завантаженого до камери м'яса [6]. З рис.2 витікає, що за умов завантаженості мороженого м'яса у камері ємністю 260 т у розмірі 50 т, 100 т, 160 т та 260 т і однакової температури повітря відносна вологість повітря φ зростає з 89 до 96%, відносна усушка m спадає з 8,4 до 2,2%, а абсолютна усушка M майже не змінюється – з 4,7 до 5,2 т. Змінення маси м'яса, що зберігається у камері, майже не впливає на теплоприплив Q та на тепловологісну характеристику ε_{mv} , тому величина Δd та m лишаються практично незмінними.

Інший відомий факт, що із зниженням температури повітря у камері зберігання мороженого м'яса усихання продукту зменшується, хоча Q може збільшуватися за рахунок збільшення рушійної сили теплопередачі – температурного напору – теж вважається парадоксальним. Г.Б.Чижов пояснив цей факт збільшенням відносної рівноважної вологості повітря [7], але збільшення φ само по собі ще не гарантує зменшення M . На наш погляд, цьому може сприяти також задане вище зростання кривини лінії $\varphi = 100\%$ із зниженням температури повітря, тобто співвідношення між основними параметрами вологого повітря. На рис.3 побудовано три цикли із зниженням t від t_{11} до t_{12} та t_{13} та приблизним збільшенням Q . Ці цикли показують, що величина $\Delta d = d_1 - d_3$, отже й M при цьому можуть збільшуватися в більшій мірі, ніж зростає Q .

Під час побудови реальних циклів необхідно знати фактичні тепло припливи через огороження, оскільки вони завжди відрізняються від розрахункових. Бажано вимірювати Q за допомогою малогабаритних тепломірів, які на замовлення вгтовляються на кафедрі теплотехніки НУХТ. Необхідно також мати інформацію, яка частина Q може передаватися продуктам шляхом випромінювання, яка інтенсивність дихання або автолітичних процесів, випарна здатність продуктів. Більшість цих величин стало можливим визначити за виробничих умов з розвитком тепломасометрії [8], тому використання запропонованого циклу під час вивчення, налагодження та оптимізації процесів термічної обробки і зберігання продуктів є перспективним.

Висновки. Ідеалізований цикл повітря, що показано на прикладі процесу зберігання мороженого м'яса в камері із замкнутої схемою циркуляції повітря, що може бути використаний як основа для побудови конкретних циклів в умовах експлуатації та проектування холодильних камер обробки та зберігання різних продуктів. Невеликі витрати часу та фінансів на цю побудову можуть привести до рекомендацій із енерго– та ресурсозбереження.

* не градусів – майже 40 років тому XIII Генеральна конференція з мір та ваг прийняла визначення: Кельвін дорівнює $1/273,16$ частини термодинамічної температури потрійної точки води. У похідних одиницях вже прийнято писати K замість град (масова теплоємність – $Дж/(кг K)$), а для основної – сила звички є завеликою.

Література

1. Загоруйко В.А., Голиков А.А., Слинко А.Г. Термодинаміка и теплофізика влажных материалов. – Киев: Найк.думка, 1995. -296 с.
2. Fleming A.K., Earle R.L. Cooling and freezing of lamb and mutton carcasses. 2.Weight loss during cooling. – Food Technol., 22, 1968, pp. 165 -171.

3. Comini G. Physical aspects of mass losses in foodstuffs - XIV International Congress of Refrigeration Moscow, Sept 20-3-, 1975, N64538, 16 p.
4. Жадан В.З. Теплофизические основы хранения сочного растительного сырья на пищевых предприятиях. – М.: Пищевая пр-сть, 1972. – 154 с.
5. Экономия энергоресурсов и сокращение потерь продукции при холодильной обработке / Чумак И.Г. и др. – Киев: Вища шк., 1990. –166 с.
6. Христодуло Д.А., Рютов Д.Г. Быстрое замораживание мяса. – М., Л.: Пищепромиздат, 1939.- 200 с.
7. Чижов Г.Б. Теплофизические процессы в холодильной технологии пищевых продуктов. – М.: Пищевая пром-сть, 1971. – 304 с.
8. Федоров В.Г. Основы тепломассометрии. – К.: Вища шк., 1987. – 184 с.

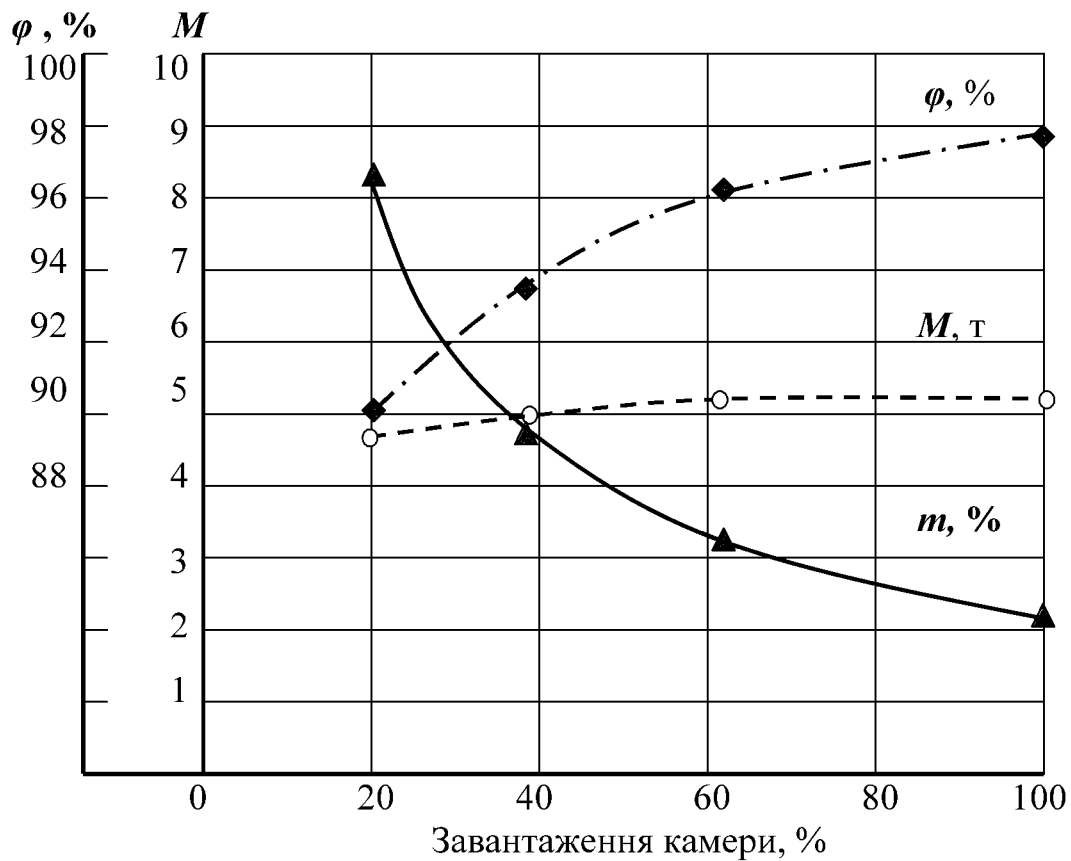


Рисунок 2. Відносна та абсолютна усушка при зберіганні м'яса в залежності від завантаження камери

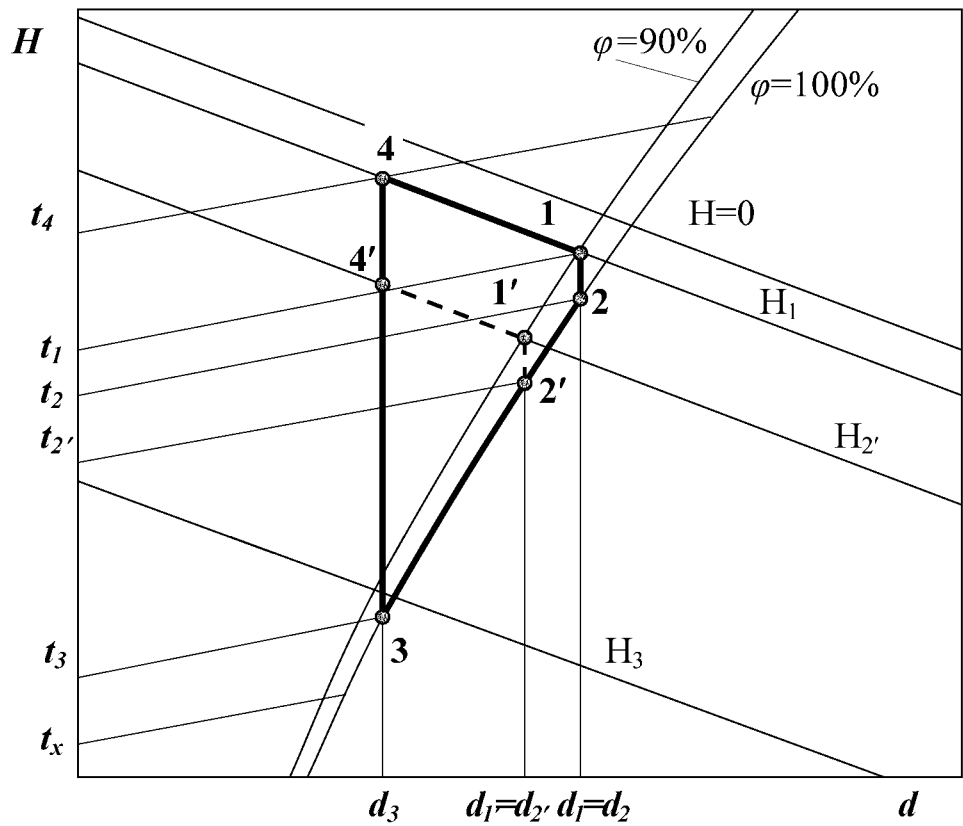


Рисунок 1. Цикл охолоджуючого повітря під час зберігання мороженого м'яса

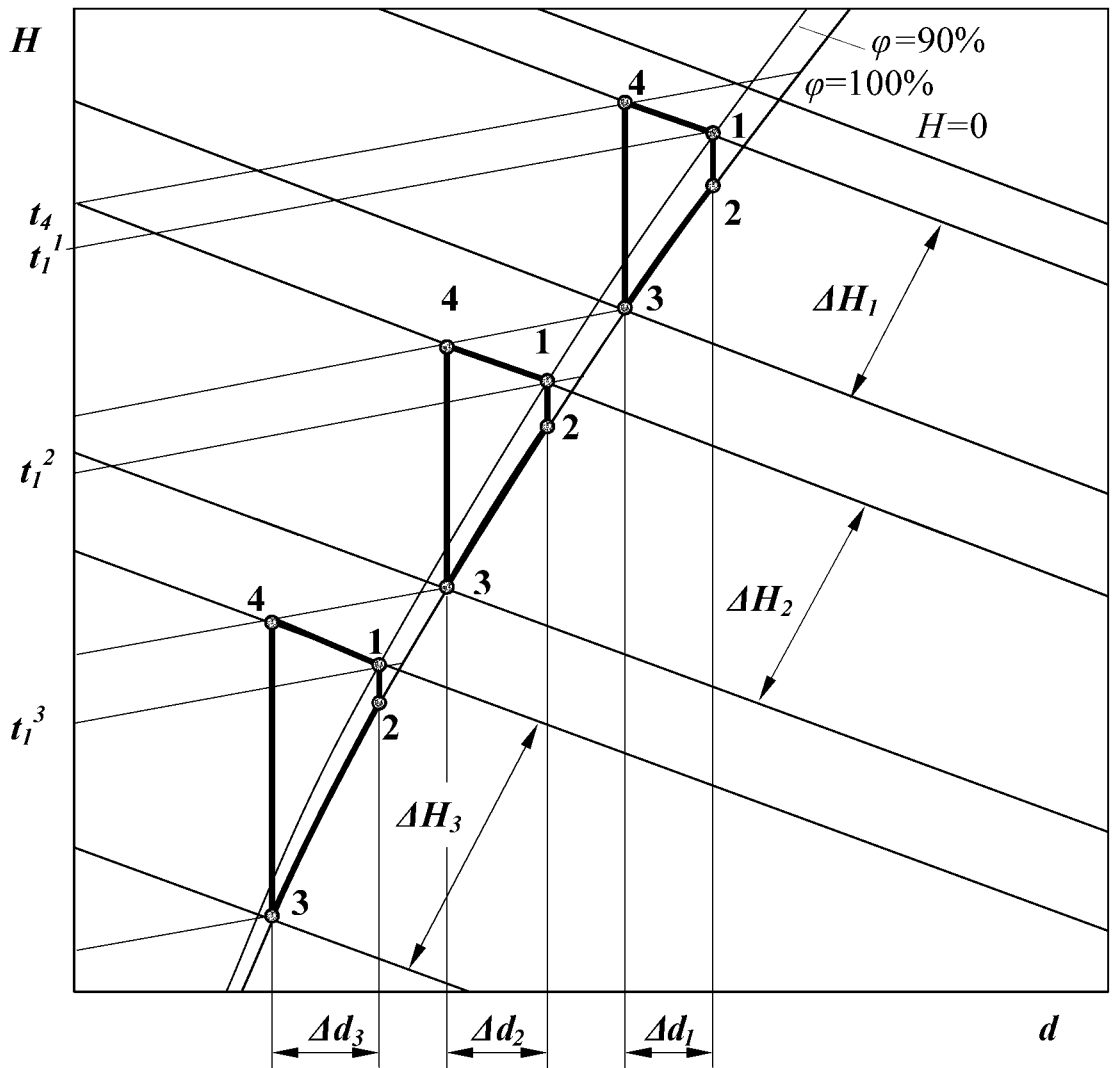


Рисунок 3. Деформація циклу при зниженні температури повітря