

УДК 621.565; 621.560

Н.В. Жихарєва

Одеська національна академія харчових технологій, навчально-науковий інститут холоду, кріотехнологій та екоенергетики ім. В.С. Мартиновського, вул. Дворянська, 1/3, Одеса, 65082, Україна

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПЛІВКОВОГО ЗВОЛОЖУВАЧА ДЛЯ ПЛОДООВОЧЕСХОВИЩ

Розроблена математична модель плівкового зволожувача для плодоовочесховищ. Перевірена адекватність даної моделі та проведений розрахунок плівкового зволожувача плодоовочесховища. Даний зволожувач реалізований на типовому плодоовочесховищі.

Ключові слова: плівковий зволожувач – плодоовочесховище – тепло-масообмін – математична модель – система охолодження

Н.В. Жихарєва

Одесская национальная академия пищевых технологий, учебно-научный институт холода, кріотехнологій и эконенергетики им. В.С. Мартыновского, ул. Дворянская, 1/3, Одесса, 65082, Украина

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПЛЕНОЧНОГО УВЛАЖНИТЕЛЯ ДЛЯ ПЛОДООВОЩЕХРАНИЛИЩ

Разработана математическая модель пленочного увлажнителя для плодоовощехранилищ. Проверена адекватность данной модели и проведен расчет пленочного увлажнителя для плодоовощехранилища. Данный увлажнитель реализован на типовом плодоовощехранилище.

Ключевые слова: пленочный увлажнитель – плодоовощехранилище – тепло-масообмен – математическая модель – система охлаждения.

DOI: 10.15673/0453-8307.6/2014.30993



This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY). <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

I. ВСТУП

Задача зберігання плодоовочевої продукції є досить складною, тому що ефективність її збереження на холодильниках залежить не тільки від створення в камерах оптимальних умов, що враховують особливості окремих видів плодів, але і від правильного вибору найбільш придатних по ліжкоздатності сортів і якості продукції, що надходять та установок плодоовочесховищ. Найсучасніша техніка і технологія охолодження і зберігання фруктів не зможе забезпечити тривале збереження їх при низькій первісній якості. Ефективність зберігання багато в чому залежить також від своєчасного і ретельного виконання комплексу підготовчих робіт: збирання, сортування, упакування і транспортування фруктів, у деяких випадках обробки їх спеціальними антисептиками (наприклад, винограду) та від правильно підбраного устаткування.

Важливо також мати на увазі, що в даний час в Україні більш доцільно проводити повсюдну реконструкцію діючих плодоовочесховищ, ніж будівництво нових об'єктів. І тут на перший план виступає задача вибору оптимальних технічних

рішень як при розробці холодильника як модуля, так і системи охолодження камер і приладів охолодження. Ця задача багатофакторна.

Аналіз тепло-вологісних балансів і досвід експлуатації холодильних камер плодоовочесховищ показує, що в теплий час року майже у всіх камерах відчувається брак вологи і потрібне зволоження повітря камер, а в холодний час – виникає її надлишок, і повітря необхідно осушувати.

Велике значення для підтримки параметрів в плодоовочесховищі має зволожувач.

Метою роботи є розробка математичної моделі зволожувачів повітря для плодоовочесховищ.

II ПРИБОРИ ДЛЯ ЗВОЛОЖЕННЯ ПОВІТРЯ КАМЕР ПЛОДООВОЧЕСХОВИЩ

З усіх процесів тепло-вологісної обробки повітря холодильних камер найбільш складним і найменш вивченим є процес зволоження [1,2]. Складність його здійснення в умовах холодильників пояснюється тим, що при знижених температурах різко зменшуються зони і точність регулюван-

ня відносної вологості і може відбутися замерзання вологи. Тому до зволожуючих пристроїв холодильних камер пред'являється ряд додаткових вимог.

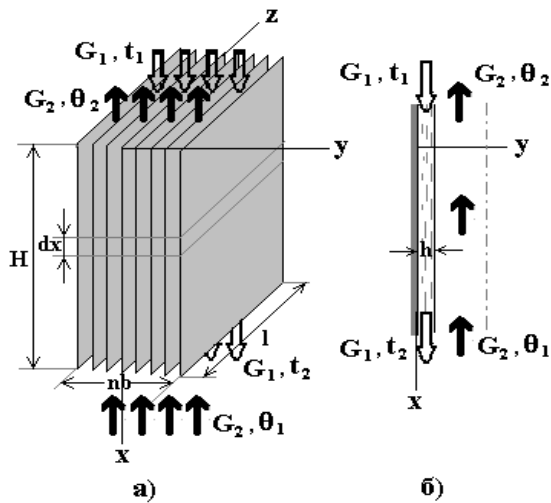


Рисунок 1 – Схема зволожуючого пристрою плівкового типу

Існують два основних методи штучного зволоження повітря, що можуть бути застосовані на фруктових холодильниках: зволоження парою і зволоження водою.

Метод зволоження парою зв'язаний з великою витратою холоду (до 50%). Для зволоження рекомендується нагтовлювати в спеціальних (найчастіше електричних) кип'ятильниках, заповнених чистою водою. При використанні пари від промислових котлів у кожному окремому випадку повинен проводитися аналіз на відсутність запахів і домішок.

На наш погляд найбільш перспективним методом зволоження повітря в камерах зберігання є застосування плівкових насадок. У плівкових зволожувачах рідина (вода або розсіл) стікає тонким шаром по контактним елементам, а повітря рухається у вільному просторі між ними (рисунок 1).

Завдяки цьому забезпечується велика поверхня контакту фаз при низькому гідравлічному опорі, а при рециркуляції повітря він набуває потрібної концентрації водяної пари. Основними достоїнствами плівкових зволожувачів у порівнянні з іншими типами зволожуючих пристроїв є: розвинута поверхня контакту фаз; порівняно високі швидкості газу тобто велика пропускна здатність; стійкість роботи при коливанні навантажень; простота виготовлення й обслуговування; можливість автоматизації процесів зволоження.

III. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПЛІВКОВОГО ЗВОЛОЖУВАЧА

Розглянемо плівкові зволожувачі. Якщо поверхня води контактує з повітрям і при цьому тем-

ператури їх різні, а парціальні тиски водяної пари на границі розділу фаз і в обсязі повітря також неоднакові, то між водою і повітрям відбувається тепло- і масообмін (ТМО). При охолодженні води в контактних пристроях ТМО частина тепла передається до повітря, що рухається, за рахунок випаровування води (перетворення вода в пару з переносом його дифузиею і конвекцією в ядро потоку повітря), інша частина - за рахунок різниці температур води і повітря (теплопровідність і конвекція). Крім того, деяка кількість тепла передається від води за рахунок випромінювання, однак це тепло настільки мале в порівнянні з іншими видами віддачі тепла, що ним можна знехтувати.

Відповідно до кінетичної теорії газів, механізм поверхневого випаровування води полягає в тому, що молекули води знаходяться в безладному хаотичному тепловому русі, при цьому їх швидкості змінюються в широких межах. Молекули, які мають найбільшу енергію, переборюють сили поверхневого натягу і попадають у парогазове середовище. Деяка частина молекул, що вирвалися з води, зіштовхуючись з молекулами повітря, може повернутися назад у рідину.

Якщо число молекул, що покинули поверхню води, більше числа тих, що повернулись, то йде процес випаровування, у противному випадку - процес конденсації. Температура води визначається середньою кінетичною енергією молекул, що знаходяться в тепловому русі. Кінетична енергія молекул, що залишають воду, більша ніж у тих що залишаються; отже, температура води в результаті випару буде знижуватися доти, доки не наступить термодинамічна рівновага, при якій процес випаровування зрівноважиться процесом конденсації.

Молекули, що відірвалися від поверхні води, дуже повільно віддаляються в ядро потоку повітря. Швидкість їхньої дифузії мізерно мала в порівнянні з тією, з якою ці молекули залишають поверхню води. У результаті відбувається швидке нагромадження молекул пари в шарі повітря, що примикає до поверхні. Парціальний тиск у цьому шарі зростає настільки, що стає рівним тиску насиченої пари.

У загальному випадку основна маса потоку вологого повітря не насичена водяними парами і її середній парціальний тиск дорівнює P_0 при середній температурі θ повітря, так що різниця парціальних тисків є рушійною силою процесу масообміну, тобто випаровування. до підвищення оптимальних значень температурних напорів, що перевищує (на 35 – 50%) зазвичай рекомендовані значення. [4].

Математична модель зволоження повітря у плівкової насадці базується на рівняннях теплового і теплового балансу для елементарного прошарку dx .

Складаючи рівняння теплового балансу робимо припущення, які зазвичай застосовуються при плівковому зволоженні повітря (випарному охолодженні води) [4, 5].

1. Коефіцієнти тепло- і масовіддачі (α , Вт/(м²град) і β_p , с/м) – фізичні константи. Тепло паротворення r_0 , Дж/кг, питома теплоємність вологого повітря $C_{в,п}$, і води C_w Дж/(кг °С) можуть бути визнані постійними;

2. Парціальний тиск водяної пари і розмір парціального тиску сухого повітря дорівнює барометричному тиску вологого повітря;

3. Температура на поверхні плівки рідини може бути прийнята рівною середній температурі рідини в даному перетині плівки;

4. Зміною товщини водяної плівки внаслідок випаровування можна знехтувати;

5. Не враховуємо вплив хвилеутворення водяної плівки.

Складаючи рівняння теплового балансу для елемента dx (рис. 1) загальна кількість тепла, що відводиться від зовнішньої поверхні плівки в газову фазу, дорівнює

$$dQ_i = Q_\alpha + Q_\beta \quad (1)$$

де кількість тепла Q_α , переданого конвективним теплообміном

$$Q_\alpha = \alpha_k (t_n - \theta) F \quad (3)$$

тут α_k – коефіцієнт тепловіддачі Вт/(м²К); t_n – температура зовнішньої поверхні плівки рідини, °С; θ – середній напір повітря, °С; Q_β – кількість тепла, що втрачається водою завдяки її поверхнево випаровуванню дорівнює за законом Дальтона

$$Q_\beta = r\beta (P'' - P) F, \quad (4)$$

де r – схована теплота паротворення ;

За формулою (1) загальна кількість тепла, що відводиться від зовнішньої поверхні плівки в газову фазу, дорівнює

$$Q_\alpha = \alpha_k (t_{in} - \theta) F + r\beta (P_i'' - P) F \quad (5)$$

Кількість тепла dQ_i , втраченого водяною плівкою в одиницю часу в межах виділеного шару dx насадки визначається співвідношенням (2). Кількість тепла Q_α , що відводиться від води в одиницю часу за рахунок конвективного теплообміну і втраченого на підвищення температури повітря, дорівнює

$$Q_\alpha = G_2 C_{в,п} n d\theta \quad (6)$$

Кількість тепла Q_β , що відведеного від води випаровуванням в одиницю часу і втраченого на збільшення вологовмісту повітря -

$$Q_\beta = r G_2 C_{в,п} n d d \quad (7)$$

(d – вологовміст, кг/кг_{с.п.}),

Складаючи рівняння теплового балансу (1) для елемента dx (рисунк 1):

$dQ_i = Q_\alpha + Q_\beta$, а з огляду на (5), (6) і (7), одержимо

$$\frac{dt}{dF} = \frac{\alpha_k}{C_1 G_1} (t_n - \theta) + \frac{r \cdot \beta}{C_1 G_2} (P'' - P) \quad (8)$$

З (8) кількість тепла Q_α , переданого конвективним теплообміном

$$\frac{d\theta}{dF} = \frac{\alpha_2}{C_2 G_2} (t - \theta) \quad (9)$$

З огляду на Q_β із закону Дальтона отримаємо

$$\frac{dP}{dF} = \frac{\beta_2 P_B}{0,623 \cdot G_2} (P'' - P) \quad (10)$$

У рівняннях (1) - (10) елемент поверхні тепломасообміну $dF = 2 \ln dx$. Задаючи залежність P'' від t , а також коефіцієнти тепло- і масообміну α_2 , β_2 , тобто

$$P'' = P''(t), \alpha_2 = \alpha_2(Re), \beta_2 = \beta_2(Re). \quad (11)$$

при наявності умов на вході і виході можна визначити середні значення температур води t і повітря θ , а також парціальний тиск пари P у кожному перетині насадочного шару.

В плівковому зволожувачі (ТМО - модель) відбувається перенос не тільки явного тепла, але й мас пару між повітрям і прикордонним шаром насиченого повітря над рідиною, а отже, і теплоти фазового переходу. При прямоточному русі параметри повітря в ядрі потоку h_n, d_n, t_n та в граничному рівноважному стані наближаються до одних величин $h_\infty, d_\infty, t_\infty$.

Практично завжди у теплообмінниках

$$G_w \gg G_{ноє}(d_\infty - d_{n1})$$

Рівняння балансу тепла, по яких обмінюються середовища, має вигляд:

$$G_1(h_{n1} - h_\infty) = G_2 C_w (t_\infty - t_{w1}) \quad (12)$$

Використовуючи залежність (6) і рівняннями зв'язку між параметрами повітря на лінії $\phi=100\%$. отримаємо:

$$t_\infty = \frac{h + 4,18 G_w t_{w1} / G_n - 9,65}{1,79 + 4,18 G_w / G_n + 0,0418 t_{w1}}, \quad (13)$$

Визначивши значення t_∞ , можна розрахувати h_∞, d_∞ по формулах [6].

В контактних апаратах можливі такі схеми [5]: прямоточна, протivotочна та перехресноточна.

Диференціальні рівняння, що описують процеси тепло- і масопереносу для встановленого

режиму впливають із рівнянь описів на основі рівняння одномірного переносу.

Для одержання основних закономірностей випарного зволоження повітря розглядається стабільний процес тепломасообміну в плівковому зволожувачі з плоскопаралельною насадкою, де вода і повітря приводяться до контакту за схемою протипотоку (рисунок 1)

$$\begin{aligned} \frac{dt}{dx} &= \alpha_1(\theta - t) + \beta_1(P - P'') \\ \frac{d\theta}{dx} &= \alpha_2(\theta - t), \\ \frac{dP}{dx} &= \beta_2(P - P'') \end{aligned} \quad (14)$$

при $x = 0: t = t_0,$

при $x = H_{ПВ}: \theta = \theta_0, P = P_0$

$H_{ПВ}$ - висота апарата

Для системи вода - повітря

$$\alpha_1 = 0.611 \cdot 10^{-5} \frac{Nu}{d_{эк} Q_1},$$

$$\beta_1 = 0.1013 \cdot 10^{-6} \frac{Nu}{d_{эк} Q_1}, \quad (15)$$

$$\beta_2 = 0.2794 \cdot 10^{-4} \frac{Nu}{d_{эк} Q_2} \quad (16)$$

$$\alpha_2 = 0.2476 \cdot 10^{-4} \frac{Nu}{d_{эк} Q_2}$$

$Q_1 = \rho_1 u_0 h_0$ – масова витрата рідини, що припадає на одиницю ширини листа насадки; u_0 – середня швидкість плівки рідини;

$h_0 = 3 \sqrt{\frac{3Q_{11}}{g_1}}$ – середня товщина плівки;

$Q_2 = \rho_2 (r - h_0) V_0$ – масова витрата газу, що припадає на одиницю ширини каналу;

$2r$ – відстань між листами насадки ;

V_0 – швидкість руху газу.

$$Nu_r = 0.012 Re_r^{0.8} Pr_r^{0.43} \quad (17)$$

Індекс «1» у попередніх виразах відповідає рідині, а «2» – газу.

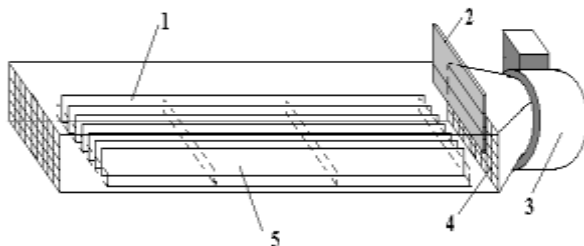


Рисунок 2 – Схема експериментального стенда: 1 – міпластові пластини; 2 – засувка; 3 – відцентровий вентилятор; 4 – турбулізуюча сітка; 5 – піддон з водою.

Для даної схеми руху повітря і рідини аналітичне розв'язання задачі (14) не відоме. Тому рішення цієї задачі проводиться чисельним методом [5]

IV. ВИСНОВКИ

Розроблена математична модель плівкового зволожувача плодоовочесховищ. На підставі розробленої моделі був проведений розрахунок даного зволожувача. Плівковий зволожувач впливає на термoeкономичну модель охолоджуючої системи плодоовочесховища. [3].

Промислова перевірка ефективності плівкових зволожувачів проводилась у картоплесховищі м. Митищі Московської області.

Схема експериментального стенду, який імітує частку каналу, розміщеного під підлогою, свідчать про ефективність застосування плівкових зволожувачів.(рис.2) [7].

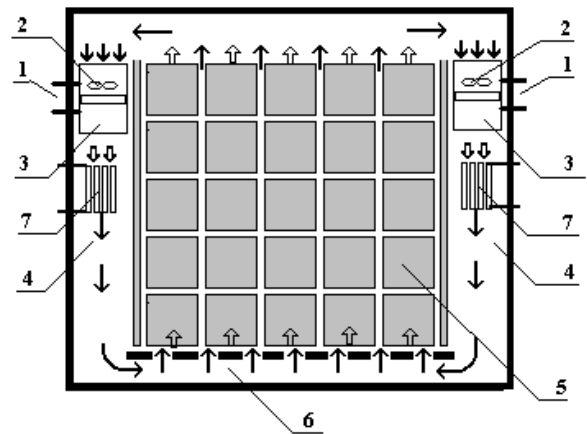


Рисунок 3 – Схема камери:

1 – трубопроводи холодоагента; 2 – вентилятор; 3 – повітроохолодник; 4 – теплозахисна повітряна оболонка; 5 – штабель продукції; 6 – система повітропроводів у підлозі камери; 7 –плівкові зволожувачі.

По довжині магістрального каналу установлювались плівкові зволожувачі повітря. Аналіз технологічних результатів показав, що при терміні зберігання 188 діб, супутнє зволоження припливного повітря дозволило знизити втрати в нижньому шарі насипу в 2 рази, а в середньому для всієї маси продукції на 30 %. Коректуючи шар, у якому вологість повітря досягає рівноважної величини, зменшився понад 2,5 рази.

Проведені дослідження показали, що плівкові зволожувачі надійно працювали на протязі всього сезону зберігання, підтримували необхідний температурно-вологісний режим в каналі в період роботи вентилятора і в період його зупинки. [7].

Плівкові зволожувачі застосовувалися на експериментальній камері, яка розташовувалась на території науково-експериментального відділу НДКТИХТТ «Агрохолод» і уявляла собою

приміщення розміром в плані: 18 × 6 м, висотою 6 м. (рисунок 3).

За результатами розрахунків розроблені технічні рішення зі створення експериментальної камери та укомплектована система охолодження плодоовочесховища 100 т м. Одеси з повітроохолоджувачем і випарним конденсатором, та плівковим зволожувачем на НДКТІХТТ «Агрохолод».

ЛІТЕРАТУРА

1. **Жадан В.З.** Влагообмен в плодоовощехранилищах – М.: Агропромиздат, 1985. – 199 с..
2. **Жадан В.З.** Теоретические основы кондиционирования воздуха при хранении сочного растительного сырья. – М.: Пищевая промышленность, 1972. – 154 с.
3. **Жихарева Н.В., Хмельнюк М.Г.** Повышение эффективности системы охлаждения плодоовощехранищ – Вестник международной академии холода, 2013. – Вып 4. – С. 16-20.
4. **Кирилов В.Х.** Гідродинаміка та масообмін в двофазних потоках плівкових апаратів для холодильної техніки. Автореф. дис. д. т. н., Одеса, 1994 – 51 с.
5. **Богословский В.Н.** Строительная теплофизика – М.: Высш. школа, 1982. – 415 с.
6. **Жихарева Н.В.** Моделирование процессов кондиционирования воздуха // Холодильна техніка та технологія. – 2000, № 65. – С. 54–59
7. **Жадан В.З., Мартынова Л.В., Алексеева О.Н., Кулаков С.И.** Эффективность применения плёночных увлажнителей воздуха в системах активного вентилирования картофелехранилищ // Холодильная техника та технологія. 1985.– Вип. 40 – С. 93-96.

N.V. Zhikhareva

Odessa National Academy of Food Technologies, Educational and Research Institute of Refrigeration, cryotechnolgy and Ecoenergetics n.a. V.S. Martynovskiy, 1/3 Dvoryanskaya str., Odessa, 65082

MATHEMATICAL MODEL OF PELLICLE HUMECTANT FOR FRUIT AND VEGETABLES STORES

The mathematical model of pellicle humectants is worked out for fruit and vegetables stores. The adequacy of this model has been tested and calculation of pellicle humectants for fruit and vegetables store has been conducted. This humectants was realized on typical fruit and vegetables store.

Key words: *pellicle humectants, fruit and vegetables store, heat and mass exchange processes, mathematical model, cooling system*

REFERENCES

1. **Zhadan V.Z.** Moisture exchange in fruit and vegetables store – M.: Fgroindustrialness. – 1985. – 199 p.
2. **Zhadan V.Z.** Theoretical bases of climatization at storage juicy vegetable. – M.: Food industry. – 1972. – 154 p.
3. **Zhikhareva N.V., Khmelniuk M.G.** Effectiveness increase for fruit and vegetables store cooling system. – M: Announcer of international academy of cold – 2013. – № 4. – P. 16-20.
4. **Kirilov V.H.** Hydrodynamics and mass-transfer are in the diphasic streams of pellicle vehicles for a refrigeration technique. Abstract of thesis mon. d. t. s. Odesa – 1994 – 51 p.
5. **Bogoslovskya V.N.** Building heatfszsk. – M.: Higher school. – 1982. – 415 p.
6. **Zhikhareva N.V.** Design of processes of climatization. Refrigeration engineering and technology. – 2000 – № 65. – P. 54–59
7. **Zhadan V.Z., Martunova L.V., Alekseeva O.N., Kulakov S.I.** Efficiency of application of pellicle humectants of air is in the systems of active aeration of vegetables store // Refrigeration engineering and technology. – 1985.– V 40 – P. 93-96.

Отримана в редакції 28.08.2014, прийнята до друку 17.11.2014