

MODELING THE DISTRIBUTION PROCESS OF  
HEAT CARRIER IN THE MALT HEATER

**M. Nikolishak, S. Lementar, V. Ponomarenko, R. Yakobchuk**

*National University of Food Technologies*

**D. Rindyuk**

*National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"*

---

**Key words:**

*Heater*  
*Malt*  
*Heat carrier*  
*Modeling*

---

**Article history:**

Received 09.07.2019  
Received in revised form  
24.07.2019  
Accepted 22.08.2019

---

**Corresponding author:**

M. Nikolishak  
**E-mail:**  
npnuht@ukr.net

**ABSTRACT**

---

In the production of malt, heat energy costs are quite significant, even with the use of modern drying installations. Theoretically it is possible to reduce them by 1.4—1.45 times. Taking into account the constantly rising price for energy carriers and electricity, increasing the energy efficiency of the process of malt drying by improving the drying conditions and the design of drying apparatus is an urgent task of today.

The researchers have proven that to reduce the flow of heat for evaporation of moisture, it is advisable to apply preheated malt to drying. It has been established that in the whole range of temperatures of the drying agent and the moisture content of malt during the heating of the product, a significant increase in the drying rate occurred (compared to the usual process under the same conditions). To implement this recommendation, it's suggested to use a malt-preheating device. The disadvantage of this apparatus is the low efficiency of the system of supply of heat carrier, which leads to uneven heating of malt.

Therefore, the purpose of our study is to find the optimal parameters of the design of the malt heater by modeling the flows of the heat carrier, taking into account the thermo-physical characteristics of air and malt.

The object of the study is the processes of distributing the heat carrier and heating the barley malt in the heater.

The simulations used Computational Fluid Dynamics methods.

Based on the simulation results, we proposed the design of the heater with an improved system of supply of the heat carrier, which provides uniform heating of the malt and reaching its temperature within 45—47°C along the entire section of the final section of the heater, which is sufficient to feed it to the dryer.

## МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ РОЗПОДІЛЕННЯ ТЕПЛОНОСІЯ В ПІДГРІВАЧІ СОЛОДУ

М. В. Ніколишак, С. Ю. Лементар, В. В. Пономаренко, Р. Л. Якобчук

*Національний університет харчових технологій*

Д. М. Риндюк

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського»*

*При виробництві солоду витрати теплової енергії є досить значними, навіть при використанні сучасних сушильних установок. Теоретично можливо їх зменшення в 1,4—1,45 раза. Враховуючи постійно зростаючу ціну на енергоносії та електроенергію, підвищення енергоефективності процесу сушіння солоду шляхом вдосконалення режимів сушіння і конструкцій сушильних установок є актуальним завданням сьогодення.*

*Доведено, що для зниження витрат теплоти на випаровування вологи доцільно подавати на сушку попередньо нагрітий солод. Встановлено, що в усьому досліджуваному діапазоні температур сушильного агента і вологості солоду при підігріві останнього відбувалося значне підвищення швидкості сушіння (якщо порівняти зі звичайним проведенням процесу при тих же умовах). Для реалізації цієї рекомендації запропоновано використовувати апарат попереднього підігріву солоду, недоліком якого є низька ефективність системи розподілу теплоносія, що призводить до нерівномірного нагріву солоду. Тому метою дослідження є знаходження раціональних параметрів конструкції підігрівача в установці для сушіння солоду шляхом моделювання потоків теплоносія з урахування теплофізичних характеристик повітря і солоду. Об'єктом дослідження є процеси розподілу теплоносія та нагрівання ячмінного солоду в підігрівачі. При моделюванні використовувалися методи обчислювальної гідродинаміки — Computational Fluid Dynamics.*

*За результатами моделювання запропоновано конструкцію підігрівача з удосконаленою системою підведення теплоносія, яка забезпечує рівномірне прогрівання солоду та досягнення його температури в межах 45—47°C по всьому перерізу кінцевої секції підігрівача, що є достатнім для подачі його на сушарку.*

**Ключові слова:** *підігрівач, солод, теплоносії, моделювання.*

**Постановка проблеми.** Витрати теплової енергії для виробництва солоду складають основну частину (близько 95%) витрат, обумовлених технологічними факторами. При цьому значна частина теплоти й електроенергії витрачається на проведення процесу сушіння. На сучасних солодосушарках питома витрата теплоти становить, за даними фірм-виробників, близько 2,7 МДж/т при теоретично можливій мінімальній 1,86 МДж/т. Тож витрата теплоти теоретично може бути знижена в 1,45 раза. Питома витрата електроенергії на тих же установках становить близько 20—35 кВт·год/т, причому основна її частина припадає на привід вентиляторів, які продувають сушильний агент крізь шар

солоду [1]. Тому, враховуючи постійно зростаючу ціну на енергоносії та електроенергію, вдосконалення режимів сушіння солоду і конструкцій сушильних установок є актуальним завданням сьогодення.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Підвищенню економічної ефективності роботи солодосушарки значною мірою сприяють збільшення її продуктивності та зниження енерговитрат на сушіння. Одним із методів зниження енерговитрат є оптимізація режимів сушіння на основі математичного моделювання результатів досліджень з використанням критеріїв ефективності.

Критерієм енергетичної ефективності процесу сушіння у [2] пропонується вважати відношення питомих енерговитрат до швидкості процесу сушіння (енергокінетичний критерій —  $K_{ек}$ ). Відомо, що тривалість процесу сушіння залежить як від температури і швидкості сушильного агента, так і від характеру їх зміни в часі. Цю зміну можна варіювати протягом процесу, досягаючи таким чином більшої енергоефективності процесу. Використання енергокінетичного критерію дає змогу виділити періоди сушіння, в перебігу яких найбільш доцільно інтенсифікувати процес без нераціонального підвищення енерговитрат [3].

Аналіз результатів досліджень [2] показує, що інтенсифікувати процес сушіння солоду на його останній стадії недоцільно. Цей період характеризуються дуже високими значеннями  $K_{ек}$  через незначне видалення вологи, тому для підвищення продуктивності солодосушарки з урахуванням усього комплексу вимог до її ефективності доцільним є скорочення першого етапу процесу. Для цього необхідно або підводити додаткову теплоту в сушарку або завантажувати попередньо підігрітий матеріал.

У першому випадку потрібне збільшення продуктивності калориферів сушарок по теплоті, що здебільшого нераціонально. Це пояснюється тим, що нині сучасні високопродуктивні солодовні оснащені комплектом технологічного обладнання, поставленого закордонними фірмами. Вони здійснюють гарантійне та сервісне обслуговування свого обладнання. Модернізація солодосушарок порушує цю договірну систему, що небажано для власників підприємств.

У другому випадку, при використанні попереднього підігрітого солоду, застосовується додаткове обладнання, що вимагає додаткових виробничих площ, проте підвищує продуктивність солодосушарок.

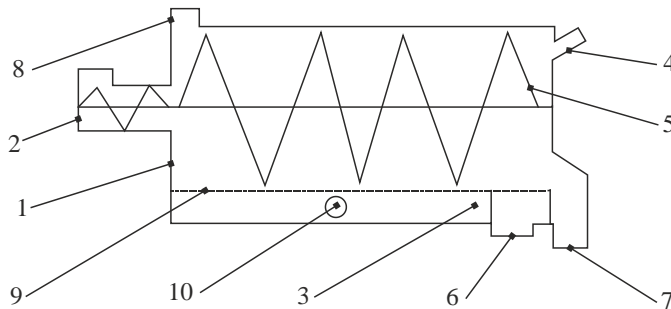
Дослідженню попереднього підігріву солоду та інших видів зернової сировини перед сушінням присвячено праці [4; 5 та ін]. Доведено, що для зниження витрат теплоти на випаровування вологи доцільно подавати на сушку попередньо нагрітий солод. Встановлено [5], що в усьому досліджуваному діапазоні температур сушильного агента і вологості солоду при підігріві останнього відбувалося різке підвищення швидкості сушіння (якщо порівняти зі звичайним проведенням процесу за тих же умов). Причому підвищення інтенсивності видалення вологи було найбільш суттєвим на початку процесу. З плином часу досягнутий ефект зменшувався. При проведенні експериментів нагрівання солоду перед сушінням становило від 10 до 50°C. Також у [2] надано рекомендації щодо подачі підігрітого солоду у верхню частину шару солоду в сушильній установці. При аналізі кривих сушіння окремих горизонтальних перетинів шару солоду з'ясовано, що інтегральна швидкість сушіння шару солоду знижується за рахунок досить тривалого періоду від-

сутності активного видалення вологи з верхньої частини шару. Проте фіксується негативний вплив цього періоду на якість одержуваного сухого продукту і його вихід. У той же час в нижній частині шару видалення вологи на початку процесу відбувається з досить високою швидкістю. З огляду на це рекомендовано попередньо (до сушки) підігрівати до температури 30—40°C солод, який завантажується у верхню частину шару. Для цього [6] розроблено спеціальний апарат, який забезпечує нагрів і підсушування солоду в активному гідродинамічному режимі, що реалізується за допомогою підйомно-лопатевого пристрою та продуванням солоду нагрітим повітрям через перфороване днище.

Отже, попередній підігрів солоду є ефективним способом інтенсифікації процесу сушіння в солодосушарках і моделювання процесу розподілення теплоносія в такому обладнанні дасть змогу надати рекомендації щодо удосконалення його конструкції.

**Мета дослідження:** знаходження раціональних параметрів конструкції підігрівача в установці для сушіння солоду шляхом моделювання потоків теплоносія.

**Викладення основних результатів дослідження.** Основне завдання досліджуваного апарата — попередній підігрів пивного солоду для інтенсифікації процесу його сушіння. Запропонований апарат [6] вирізняється простотою конструкції та містить корпус, живильник, камеру розподілу теплоносія, патрубок додаткової подачі теплоносія, транспортуючий пристрій, патрубок вивантаження паростків, патрубок вивантаження солоду, патрубок виходу відпрацьованого теплоносія та перфороване днище (рис. 1).



**Рис. 1.** Схема будови апарата попереднього підігріву солоду

Солод з вологістю 39—45% подається в живильник 2, звідки шнековим транспортером переміщується в корпус 1. Рух солоду вздовж корпусу забезпечується обертанням транспортуючого пристрою 5.

При русі солоду з паростками вздовж корпусу 1 здійснюється його підігрів теплоносієм, який підводиться тангенціально, в бік обертання валу, через патрубок 10, що забезпечує спільно з транспортуючим пристроєм 5 інтенсивне ворухіння шару солоду для ефективної деструкції його паростків.

У напрямку, протилежному руху шару солоду, через патрубок 4 також подається теплоносій для відділення легких домішок і пилу від солоду.

Відокремлені від солоду паростки і пилові домішки відводяться через патрубки 6 і 8 відповідно за рахунок спільної дії потоків теплоносія, який подається через патрубки 4 і 10. Очищений і підігрітий до температури, що перевищує температуру мокрого термометра, солод подається на сушку через патрубок 7.

Для моделювання процесу розподілення теплоносія створюємо 3D модель підігрівача солоду з діаметром барабана 1,5 м та довжиною 5 м (рис. 2)

Для забезпечення солодом сушильної установки продуктивністю 20 т/добу приймаємо такі параметри системи подачі повітря: витрата теплоносія 0,3 м<sup>3</sup>/с, температура 50°C. Параметри шару солоду, який пронизується теплоносієм: висота 0,4 м, площа поперечного перерізу сегменту солоду 0,38 м<sup>2</sup>, довжина 5 м. Теплофізичні властивості ячмінного солоду, відповідно до [7], визначаються за такими формулами:

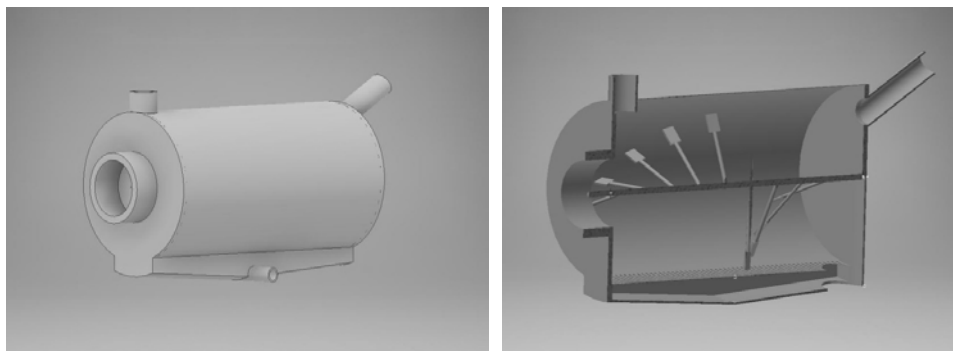
- залежністю коефіцієнта теплопровідності від температури солоду:

$$\lambda = 0,1 + 0,004t - 3t^2;$$

- залежністю теплоємності солоду від температури:

$$c = 659,04 + 113,9t - 2,93t^2 + 0,048t^3.$$

Для створення моделі шару солоду приймалася насипна густина 510 кг/м<sup>3</sup> та пористість шару — 54%.



**Рис. 2. 3D модель апарата попереднього підігріву солоду**

Суттєвим недоліком вищенаведеної конструкції є нерівномірність розподілу теплого повітря в камері подачі теплоносія, тому солод буде нагріватися нерівномірно. Солод у центральній частині апарата прогріватиметься швидше, ніж у початковій і кінцевій. Врахувавши цей факт, було вирішено удосконалити конструкцію та додати ще два патрубки для входу теплоносія (рис. 3). В такій конструкції нагріте повітря розподіляється більш рівномірно по всій площі матеріалу, забезпечуючи таким чином рівномірний підігрів солоду для подальшого сушіння.

Провівши дослід повторно, але вже з удосконаленою конструкцією, можна помітити бажані температурні зміни в шарі солоду (рис. 4). Результати представлено суміщеними на площині і з прив'язкою до розрахункових комірок у всіх поперечних перерізах, що є можливим завдяки поступовому зростанню температури солоду при розгляді в поздовжньому перерізі.

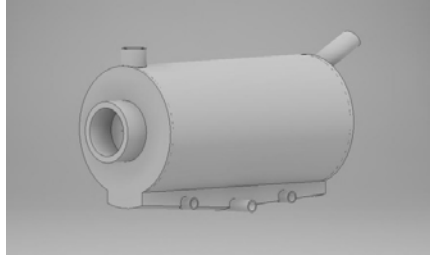


Рис. 3. Удосконалена конструкція апарата попереднього підігріву солоду

Температура солоду 45—47°C досягається по всьому перерізу кінцевої секції підігрівача. Отже, після проходження через апарат солод буде рівномірно прогрітим і може бути поданим на сушку.

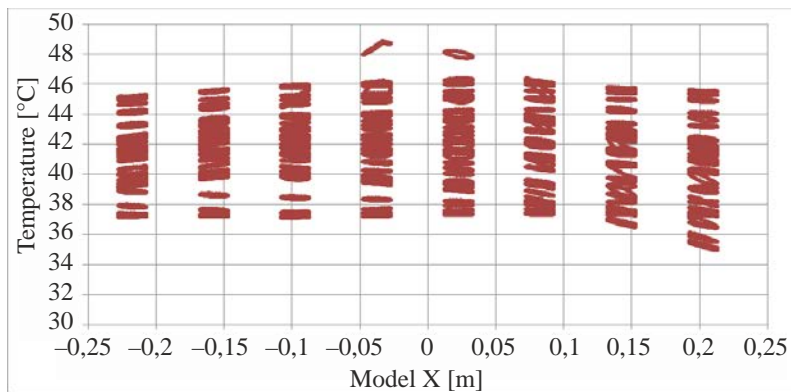


Рис. 4. Розподіл температури солоду в поперечних перерізах апарата

Також ми досліджували розподіл полів швидкостей у модернізованому підігрівачі (рис. 5, 6) і показники турбулентної енергії потоків повітря (рис. 7, 8).

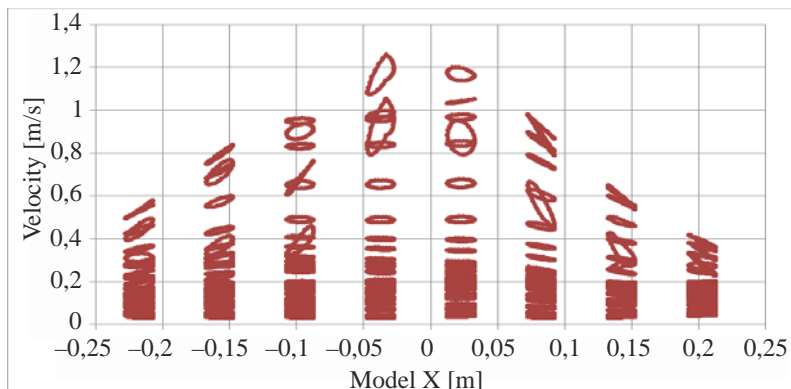


Рис. 5. Розподіл швидкості теплоносія в поперечних перерізах апарата

Як видно з рис. 5, спостерігаються аномально високі швидкості теплоносія понад 1 м/с, що є нетиповим явищем для теплоносія після проходження шару

солоду. Щоб зрозуміти причину такого ефекту, розглянули графіки розподілу швидкості теплоносія для поздовжніх перерізів апарата (рис. 6).

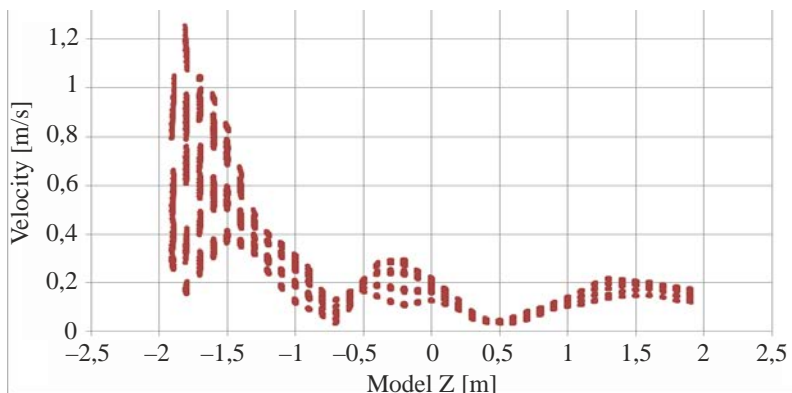


Рис. 6. Розподіл швидкості теплоносія в поздовжніх перерізах апарата

Виявили, що причиною таких швидкостей у початковій зоні апарата є наявність допоміжного контуру подачі теплоносія через патрубок 4 (рис. 1) та системи відведення відпрацьованого повітря через патрубок 8 (рис. 1).

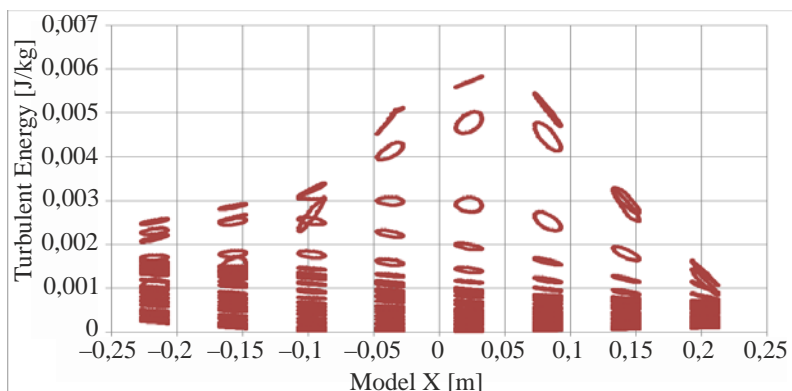


Рис. 7. Турбулентна енергія потоку теплоносія в поперечних перерізах апарата

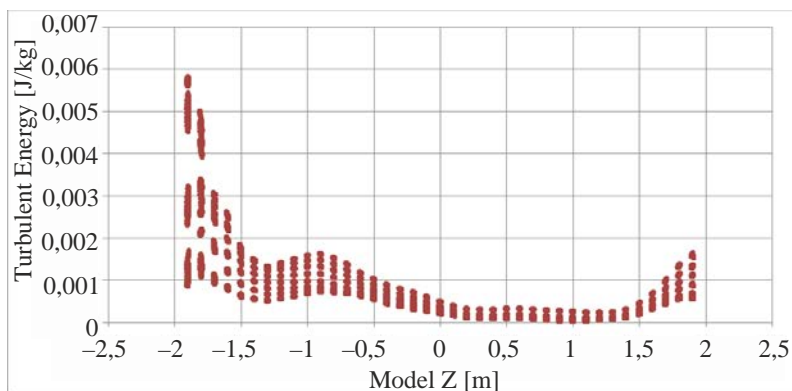


Рис. 8. Турбулентна енергія потоку теплоносія в поздовжніх перерізах апарата

### **Висновки**

У результаті моделювання процесу розподілення теплоносія в підігрівачі солоду з'ясовано, що:

- базова модель підігрівача не забезпечує рівномірного розподілу теплого повітря в камері подачі теплоносія, тому солод буде нагріватися нерівномірно;

- в модернізованому підігрівачі забезпечується рівномірне прогрівання солоду та досягнення його температури в межах 45—47°C по всьому перерізу кінцевої секції підігрівача, що є достатнім для подачі продукту на сушарку;

- швидкість теплоносія після проходження шару солоду складає 0,1—0,22 м/с, за винятком початкової секції апарата, де знаходиться система відведення відпрацьованого повітря;

- турбулентна енергія потоку теплоносія досягає максимуму в початковій секції апарата;

- максимум турбулентної енергії потоку теплоносія при розгляді в поперечних перерізах апарата є зміщеним відносно центру у зв'язку з тангенціальним підведенням теплоносія.

Отже, модернізована конструкція підігрівача солоду забезпечує більш рівномірне, якщо порівняти з базовим варіантом, прогрівання солоду та досягнення необхідної температури продукту.

### **Література**

1. Федоренко Б. Н. Инженерия пивоваренного солода: учебн.-справ. пособие. СПб.: Профессия, 2004. 248 с.

2. Емельянов А. Б. Повышение энергоэффективности процесса сушки солода в высоком слое: дис. ... канд. техн. наук: 05.18.12 / Воронежский государственный университет инженерных технологий. Воронеж, 2013. 159 с.

3. Кулакова С. В. Об оптимизации параметров процесса циклической сушки солода в высоком слое. Сб. статей VII Международной научно-технической конференции «Математическое моделирование, обратные задачи, информационно-вычислительные технологии». Пенза, 2007. С. 184—188.

4. Гавриленков А. М., Емельянов А. Б. Выбор оптимального режима сушки солода. *Пиво и напитки безалкогольные и алкогольные, соки, вино*. 2000. № 5. С. 52—53.

5. Гавриленков А. М., Харченков К. В., Кулаков В. И., Емельянов А. Б. Проблемы повышения эффективности сушки солода. *Brauwelt — Мир пива и напитков*. 2005. № 3. С. 25—28.

6. Устройство для предварительной подготовки солода перед сушкой: пат 2247144 Россия: МПК С12С13/00. №20031291442/13; заявл. 29.09.2003; опубл. 27.02.2005, Бюл. № 17, 2007г.

7. Пеленко В. В., Демидов С. Ф., Тамбулатова Е. В., Соколова Е. А. Изучение теплофизических характеристик светлого солода. *Научный журнал НИУ ИТМО*. 2012. № 3. С. 152—156.