

УДК 62-976: 663.2

ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛООБМІННИКА ДЛЯ ПІДГРІВАННЯ ВИНОГРАДНОГО СОКУ ЯК ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ

В. О. Мірошник, Т. І. Лендел, кандидати технічних наук

e-mail: taraslendel@rambler.ru

Анотація. *Наведено імітаційну математичну модель теплообмінника для підігрівання виноградного соку. Встановлено залежності теплоємності виноградного соку від температури, а також розраховано витрату соку у процесі керування.*

Ключові слова: *математична модель, температура, теплообмінник*

Математичний опис об'єкта дозволяє провести дослідження з метою імітаційного моделювання перед проектуванням системи керування, аналізу і оцінки функціонування всього об'єкта. Теплообмінники є складними об'єктами, де важливим є конвективний процес, який є спільною дією теплопровідності і конвекції. Відповідно перед проектуванням об'єкту спочатку створюється імітаційна модель, яка потім і досліджується.

Мета досліджень – розробка імітаційної моделі теплообмінника підігрівання виноградного соку для дослідження регулювання за каналом температури з урахуванням змін характеристик соку і гріючої пари.

Матеріали та методика досліджень. Нині в переробній промисловості для підігрівання рідин або сумішей перегрітою водяною парою широко використовуються кожухотрубні теплообмінники. Зазначені теплообмінники бувають одноходовими або багатходовими.

Для проектування теплообінного апарату спочатку синтезують його математичну модель. При моделюванні теплообміну в теплообміннику виходять із рівнянь теплового балансу в статичному режимі. Якщо не

враховувати втрати теплоти в навколишнє середовище, то рівняння теплового балансу записується так:

$$Q_1 = Q_2, \quad (1)$$

де Q_1 – кількість теплоти, що віддає гарячий теплоносіє, Дж/с, Q_2 – кількість теплоти, яка передається холодному теплоносію, Дж/с.

Якщо витрати гарячого теплоносія складуть G_1 кг/с з початковою і кінцевою ентальпією $i_{1п}, i_{1к}$ Дж/кг і відповідно витрати і ентальпії холодного теплоносія складуть G_2 кг/с і $i_{2п}, i_{2к}$ Дж/кг, то рівняння теплового балансу матиме вигляд:

$$G_1(i_{1п} - i_{1к}) = G_2(i_{2п} - i_{2к}) \quad (2)$$

Якщо теплообмін проходить без зміни агрегатного стану теплоносіїв, то ентальпії останніх дорівнюють добутку теплоємності на температуру і тепловий баланс матиме вигляд:

$$G_1 C_1 (t_{1п} - t_{1к}) = G_2 C_2 (t_{2п} - t_{2к}), \quad (3)$$

де C_1, C_2 – питомі теплоємності гарячого і холодного теплоносія, Дж/(кг град), $t_{1п}, t_{1к}$ – температури гарячого теплоносія і відповідно $t_{2п}, t_{2к}$ – холодного теплоносія на вході і виході апарату, °С.

Результати досліджень. Теплообмін в теплообміннику проходить у дві стадії: від гарячого теплоносія до трубок, якими проходить холодний теплоносіє, і від них до продукту (холодного теплоносія) (рис. 1). В статичному режимі це може бути описано у вигляді балансів теплових потоків в трубках і рідині теплообмінника.

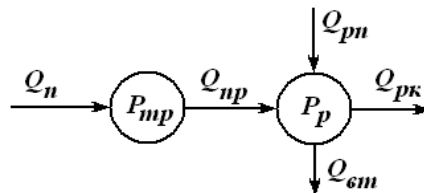


Рис. 1. Схема теплових потоків в теплообміннику з обігрівом парою

Процес теплообміну в теплообміннику описується рівняннями:

$$Q_{\text{п}} - Q_{\text{пр}} = 0, \quad (4)$$

$$Q_{\text{пр}} + Q_{\text{рп}} - Q_{\text{рк}} - Q_{\text{вт}} = 0, \quad (5)$$

де $Q_{\text{п}}$, $Q_{\text{пр}}$, $Q_{\text{рп}}$, $Q_{\text{рк}}$, $Q_{\text{вт}}$ – теплові потоки пари до трубок, тепла до холодного теплоносія, тепла, що поступає і виходить з рідиною (холодним теплоносієм) і тепла, що втрачається в навколишнє середовище, Вт.

Тепло, що поступає від водяної пари, $Q_{\text{п}}$, визначають за формулою:

$$Q_{\text{п}} = G_{\text{п}} \cdot r, \quad (6)$$

де $G_{\text{п}}$ – витрати водяної пари, кг/с; r – теплота пароутворення, Дж/кг.

Тепловий потік, який передається від трубок до холодного теплоносія (рідини), Вт:

$$Q_{\text{пр}} = \alpha_{\text{ср}} F_{\text{тр}} (t_{\text{тр}} - t_{\text{р}}), \quad (7)$$

де $\alpha_{\text{ср}}$ – коефіцієнт тепловіддачі від стінок трубок до рідини, Вт/(м² град); $F_{\text{тр}}$ – загальна поверхня трубок, м²; $t_{\text{тр}}$ – температура стінок трубок, °С; $t_{\text{р}}$ – середня температура рідини, °С;

Тепловий потік, що приходить з холодною і виходить з теплообмінника з гарячою рідиною, Вт:

$$Q_{\text{рп}} = G_{\text{р}} C_{\text{рп}} t_{\text{рп}}, \quad (8)$$

$$Q_{\text{рк}} = G_{\text{р}} C_{\text{рк}} t_{\text{рк}}, \quad (9)$$

де $G_{\text{р}}$ – масові витрати рідини, кг/с; $C_{\text{рп}}$, $C_{\text{рк}}$ – теплоємність рідини на вході і виході теплообмінника, Дж/(кг град); $t_{\text{рп}}$, $t_{\text{рк}}$ – температура рідини на вході і виході теплообмінника, °С.

Тепловий потік, який втрачається з поверхні теплообмінника в навколишнє середовище, Вт:

$$Q_{\text{вт}} = \alpha_{\text{тн}} F_{\text{із}} (t_{\text{р}} - t_3). \quad (10)$$

де $\alpha_{\text{тн}}$ – коефіцієнт тепловіддачі від поверхні теплообмінника до навколишнього повітря, Вт/(м² град); $F_{\text{із}}$ – зовнішня поверхня теплообмінника, м²; t_3 – температура зовнішнього повітря, °С.

Тепло, що накопичується в металі трубок і в рідині рахуємо, Дж.:

$$P_{\text{тр}} = G_{\text{тр}} C_{\text{тр}} t_{\text{тр}}, \quad (11)$$

$$P_p = V_p \rho_p C_p t_p, \quad (12)$$

де $G_{\text{тр}}$ – маса трубок теплообмінника, кг; $C_{\text{тр}}$ – теплоємність трубок теплообмінника, Дж/(кг град); V_p – об'єм рідини в теплообміннику, м³; ρ_p, C_p – щільність, кг/м³ і теплоємність, Дж/(кг град) рідини.

Середня температура t_p рідини рахується як середньоарифметичне між температурою рідини на вході і виході теплообмінника.

Рівняння динаміки зміни теплоти в трубках теплообмінника і в рідині, що міститься в теплообміннику описується рівняннями:

$$\frac{dP_{mp}}{d\tau} = G_n \cdot r - \alpha_{\text{сп}} \cdot F_{\text{тр}} \cdot (t_{mp} - t_p), \quad (13)$$

$$\frac{dP_p}{d\tau} = \alpha_{\text{сп}} \cdot F_{\text{тр}} \cdot (t_{mp} - t_p) + G_p \cdot C_{pn} \cdot t_{pn} - G_p \cdot C_{pk} \cdot t_{pk} - \alpha_{\text{тн}} \cdot F_{\text{вз}} \cdot (t_p - t_3). \quad (14)$$

Підставивши рівняння (10, 11, 12) в рівняння (13, 14) і отримали:

$$\frac{dt_{mp}}{d\tau} = \frac{G_n \cdot r - \alpha_{\text{сп}} \cdot F_{\text{тр}} \cdot (t_{mp} - \frac{t_{pn} + t_{pk}}{2})}{G_{mp} C_{mp}}, \quad (15)$$

$$\frac{dt_{pk}}{d\tau} = \frac{\alpha_{\text{сп}} \cdot F_{\text{тр}} \cdot (t_{mp} - \frac{t_{pn} + t_{pk}}{2}) + G_p \cdot (C_{pn} \cdot t_{pn} - C_{pk} \cdot t_{pk}) - \alpha_{\text{тн}} \cdot F_{\text{вз}} \cdot (\frac{t_{pn} + t_{pk}}{2} - t_3)}{0,5 \cdot V_p \rho_p C_p}. \quad (16)$$

Слід зауважити, що значення теплоємностей і густини рідини залежать від температури і вмісту сухих речовин в рідині [1].

З рівняння (16) можна знайти постійну часу керування температурою розчину на виході теплообмінника:

$$T_{pk} = \frac{V_p \rho_p C_p}{\alpha_{\text{тн}} F_{\text{вз}} + 2G_p C_{pk}}. \quad (17)$$

Розглянемо математичну модель кожухотрубного теплообмінника для підігріву виноградного соку перед упарюванням. Вміст сухих речовин соку 23%, а початкова температура соку $t_{\text{рп}} = 21$ °С. Густина виноградного соку визначається рівнянням, кг/м³:

$$\rho(CP, t) = 969 + 571.5 \frac{CP}{100} - (25 + 42 \frac{CP}{100}) \frac{t}{100} . \quad (18)$$

Теплопровідність виноградного соку в залежності від вмісту сухих речовин CP і температури t визначаємо з рівняння, Вт/(м град):

$$\lambda(CP, t) = \left[0.185 + 0.133 \frac{CP}{100} - 0.35 \left(\frac{CP}{100} \right)^2 \right] \frac{t}{100} + 0.222 \left(\frac{CP}{100} \right)^{-0.249} . \quad (19)$$

Залежність коефіцієнту динамічної в'язкості виноградного соку від температури і вмісту сухих речовин, Па с, визначено з літературних джерел [6].

Залежність коефіцієнту теплоємності виноградного соку від температури і вмісту сухих речовин, Дж/(кг град) визначаємо з парметричних таблиць [6, 7].

Використовуючи метод найменших квадратів і лінійну інтерполяцію для двох значень стовпчиків теплоємностей при вмісті сухих речовин 20 і 30 % (табл. 2), знайдено рівняння залежності теплоємності виноградного соку від температури при $CP=23$ %. Таким чином, рівняння залежності теплоємності виноградного соку від температури при $CP=23$ % матиме вигляд:

$$C = 3670 e^{\frac{1.087}{t}} . \quad (20)$$

Підставивши значення вмісту сухих речовин 23 % у рівняння (17), отримаємо рівняння залежності густини соку від температури при $CP = 23$ %:

$$\rho = 1100.45 - 0.3466 \cdot t . \quad (21)$$

Для підігрівання виноградного соку використовується кожухотрубний теплообмінник довжиною 14 м і діаметром 0,4 м, зовнішня поверхня якого складає $F_{\text{тп}} = 2$ м². Коефіцієнт теплопередачі від поверхні теплообмінника до зовнішнього повітря, Вт/(м² град) [1, 3] можна розрахувати за формулою:

$$\alpha_{mз} = 9,76 + 0,07 \cdot (t_{\text{сп}} - t_{\text{з}}) . \quad (22)$$

Швидкість соку по трубах теплообмінника (м/с) знаходимо залежно від витрат соку G_p , (кг/с), внутрішнього діаметра трубок, $d_{\text{тр}}$, м, кількості ходів теплообмінника, N , кількості трубок, $n_{\text{тр}}$, густини соку ρ_c , кг/м³ [1, 3]:

$$w = \frac{G_p}{\left(\frac{\pi \cdot d_{mp}^2}{4} \right) \frac{n_{тр}}{N} \rho_c} \quad (23)$$

Знаючи швидкість соку, визначаємо критерії Рейнольдса, Прандтля і режим протікання соку. Враховуючи, що відношення критеріїв Прандтля в центрі потоку і біля стінки дорівнює $Pr/Pr_{ст} = 1,7$, розраховано критерій Нуссельта і далі коефіцієнт тепловіддачі від стінки труби до соку. Характеристики сухої насиченої пари на кривій насичення приведені в параметричних таблиць [6, 7].

З урахування отриманих формул (16), (17) будуємо імітаційну модель об'єкта в середовищі Simulink MATLAB (рис. 2), де введено дані про характеристику теплообмінника та початкові величини.

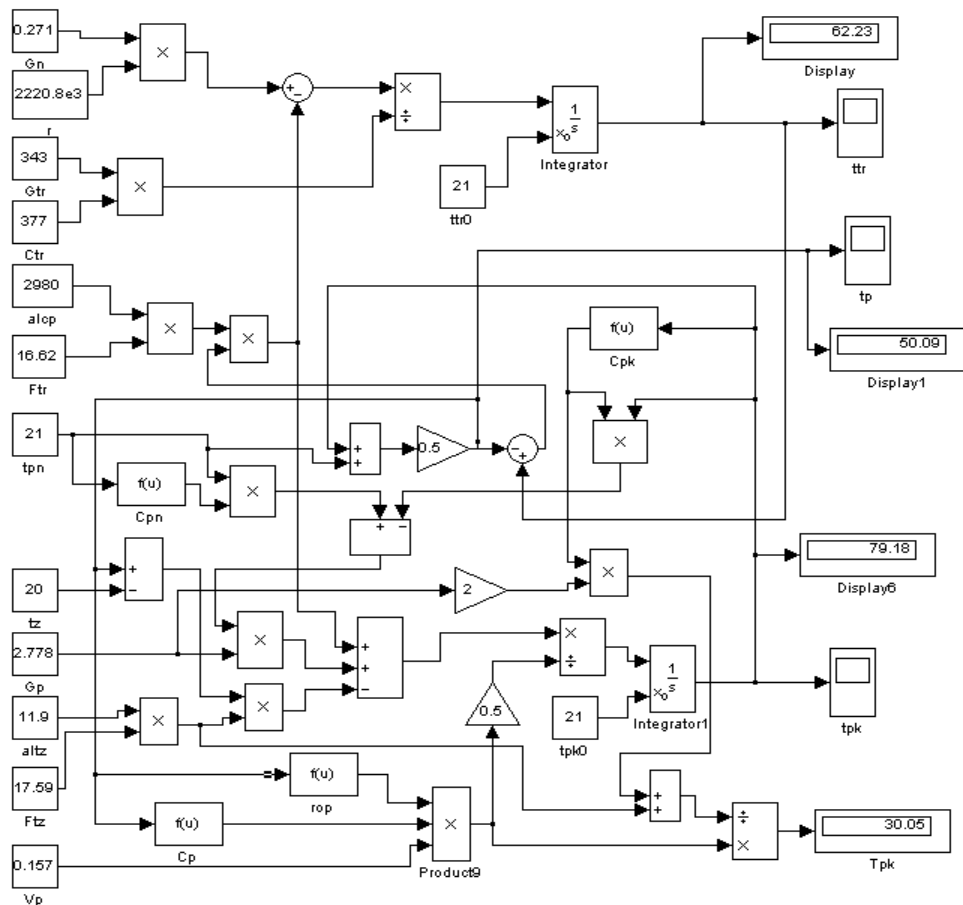


Рис. 2. Імітаційна модель кожухотрубного теплообмінника

Отримані значення постійної часу об'єкту за каналом регулювання температури на виході теплообмінника (рис. 3, а) змодельовано за рівнянням (18). Також представлено зміну температури стінок трубок теплообмінника на рис. 3, б.

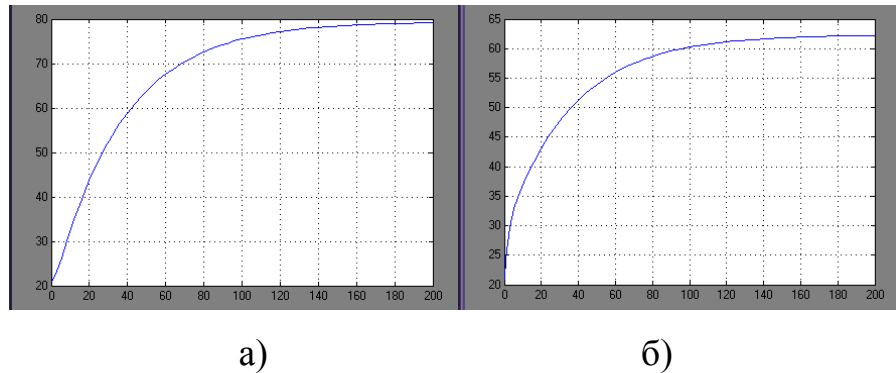


Рис. 3. Розгінні криві температури соку на виході теплообмінника (а) і температури стінок трубок теплообмінника (б)

Постійна часу теплообмінника за каналом регулювання температури соку на виході теплообмінника дорівнює $T_{pk} = 30$ сек.

Проведені дослідження впливу витрат соку на кінцеву температуру соку і постійну часу об'єкту за каналом регулювання температури. Розгінні криві температури соку на виході теплообмінника і температури стінок трубок теплообмінника показані на рис. 4.

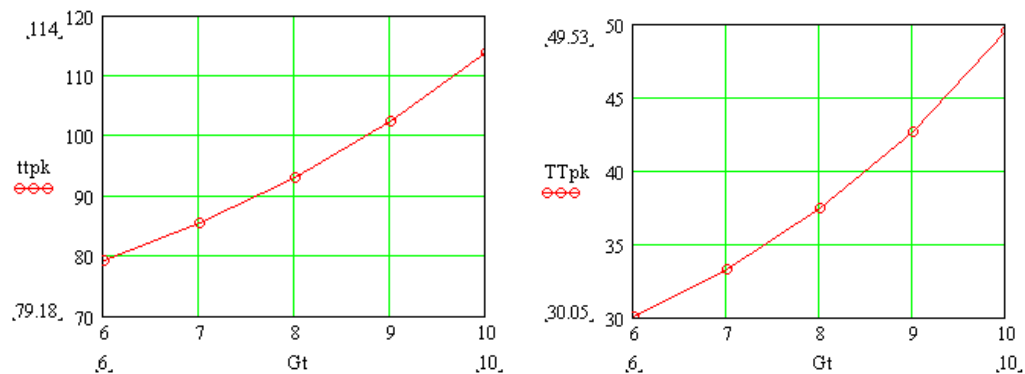


Рис. 4. Дослідження впливу витрат соку на температуру соку і постійну часу об'єкту керування

Витрати соку G_p змінювали від 6 до 10 т/год. При цьому змінюється коефіцієнт тепловіддачі від трубок α_{cp} до соку, що в результаті призводить до того, що температура соку на виході зростатиме, а також змінюється постійна часу об'єкту (рис. 4).

Висновки

Розроблено імітаційну модель теплообмінника для підігрівання виноградного соку. Проведено дослідження впливу витрат соку на кінцеву температуру соку і постійну часу об'єкту за каналом регулювання температури. Визначено, що при зміні витрати соку від 6 до 10 т/год змінюється коефіцієнт тепловіддачі від трубок до соку і самі витрати, і в результаті температура соку на виході зростає.

Список літератури

1. Алабовский А. Н. Техническая термодинамика и теплопередача / А. Н. Алабовский, И. А. Недужий. – М. : Выща школа, 1990. – 255 с.
2. Альянах И. Н. Моделирование вычислительных систем / И. Н. Альянах. – Л. : Машиностроение, 1998. – 223 с.
3. Драганов Б. Х. Теплотехника и применение теплоты в сельском хозяйстве / Б. Х. Драганов, В. А. Кузнецов, С. П. Рудобашта – М. : АПИ, 1986. – 463 с.
4. Нащокин В. В. Техническая термодинамика и теплопередача / В. В. Нащокин ; изд. 2-е. – М. : Высшая школа, 1975. – 496 с.
5. Сушков В. В. Техническая термодинамика / В. В. Сушков. – М.-Л. : ГОСЭНЕРГОИЗДАТ, 1960. – 380 с.
6. Теплофизические характеристики пищевых продуктов. Справочник / Гинзбург А. С. и др. – М., 1980. – 288 с.
7. Чубик И. А. Справочник по теплофизическим характеристикам пищевых продуктов и полуфабрикатов / Чубик И. А., Маслов А.М. – М.: Пищевая промышленность, 1970. – 184 с.

**ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕННИКА
ДЛЯ ПОДОГРЕВА ВИНОГРАДНОГО СОКА КАК ОБЪЕКТА
УПРАВЛЕНИЯ**

В. А. Мирошник, Т. И. Лендел

Аннотация. *Приведена имитационная математическая модель теплообменника для подогрева виноградного сока. Установлены зависимости теплоемкости виноградного сока от температуры, а также рассчитаны расходы сока в процессе управления.*

Ключевые слова: *математическая модель, температура, теплообменник*

**SIMULATION OF THE HEAT EXCHANGER FOR GRAPE JUICE
HEATING AS A CONTROL OBJECT**

V. Miroshnyk, T. Lendiel

Annotation. *An imitation mathematical model of heat exchanger to heat the grape juice. The dependences of specific heats of grape juice from temperature and calculated juice consumption in the control.*

Keywords: *mathematical model, temperature, heat exchanger*