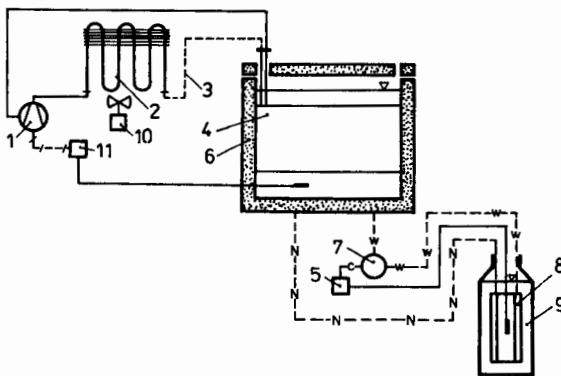


PROBLEMATYKA CHŁODNICZA MAŁYCH, AKUMULACYJNYCH OZIĘBIACZY
DO MLEKA

Jacek Kulesza, Zbigniew Wiejacki

Instytut Techniki Ciepłej i Chłodnictwa Politechniki Łódzkiej

Problem pełnego zagospodarowania mleka wiąże się z koniecznością jego chłodzenia. Według Polskiej Normy Branżowej mleko powinno w ciągu dwóch godzin po udoju zostać ochłodzone do temperatury nie wyższej niż 12°C , a do trzech godzin po udoju uzyskać temperaturę 4°C i w tej temperaturze powinno być przechowywane [2, 3]. W Polsce istnieje około 1,6 mln indywidualnych gospodarstw rolnych, produkujących w ciągu doby 30-60 litrów mleka. Gospodarstwa te powinny mieć niewielkie oziębiacze, pozwalające na przechowywanie produktu w przewidzianych normą warunkach, co stanowi nieodzowny warunek uniknięcia strat. Z tą myślą w Instytucie Techniki Ciepłej i Chłodnictwa Pł w 1980 r. został skonstruowany i przebadany prototyp oziębiacza o wydajności dobowej 60 litrów (2 cykle co 10 godzin po 30



Rys. 1. Schemat akumulacyjnego, zanurzeniowego oziębiacza do mleka: 1 - silnikosprężarka, 2 - skraplacz, 3 - kapilara, 4 - parownik, 5 - termostat wody lodowej, 6 - zbiornik wody lodowej, 7 - pompa wody lodowej, 8 - wymiennik ciepła (węzownica), 9 - konew z mlekiem, 10 - wentylator skraplacza, 11 - termostat silnikosprężarki

litrów). Wybrano oziębiacz akumulacyjny ze względu na korzystny rozkład poboru energii elektrycznej w porównaniu z innymi badanymi wcześniej urządzeniami [1].

W prototypie zastosowano typowe elementy i podzespoły konstrukcyjne, używane w budowie chłodziarek domowych. Działanie jest następujące: na parowniku 4 urządzenia chłodniczego wymrażany jest lód z części wody, znajdującej się w zbiorniku 6. Właściwe namrażanie lodu reguluje termostat 11. Woda lodowa jest pompowana przez pompę 7 do wymiennika ciepła 8, zanurzonego w konwi z mlekiem 9. Termostat 5 wyłącza pompę, gdy temperatura mleka osiągnie 4°C . Wskutek pobrania ciepła od mleka część lodu ulega roztopieniu, jednak wydajność chłodnicza samego urządzenia wystarcza do utrzymania osiągniętej temperatury mleka nawet przy najwyższych spotykanych w Polsce temperaturach otoczenia. Natomiast do ochłodzenia następnej konwi należy wymrozić bez obciążenia (co trwa do 7 godzin) następną porcję lodu.

W związku z konstrukcją i badaniami oziębiacza wyłaniają się następujące problemy:

- 1 - w jaki sposób określać wydajność agregatu chłodniczego, aby osiągnąć wymagane przez normę warunki,
- 2 - jak powinien być zwymiarowany zbiornik wody lodowej; jaki powinien być właściwszy stosunek masy wody do masy lodu (co określa wielkość akumulacji),
- 3 - jaki wpływ wywiera stan otoczenia na pracę oziębiacza,
- 4 - jaka powinna być czynna powierzchnia wymiennika ciepła, zanurzonego w mleku,
- 5 - jaka powinna być wydajność masowa m pompy wody lodowej.

Odpowiedzi na niektóre z postawionych pytań otrzymuje się analizując bilans ciepła konwi w czasie $d\tau$. Wyraża się on równaniem

$$(mc)_{m1} dt + (kA)_z (t_z - t) d\tau + \dot{Q}_s d\tau = (kA)_w (t - t_{w1}) d\tau, \quad (1)$$

gdzie: $(mc)_{m1}$ - pojemność cieplna mleka w konwi,

t - temperatura mleka,

t_z - temperatura otoczenia,

t_{w1} - temperatura wody lodowej,

τ - czas,

$(kA)_z$ - strumień ciepła wnikający do konwi z otoczenia przy różnicy temperatur 1°C ,

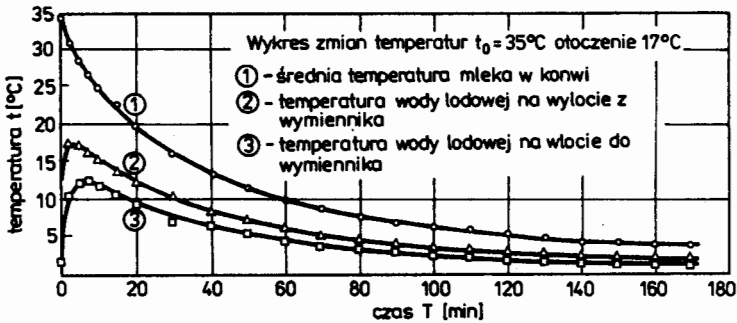
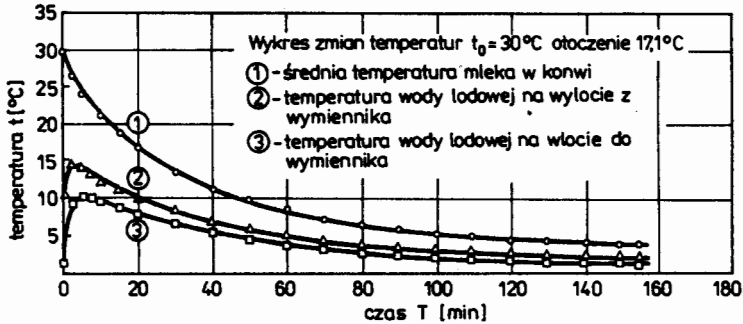
$(kA)_w$ - strumień ciepła wnikający do wody lodowej z mleka przez ściankę wymiennika 8 przy różnicy temperatur 1°C ,

k - współczynnik przenikania ciepła,

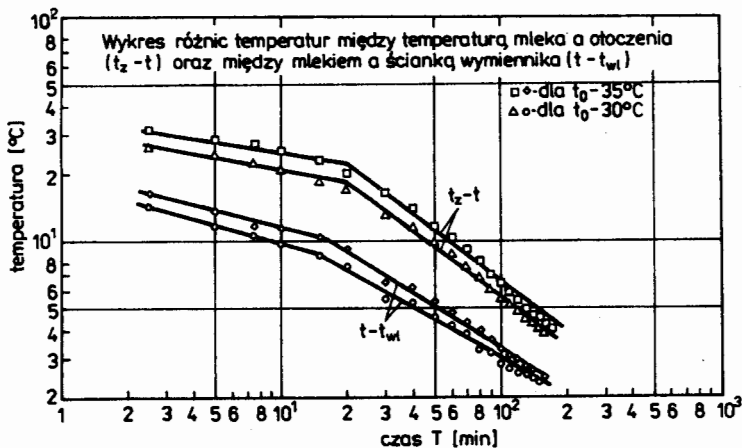
A - powierzchnia,

\dot{Q}_s - moc strat.

Występujące w równaniu temperatury t i t_{w1} są funkcjami czasu, a temperatura t_z jest parametrem, którego wartość można przyjąć za stałą dla danego cyklu pracy.



Rys. 2. Wykresy zależności temperatur od czasu



Rys. 3. Wykresy zależności różnic temperatur od czasu w układzie podwójnie logarytmicznym

Na rysunkach 2 i 3 przedstawiono przebiegi temperatur oraz różnic temperatur w funkcji czasu. Z rysunku 3 widać, że poza kilkunastominutowym odcinkiem \tilde{t}_0 (do załamania linii), związanym z rozbiegiem termicznym urządzenia, przebieg różnic temperatur w funkcji czasu opisują równania

$$\frac{t_z - t}{t_0} = \chi' \left(\frac{\tau}{\tau_0} \right)^{-b}, \quad \frac{t - t_{wl}}{t_0} = \psi' \left(\frac{\tau}{\tau_0} \right)^{-d}. \quad (2)$$

W celu rozwiązania równania (1) i uzyskania opisu matematycznego przebiegu temperatury mleka w funkcji czasu założono następujące uproszczenia, potwierdzone wykonanymi pomiarami:

- 1 - moc strat \dot{Q}_s (ciepło mieszania, niedoskonałość izolacji itp.) jest pomijalnie mała,
- 2 - temperatura mleka t i wody lodowej t_{wl} są wyłącznie funkcjami czasu,
- 3 - współczynniki $(kA)_z$ i $(kA)_w$ są funkcjami odpowiednich temperatur, gdyż k_z i k_w są funkcjami temperatur, a zatem również funkcjami czasu,
- 4 - w czasie $d\tau$ ilość ciepła dopływającego z otoczenia jest pomijalnie mała.

Przy tych założeniach ciepło przenikające przez ściankę wymiennika powoduje wzrost temperatury wody lodowej o Δt_{wl} , czyli

$$(kA)_w (t - t_{wl}) = (\dot{m}c)_{wl} \Delta t_{wl}, \quad (3)$$

gdzie $(\dot{m}c)_{wl}$ - pojemność cieplna strumienia wody lodowej.

Po pewnych przekształceniach, wprowadzających temperatury jako funkcje czasu, otrzymuje się

$$\frac{(kA)_w}{(\dot{m}c)_{wl}} = \phi' \left(\frac{\tau}{\tau_0} \right)^{-a}. \quad (4)$$

Wstawienie (2) i (4) do (1) pozwala na otrzymanie całkowalnej postaci równania różniczkowego, w którym szukaną funkcją jest temperatura mleka, a zmienną niezależną czas

$$dt = \left[\frac{\phi \psi}{(mc)_{ml}} \tau^{-(a+d)} - \frac{(kA)_z}{(mc)_{ml}} \tau^{-b} \right] d\tau, \quad (5)$$

którego rozwiązanie ma postać

$$t = \pi \tau^{1-(a+d)} + \theta \tau^{1-b}, \quad (6)$$

gdzie π i θ są parametrami związanymi z konstrukcją oziębiacza

$$\pi = \frac{(\dot{m}c)_{wl}}{[1 - (a + d)](mc)_{ml}}; \quad \theta = \frac{(kA)_z}{(1 - b)(mc)_{ml}}. \quad (7)$$

Wnioski:

1 - otrzymane rozwiązanie pozwala na wyznaczenie mocy cieplnej wydajności agregatu chłodniczego, gdyż wynika ona z bilansu cieplnego i jest proporcjonalna do pochodnej $\frac{dt}{dt}$;

2 - odpowiedzi na postawione na wstępie pytania (punkty 2, 3, 4 i 5) zawarte są w przeprowadzonej analizie pracy oziębiacza i wyrażają się syntetycznymi parametrami (równ. (4) i (7)) obejmującymi pojemność cieplną strumienia wody lodowej, pojemność cieplną mleka w konwi, wielkości powierzchni wymiennika i konwi oraz wskaźniki a, b i d, które mają znaczenie fizyczne prędkości spadku temperatury, a więc muszą spełniać warunki ograniczające ich wartości bezwzględne

$$|a| \geq |a|_{\min}, \quad |b| \geq |b|_{\min}, \quad |d| \geq |d|_{\min},$$

wynikające z ograniczeń wymienionej na wstępie normy;

3 - otrzymane zależności nie pozwalają oczywiście na jednoznaczne określenie parametrów konstrukcyjnych oziębiacza, lecz stanowią szereg związków matematycznych, pozwalających na ułożenie logicznego ciągu obliczeniowego, prowadzącego do zwymiarowania istotnych elementów. Na przykład ciąg ten może rozpoczynać założenie związane z normą, tj. temperatura, wyrażona równaniem 1), musi spełniać trzy warunki:

$$\text{dla } \tau = 120 \text{ min} \quad t \leq 12^{\circ}\text{C},$$

$$\text{dla } \tau = 180 \text{ min} \quad t \leq 4^{\circ}\text{C}$$

oraz warunek początkowy dla $\tau = 0 - t = 35^{\circ}\text{C}$;

4 - stosunkowo najmniej pewna jest odpowiedź na punkt 3, gdyż wpływ otoczenia może być dodatni przy niskich temperaturach lub ujemny (tj. zwiększający straty energii) przy temperaturach wysokich. Można jednak udowodnić, że straty te nawet w skrajnych przypadkach nie przekraczają 20% mocy cieplnej urządzenia chłodniczego.

PIŚMIENNICTWO

1. Kulesza J., Wiejacki Z.: Przebieg procesu schładzania mleka za pomocą oziębiaczy zanurzeniowych przy bezpośrednim odparowaniu. Zeszyty Naukowe Politechniki Lubelskiej.
2. Norma branżowa BN-73/2559-03.
3. Campbell J. R., Marshall R. T.: Podstawy produkcji mleka spożywczego i jego przetworów. Warszawa, WNT 1982.

Я. Кулеша, З. Вейджи

ХОЛОДИЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ПРОБЛЕМАТИКА
МАЛЫХ, АККУМУЛЯЦИОННЫХ ХОЛОДИЛЬНИКОВ МОЛОКА

Р е з ю м е

Работа представляет некоторые проблемы, связанные с конструктивным оформлением холодильника. Предложение решения этих проблем основано на анализе теплообмена между молоком и ледяной водой внутри молочного танка.

J. Kulesza, Z. Wiejacki

REFRIGERATIONAL PROBLEMS OF THE SMALL ACCUMULATION
TYPE MILK COOLERS

S u m m a r y

This paper presents some problems, according to the design form of cooler and proposition of their solution. The calculation is based on the thermal balance of heat exchanger, plunged in milk and results of tests made on prototype unit.