

OPTIMIZAREA PARAMETRILOR TEHNOLOGICI AI INSTALAȚIEI ECOLOGICE PENTRU RĂCIREA LAPTELUI

OPTIMISATION OF THE TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF THE ECOLOGICAL MILK COOLING PLANT

CZU: 621.56:637.133.1

<https://doi.org/10.56329/1810-7087.23.2.17>

DRD. NICOLAI URSATII,
DEPARTAMENTUL INGINERIA FABRICAȚIEI,
UNIVERSITATEA TEHNICĂ A MOLDOVEI
[HTTPS://ORCID.ORG/0000-0002-5264-6976](https://orcid.org/0000-0002-5264-6976)

ABSTRACT

The aim of this paper is to optimize the technological parameters of the ecological milk cooling plant with the application of natural cold, which ensures a significant increase in energy efficiency at collection points in the Republic of Moldova. The proposed plant captures the natural cold and stores it in the insulated cold accumulator without the use of freons, which is then used for cooling milk. In order to achieve the goal, the mathematical model of the intermediate refrigerant cooling process using renewable energy was developed in the paper. Based on the requirements imposed on the technological process as well as the developed mathematical model, it was determined that for cooling the intermediate refrigerant from the initial temperature of +14°C to +4°C, at the ambient temperature of +2°C, 34.25 times more equivalent volume of air is required.

Keywords: *mathematical model; technological parameters; energy efficiency; intermediate refrigerant; low electricity consumption.*

REZUMAT

Scopul acestei lucrări este optimizarea parametrilor tehnologici ai instalației ecologice pentru răcirea laptelui cu aplicarea frigului natural, care asigură sporirea semnificativă a eficienței energetice la punctele de colectare din Republica Moldova. Instalația propusă captează frigul natural și îl depozitează în acumulatorul de frig termoizolat fără utilizarea freonilor, care ulterior este utilizat la răcirea laptelui. Pentru atingerea scopului, în lucrare a fost dezvoltat modelul matematic al procesului de răcire a agentului frigorific intermediar cu utilizarea energiei regenerabile. În baza cerințelor impuse procesului tehnologic, precum și a modelului matematic dezvoltat, s-a determinat că, pentru răcirea agentului frigorific intermediar de la temperatura inițială de +14°C până la +4°C, la temperatura mediului ambiant de +2°C, este nevoie de un volum echivalent de aer de 34.25 ori mai mare.

Cuvinte-cheie: *model matematic; parametri tehnologici; eficiență energetică; agent frigorific intermediar; consum redus de energie electrică.*

Introducere

Specialiștii din domeniul tehnologiilor și mijloacelor tehnice utilizate în sectorul agroindustrial au drept obiectiv sporirea eficienței energetice a instalațiilor frigorifice utilizate la păstrarea produselor agroalimentare, precum și argumentarea modelelor de calcul pentru controlul proceselor și regimurilor de răcire și acumulare de frig în cantități optime [1, 2, 3, 11, 12].

Pentru reducerea consumului de energie electrică și a emisiilor nocive în atmosferă, în acest studiu se propune combinarea instalațiilor frigorifice existente la punctele de colectare a laptelui cu instalații sezoniere, utilizând frigul natural, care au drept scop creșterea eficienței energetice și reducerea impactului asupra mediului. Pentru atingerea acestui scop, în lucrare a fost dezvoltat modelul matematic pentru determinarea parametrilor tehnologici ai instalației ecologice de răcire a agentului frigorific intermediar cu depozitare în acumulatorul de frig.

Conform literaturii de specialitate [3, 4, 5], utilizarea acumulatorului cu frig, inclusiv în perioada caldă a anului, la răcirea agentului frigorific intermediar cu frig combinat de la instalația frigorifică existentă și cea propusă creează posibilități favorabile pentru a reduce puterea electrică a instalației frigorifice, precum și pentru reducerea consumului specific de energie electrică în comparație cu utilizarea doar a instalației frigorifice cu frig artificial. În perioada rece a anului, utilizarea acumulatorului cu frig pentru răcirea laptelui creează posibilități pentru reducerea esențială a consumului specific de energie electrică [7, 8].

Utilizarea unor astfel de instalații în perioada rece a anului permite de a reduce consumul de energie electrică în procesul de răcire a laptelui de până la 6.5 ori, iar consumul mediu anual de energie electrică cu cca 27% [1]. Acest lucru se datorează înlocuirii în procesul de răcire a compresorului de freon, care, pentru o instalație frigorifică cu capacitatea de 700 de litri de lapte, are puterea instalată de 3 kW, cu o pompă de apă și un ventilator care împreună nu depășesc valoarea de 0.3 kW a puterii instalate. Totodată, este de menționat că excluderea sistemului de răcire cu freon în perioada rece a anului duce și la reducerea poluării mediului ambiant [7, 9, 10].

Materiale și metode de cercetare

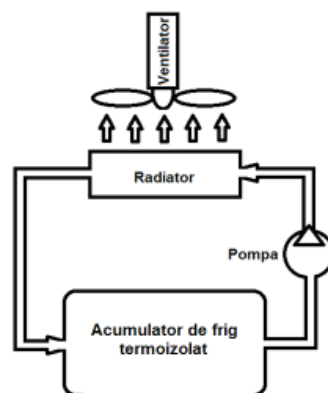
S-a studiat procesul ecologic de răcire a apei sau saramurii în calitate de agent frigorific intermediar (AFI) într-un schimbător de căldură (radiator) cu răcirea forțată în flux de ventilatorul electric și depozitarea acestuia în acumulatorul de frig termoizolat (AFT), care ulterior este utilizat la prelucrarea primară a produselor agroalimentare, în special a laptelui. Studiul are drept scop de a determina raportul de aer/AFI și durata necesară de răcire a agentului de la temperatura inițială de +14°C până la +4°C, la temperatura mediului ambiant de +2°C.

Parametrii constructivi ai schemei propuse sunt evaluați pe baza unor argumente științifice care iau în considerare legile de transfer termic în diferitele componente ale instalației.

În Fig. 1 este prezentat schematic procesul de răcire a agentului frigorific intermediar, care este răcit cu frig natural și depozitat în acumulatorul de frig termoizolat.

Fig. 1. Instalația ecologică pentru captarea și depozitarea frigului natural aplicată în cercetarea procesului de răcire

Sursa: Elaborată de autor



Această instalație este utilizată la răcirea laptelui, fiind combinată cu instalațiile existente utilizate la punctele de colectare din Republica Moldova.

Rezultate și discuții

Pentru estimarea parametrilor tehnologici optimali ai instalației ecologice de răcire a laptelui, în continuare s-a obținut un model matematic de calcul cu ajutorul căruia se determină volumul necesar de frig natural (aer rece) pentru răcirea agentului frigorific intermediar.

Ecuția bilanțului energetic pentru schimbătorul de căldură la răcirea agentului frigorific intermediar se exprimă ca [2, 3, 6]:

$$q_{af} \cdot c_{af}(t_{iafr} - t_{fafr}) = q_a \cdot c_a(t_{ea} - t_{ia}). \quad (1)$$

unde: q_{af} – debitul de agent frigorific intermediar produs de pompă (m^3/h); c_{af} – căldura specifică a agentului frigorific intermediar la presiune constantă ($c_{af}=4.185 \text{ kJ/kgK}$ – pentru apă); t_{iafr} – temperatura agentului frigorific intermediar la intrarea în radiator ($^{\circ}\text{C}$); t_{fafr} – temperatura agentului frigorific intermediar la ieșirea din radiator ($^{\circ}\text{C}$); q_a – debitul de aer produs de ventilator ce trece prin schimbătorul de căldură (m^3/h); unde c_a – căldura specifică a aerului ($c_a = 0.8382 \text{ kJ/kgK}$); t_{ia} – temperatura aerului la intrarea în schimbătorul de căldură ($^{\circ}\text{C}$); t_{ea} – temperatura aerului la ieșirea din schimbătorul de căldură ($^{\circ}\text{C}$).

Luând în considerare parametrii de calcul și pe cei practici pentru instalațiile cu răcire forțată cu aer prin schimbătorul de căldură, raportul debitelor va fi:

$$\frac{q_a}{q_{af(apa)}} = 200, \quad (2)$$

iar

$$\frac{c_{af(apa)}}{c_a} = 5. \quad (3)$$

Reieșind din relațiile (2) și (3), se obține ecuația:

$$(t_{iafr} - t_{fafr}) = 40 \cdot (t_{ea} - t_{ia}), \quad (4)$$

sau în condiția [2] în care temperatura finală a agentului ce este răcit prin schimbătorul de căldură t_{fafr} trebuie să obțină o valoare cu $+2^{\circ}\text{C}$ mai mare decât temperatura agentului de răcire la intrarea în schimbătorul de căldură t_{ia} , temperatura de intrare a aerului în schimbător poate fi exprimată prin:

$$t_{ia} = t_{fafr} - 2, \quad (5)$$

iar ecuația (4) va avea forma:

$$(t_{iafr} - t_{fafr}) = 40 \cdot (t_{ea} - t_{fafr} + 2), \quad (6)$$

de unde reiese că temperatura de ieșire a aerului va fi:

$$t_{ea} = \frac{t_{iafr} + 39t_{fafr} - 80}{40}. \quad (7)$$

Ecuția bilanțului energetic pentru acumulator de frig natural a AFI se prezintă ca [3]:

$$q_{af}(t_{iafr} - t_{fafr}) \cdot dT_{rafr} = V_{af} \cdot dt_{ia}, \quad (8)$$

unde: T_{rafr} – timpul de răcire a volumului de agent frigorific intermediar prin schimbătorul de

căldură (h); V_{af} – volumul agentului frigorific intermediar depozitat în acumulatorul de frig (m^3).

În baza ecuațiilor expuse, se determină parametrii tehnologici ai procesului de răcire a AFI cu aer.

Conform literaturii de specialitate [2, 3, 4], pentru doi agenți lichizi cu aceeași valoare a căldurii specifice, un parametru important este raportul dintre aceștia C_{AFN} care se determină ca:

$$C_{AFN} = \frac{V_{L1}}{V_{L2}}, \quad (9)$$

unde V_{L1}, V_{L2} sunt volumele agentului de răcire și volumul agentului răcit.

Atunci, raportul (9) pentru aer și agentul frigorific intermediar, luând în considerare relația (3), va fi:

$$C_{AFN} = \frac{V_{ae}}{V_{af}} = \frac{0.2 \cdot V_a}{V_{af}}, \quad (10)$$

unde V_a este volumul real de aer necesar pentru răcirea AFI; V_{ae} – volumul echivalent de aer necesar pentru răcirea AFI (m^3), și se determină ca:

$$V_{ae} = \frac{c_a}{c_{af(apa)}} \cdot V_a = \frac{0.8382}{4.185} \cdot V_a = 0.2 \cdot V_a. \quad (11)$$

Răcirea unui volum de agent frigorific intermediar depinde de debitul pompei de apă și durata de pompare și se determină ca:

$$V_{af} = q_{af} \cdot T_{rafr}. \quad (12)$$

Atunci durata de răcire a AFI pentru un ciclu complet va fi:

$$T_{rafr} = \frac{V_{af}}{q_{af}}. \quad (13)$$

Pentru stabilirea parametrilor tehnologici concreți ai procesului de răcire a agentului frigorific intermediar și pentru analiza echilibrelor energetice ale sistemelor de răcire, se impun următoarele cerințe [2, 5, 6, 9]:

- temperatura agentului frigorific intermediar răcit $t_{fafr} = t_{iafc} = +4^\circ C$;
- temperatura inițială a agentului frigorific intermediar $t_{iafr} = +14^\circ C$;
- temperatura mediului ambiant $t_{ia} \leq +4^\circ C$ și $t_{ia} < t_{iafr}$;
- funcționarea schimbătorului în flux prevede că $t_{fafr} = t_{ia} + 2$;
- pierderea de căldură se neglijează.

În baza cerințelor înaintate și ecuațiilor prezentate în literatura de specialitate menționată [2, 3], se creează un sistem de ecuații care permite determinarea volumului de aer echivalent necesar pentru răcirea AFI până la temperatura de $+4^\circ C$, cunoscând temperatura mediului ambiant la intrarea în radiator, temperatura inițială a agentului frigorific și volumul acestuia:

$$\left. \begin{aligned} t_{ia} &= t_{iafr} - 2 - (t_{iafr} - 2) \cdot \exp(-\tau) \\ t_{sa} &= \frac{t_{iafr} + 39t_{fafr} - 80}{40} \\ t_{fafr} &= t_{ia} + 2 \end{aligned} \right\}. \quad (14)$$

Procesul de răcire a agentului frigorific va continua până când $t_{iafr} \leq +4^{\circ}\text{C}$, dacă $t_{ia} \leq +2^{\circ}\text{C}$.

Sistemul de ecuații obținut exprimă raportul dintre volumul echivalent de aer necesar pentru răcirea agentului frigorific cunoscând temperatura mediului ambiant la intrare în schimbătorul de căldură și temperatura inițială a AFI:

$$C_{AFN} = 10 \cdot \left[\ln \left(\frac{t_{iafr} - 2}{t_{iafr} - t_{ia} - 2} \right) \right]^{-1} \quad (15)$$

Relațiile obținute reprezintă modelul matematic al procesului de răcire cu aer a AFI prin schimbătorul de căldură în flux cu depozitare a acestuia în acumulator de frig natural termoizolat.

Datorită faptului că temperatura mediului are valori variabile, iar temperatura aerului la intrare în radiator are valori aleatorii, pentru elaborarea calculelor, este necesar de a exprima ecuația bilanțului energetic, care prevede că volumul de energie termică furnizată de AFI este egal cu volumul de energie termică preluată de aerul care trece prin schimbătorul de căldură, neglijând pierderile:

$$V_{af} \cdot (t_{iafr} - t_{fafr}) = 5 \cdot V_{ae} (t_{ea} - t_{ia}). \quad (16)$$

În baza condițiilor inițiale impuse, se obține:

$$C_{AFN} = 10 \cdot \left[\ln \left(\frac{t_{iafr} - 2}{t_{iafr} - t_{ia} - 2} \right) \right]^{-1} = 10 \cdot \left[\ln \left(\frac{12}{12 - t_{ia}} \right) \right]^{-1}, \quad (17)$$

iar

$$C'_{AFN} = \frac{V_{ae}}{V_{af}} = \frac{5 \cdot (t_{iafr} - t_{fafr})}{t_{ea} - 2} = \frac{5 \cdot (14 - 4)}{t_{ea} - 2} = \frac{50}{t_{ea} - 2}. \quad (18)$$

Punctul de intersecție a curbelor $C_{AFN}=f(t_{ia})$ și $C'_{AFN}=f(t_{ea})$, prezentate în Fig. 2, reprezintă soluția optimă a procesului de răcire a AFI într-un schimbător de căldură cu răcire în flux depozitat într-un acumulator de frig natural termoizolat, pentru folosirea ulterioară la răcirea laptelui.

Se stabilește raportul optim C_{AFN} pentru a aduce temperatura apei în acumulatorul termoizolat de frig natural la $\leq +4^{\circ}\text{C}$:

$$C_{AFN} = 10 \cdot \left[\ln \left(\frac{t_{iafr} - 2}{t_{iafr} - t_{ia} - 2} \right) \right]^{-1} = 10 \cdot \left[\ln \left(\frac{12}{12 - t_{ia}} \right) \right]^{-1} = 34.25. \quad (19)$$

Pentru răcirea AFI într-un schimbător de căldură în flux de la temperatura de $+14^{\circ}\text{C}$ la $\leq +4^{\circ}\text{C}$ cu temperatura aerului la intrare în schimbătorul de căldură de $+2^{\circ}\text{C}$, este necesar un volum echivalent de aer de 34.25 ori mai mare decât a AFI (Fig. 2). Iar volumul real de aer necesar, ținând cont de relația (3), va fi de 171 ori mai mare.

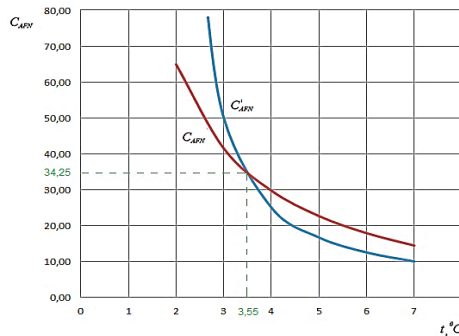


Fig.2. Raportul dintre volumul estimativ necesar de aer pentru răcirea volumului de AFI în funcție de temperatura mediului ambiant

Sursa: Elaborată de autor

Atunci valoarea temperaturii de ieșire a aerului va fi:

$$t_{ea} = \frac{t_{iafr} + 39t_{fafr} - 80}{40} = \frac{14 + 39 \cdot 4 - 80}{40} = 2.25^{\circ}C, \quad (20)$$

iar pierderile de temperatură a aerului:

$$\Delta t_a = t_{ea} - t_{ia} = 2.25 - 2.0 = 0.25^{\circ}C, \quad (21)$$

Respectiv, valoarea pierderilor de temperatură la trecerea agentului frigorific intermediar prin schimbătorul de căldură va fi:

$$\Delta t_{afr} = \frac{c_{af(apa)}}{c_a} \cdot \Delta t_a = 5 \cdot 0.25 = 1.25^{\circ}C, \quad (22)$$

iar diferența de temperatură necesară va fi:

$$dt_{afr} = t_{iafr} - t_{fafr} = 14 - 3.55 = 10.45^{\circ}C. \quad (23)$$

Numărul de cicluri de pompare a AFI se determină:

$$N_{cp} = \frac{dt_{afr}}{\Delta t_{afr}} = \frac{10.45}{1.25} = 8.36, \quad (24)$$

Ținând cont de faptul că cele mai utilizate instalații frigorifice clasice la punctele de colectare a laptelui au capacitatea de 700 de litri, conform literaturii de specialitate [2, 3], pentru reutilizarea acestora în instalații ecologice este nevoie de un acumulator de frig de 2.2 m³. Timpul de răcire a acestui volum de AFI de la temperatura de +14°C prin instalația propusă, având parametri calculați și cei inițiali $q_{afr(apa)} = 3.0m^3/h$ și $q_{aer} = 600m^3/\square$, va fi:

$$T_{traf} = \frac{V_{af}}{q_{afr}} \cdot N_{cp} = \frac{2.2}{3} \cdot 8.36 = 6.1ore. \quad (25)$$

În condițiile punctelor de colectare a laptelui, timpul calculat pentru răcirea agentului frigorific intermediar se încadrează în timpul de repaus între procesele de răcire a laptelui.

Concluzii

Îmbunătățirea metodei de calcul și justificarea caracteristicilor tehnologice ale instalației permit ajustarea dimensiunilor schimbătorului de căldură, ventilatorului și pompei în funcție de capacitatea de stocare a acumulatorului de frig termoizolat.

Astfel, optimizarea parametrilor tehnologici ai instalației de răcire a agentului frigorific intermediar cu frig natural permit ajustarea instalațiilor frigorifice existente la punctele de colectare a laptelui pentru diferite zone ale Republicii Moldova.

În baza parametrilor examinați și a rezultatelor obținute în urma utilizării modelului matematic dezvoltat la procesul de răcire a AFI, s-a stabilit că volumul necesar de aer cu temperatura de +2°C pentru răcirea agentului frigorific intermediar de la +14 °C la +4°C are raportul echivalent de $C_{AFN}=34.25$.

Utilizarea instalației propuse în procesul de răcire a laptelui la punctele de colectare din Republica Moldova are avantaje din punct de vedere ecologic și permite de a reduce consumul de energie electrică de cca 6.5 ori în perioada rece a anului.

REFERINȚE

1. POPESCU, V., URSATII, N., MELENCIUC, M., VOLCONOVICI, O., BALAN, T., ALII, M. *Studiul privind reducerea consumului de energie electrică în procesul de păstrare a produselor agroalimentare*. In: Intellectus 1/2023, pp. 184-189. ISSN 1810-7087.
2. УЧЕВАТКИН, А., НОЗДРИНА, Т. *Математическая модель системы комбинированного охлаждения сельскохозяйственной продукции с использованием природного холода*. В: Вестник ФГОУ ВПО МГАУ № 2-2008, с. 24-28. УДК [631.3:621.31].
3. DAICU, A. *Argumentarea regimurilor de funcționare și a parametrilor constructivi - tehnologici ai instalației ecologice automatizate cu frig natural și artificial pentru răcirea laptelui*. Teza de doct. în științe inginerești, Chișinău, 2020. 155 p.
4. ВОЛКОНОВИЧ Л., et al., *Применение холода для охлаждения молока и хранения плодоовощной продукции*. Chișinău, Moldova, Типография „Prit-Caro”, 2019, 228 p. ISBN 978-9975-56-625-4.
5. ВОЛКОНОВИЧ Л., et al. *Математическая модель и производственные испытания установок сезонного действия для охлаждения молока*. In: Știința Agricolă. 2016, nr. 1, pp. 126-133. ISSN 1857-0003.
6. AGUSTRIYANTO, R., MOCHNI E., S. *Dynamic Study and PI Control of Milk Cooling Process*. In: International Journal on Advance Science, Engineering and Information Technology. Vol.12 (2022) No. 5, pp. 1836-1843. ISSN: 2088-5334.
7. МИШУРОВ, Н. *Биоэнергетическая оценка и основные направления снижения энергоемкости производства молока*. Москва, В: науч. изд. ФГНУ «Росинформагротех» 2010, 152 с. ISBN 978-5-7367-0810-9.
8. GIUDICI, P. A. *Mathematical Modeling of Freezing Process in the Batch Production of Ice Cream*. In: Foods 2021, 35 p. <https://doi.org/10.3390/foods10020334>.
9. УЧЕВАТКИН, А., НОЗДРИНА, Т. *Математическая модель системы комбинированного охлаждения сельскохозяйственной продукции с использованием природного холода*. В: Вестник ФГОУ ВПО МГАУ № 2-2008, с. 24-28. УДК [631.3:621.31].
10. КОРШУНОВ. Б. et al. *Математическая модель и метод расчета параметров энергосберегающей теплохолодильной системы для животноводческих ферм*. В: Вестник ВИЭСХ. 2012, вып. 4(9), с. 34-38. ISSN 2304-5868.
11. URSATII, N., et al. *Contribuții la îmbunătățirea parametrilor tehnico-economici ai instalațiilor frigorifice din punctele de colectare a laptelui*. Chișinău. In: Știința agricolă, nr. 1. CE UASM 2021, pp 97-103. ISSN 1857-0003 / ISSN 2587-3202.
12. POPESCU, V., VIȘANU, V., URSATII, N., CECAN, A., TODIRAȘ, T. *Sistem electric cu fiabilitate sporită pentru întreprinderile specializate în deshidratarea produselor agricole*. In: Intellectus 1/2023, pp. 198-203. ISSN 1810-7087.