

Universitatea “Dunărea de Jos” din Galați
Facultatea de Mecanică
Catedra Sisteme Termice și Ingineria Mediului

Proiectul ID_501/2009: Congelarea criogenică cu azot lichid a fructelor de pădure.

Raport in extenso pentru etapele intermediara și finala 2009

Cuprins

A. Obiective, activități și rezultate planificate.

B. Prezentarea in extenso a activităților desfășurate și a rezultatelor obținute.

- a) Stadiul actual pe plan mondial al congelării criogenice.
- b) Amenajarea (parțială) Laboratorului pentru determinări fizico-chimice (pentru fructe înainte și după congelare/decongelare).
- c) Articole științifice publicate (Anexa).

A. Obiective, activități și rezultate planificate

ETAPA INTERMEDIARA

Ob. 1. Studiul stadiului congelării criogenice cu azot lichid pe plan mondial

- Activități:**
- 1.1. Traducere documentații existente la Biblioteca Universitatii.
 - 1.2. Obținerea de informații privind congelarea criogenica de la firma PRAXAIR(U.S.A).
 - 1.3. Obținerea de informații privind congelarea criogenica de la firma l’Air Liquide(Franta).

Rezultate:

Au fost rezolvate toate activitățile cuprinse in Anexa Ila, și anume:

1-Traducere documentații privind congelarea produselor alimentare, in special a fructelor, existente la Bibliotecile Universitatilor din: Galati, Cluj, Brasov, Sibiu, Pitesti, Tg. Mures (preluare documentatie de la d-na ing. Alina Gherman de la firma PRAXAIR-Chicago-USA, producatoare de congelatoare criogenice) și Suceava. S-au urmarit , in special, acele lucrari

științifice având ca tema congelarea criogenica cu agenti criogenici (azot lichid).

S-au obtinut informații privind aceasta tema și de la prof. Ezio Fornasieri (Universita di Padova, Italia) și de la d-na ing. Alina Gherman (USA). In ceea ce priveste automatizarea congelatorului criogenic existent la Catedra, exista o propunere de colaborare cu d-l conf. Dr. ing. Calin Ciufudean de la Universitatea „Stefan cel Mare”-Suceava.

2-Au fost prezentate 6 articole științifice la conferinte internationale din Romania și publicate in volumele Conferintelor și in Analele Universității „Dunarea de Jos” Galati:

1. V. Damian, G. Coman-“*The use of liquid nitrogen for freezing grapes*” . The annals of “DUNĂREA DE JOS”- University of Galați, Fascicle IV, ISBN 973-627-442-8, pag. 292-297, 2009.
2. V. Damian, G. Coman, Cr. Iosifescu- " *SOME ASPECTS CONCERNING STRAWBERRIES FREEZING USING LIQUID NITROGEN*". Conf. Nat. de Termotehnica, Universitatea Transilvania din Brasov, 21-23 mai 2009, Bulletin of the Transilvania University of Brasov • Vol. 2 (51) – 2009 , Series I: Engineering Sciences, pag.181-184.
3. Cr. Iosifescu, V. Damian- " *STUDY OF AMMONIA-WATER ABSORPTION TRIPLE EFFECT CYCLE*". Conf. Nat. de Termotehnica, Universitatea Transilvania din Brasov, 21-23 mai 2009, Bulletin of the Transilvania University of Brasov • Vol. 2 (51) – 2009 , Series I: Engineering Sciences, pag. 61-66.
4. V. Damian, G. Coman, L. Frangu- *Automation for a liquid nitrogen cryogenic freezer*. International SYMPOSIUM, Univ. Tehnica-Cluj-Napoca, 14-16 mai 2009, ACTA TECHNICA NAPOCENSIS, Series: Applied Mathematics and Mechanics , Nr. XX, Vol. xx, 200x, pag. 155-158.
5. V. Damian, G. Coman-“ *Freezing grapes using liquid nitrogen*”. METIME-International Conference, Universitatea din Galati, 5-7 mai 2009, ISBN 973-627-442-8, pag. 292-297.
6. G. Coman, S. Paraschiv, V. Damian- *Aspects regarding the modeling of thermic transfer processes in environments with phase change with plane geometry*. METIME-International Conference, Universitatea din Galati, 5-7 mai 2009, ISBN 973-627-442-8, pag.129-132.

Ob. 2. Amenajarea (partiala) Laboratorului pentru determinari fizico-chimice (pentru fructe inainte și dupa congelare/decongelare)

Activitati: 2.1. Realizarea proiectului de amenajare.

2.2. (poz.10 in Contract)-Amenajare compartiment Laborator (pereti, usa, geamuri-tip termopan).

Rezultate:

Realizarea proiectului și amenajarea(partiala) a Laboratorului pentru determinari fizico-chimice(pentru fructe inainte și dupa congelare/decongelare). Lucrarea a fost realizata din panouri de tip termopan(pereti și acoperis), este amplasata in Hala FRIGOTEHNIE a Catedrei de *Sisteme termice și ingineria mediului*, Facultatea de Mecanica și are dimensiunile: Lxlxh=3500x2300x2100 (mm). In etapele urmatoare ale Contractului acest Laborator va fi dotat cu toate aparatele și ustensilele necesare cercetarilor propuse.

ETAPA FINALA

Ob. 1. Stagiu de documentare la firma KELOX-Madrid(Spania).

Activitati: 1.1. Deplasarea a unui membru din echipa de cercetare in Spania.

1.2. Documentare privind congelatoarele criogenice.

1.3. Traducere documentatie privind congelatoarele criogenice.

Rezultate:

Prin deplasarea d-lui Conf. Dr. Ing. Iosifescu Cristian la firma KELOX-Madrid, in luna noiembrie 2009, s-au obtinut documentații privind congelatoarele criogenice de tip **I'Air Liquide** și s-au stabilit relații de colaborare și cercetare știintifica.

S-a urmarit, in special, traducerea documentatiei privind congelarea criogenica a fructelor.

Tendințe actuale

Piața de produse congelate este în continuă dezvoltare și este caracterizată de cicluri de viață tot mai scurte ale produselor, având drept consecință o schimbare tot mai rapidă a numărului și tipului de produse noi.

Dacă perioada de recuperare a investițiilor de capital depășește durata de viață a produsului, atunci apare un risc comercial semnificativ, exceptând cazul în care echipamentul este suficient de flexibil pentru a se adapta la noi produse.

În cazul azotului, 48% din capacitatea frigorifică totală este reprezentată de căldură latentă de schimbare de fază, iar restul de 52% îl reprezintă căldura sensibilă a

vaporilor, care, din acest motiv, sunt recirculați în tunel în scopul de a utiliza la maxim capacitatea frigorifică.

Comparativ cu CO₂, consumul de azot este mai redus, dar pierderile la depozitare sunt mai mari.

Prin modernizarea congelatorului existent in Hala Frigotehnie a **Catedrei de Sisteme termice și ingineria mediului** se vor putea realiza cercetările propuse in Contractul de cercetare.

Ob. 2. Amenajarea (parțiala) Laboratorului pentru determinări fizico-chimice(pentru fructe înainte și după congelare/decongelare)

Activități: 2.1.(poz. 9. in Contract) - Achiziționare: stative, cilindri gradați, pipete, pahare, biurete, buloane cotate, pâlnii, sticle de ceas, fiole, eprubete, cleme, triunghi de sarma, mojarare cu smalt, pistil pentru mojar, pahare, etc.

Rezultate: Aparatele și materialele achiziționate au fost amplasate in Laboratorul pentru determinări fizico-chimice(pentru fructe de pădure, înainte și după congelare/decongelare) (Fig.1).



Figura 1. Laborator pentru determinari fizico-chimice (amenajare partiala).

Articole științifice publicate sau acceptate pentru publicare

Au fost acceptate 2 Lucrari Științifice pentru a fi publicate in Analele Universității „Dunarea de Jos” Galati:

1. Cr. Iosifescu, V. Damian -PERFORMANCE OF REFRIGERATION SYSTEMS USING OZONE-FRIENDLY REFRIGERANTS, The Annals of „Dunarea de Jos”, University of Galati, Fascicle IV, Refrigerating Technique, 2009, ISSN 1221-4558.

ABSTRACT

A vapor compression simulation model was developed. Simple mathematical models were employed for each component of the cycle. They resulted in a set of nonlinear equations, which was solved numerically. The model is capable of predicting the operating point of the system (including condensing and evaporating pressures) as a function of equipment characteristics (for example, compressor swept volume, speed and clearance ratio , and heat exchanger overall conductances) and prevailing thermodynamic conditions (such as heat source and heat sink temperatures with the mass flow rates of their fluids). As an application, a comparative analysis is made on the thermodynamic performance of a domestic refrigeration system running on three different refrigerants: HCFC-22, R-410A and R-407C.

2. G. Coman, Cr. Iosifescu- FINITE DIFFERENCES ANALYSIS OF ICE SOLIDIFICATION OUTSIDE A FLAT WALL, The Annals of „Dunarea de Jos”, University of Galati, Fascicle IV, Refrigerating Technique, 2009, ISSN 1221-4558.

ABSTRACT

The substances solidification issue, seen by the temperature field in solid and liquid phases calculation and by the solid-liquid interface propagation, presents a special interest (from the theoretical and practical points of view), as the conductive transfer processes together with the phase transition phenomenon are present in numerous applications, such as the ingots solidification, the controlled alloys solidification in order to obtain a certain metallographic structure, food freezing, soil freezing and de-freezing, ablation phenomenon to aerodynamic heating, phase change thermal storage etc.

Au fost acceptate 2 Lucrari Științifice pentru a fi prezentate și publicate la Conferinta Internaționala COFRET’10, organizata de Universitatea Tehnică „Gh. Asachi” din Iași, 5 – 7 mai 2010:

3. V. Damian, Cr. Iosifescu , G. Coman -ASPECTS CONCERNING STRAWBERRIES FREEZING USING LIQUID NITROGEN.

ABSTRACT

This paper presents some aspects concerning strawberries freezing using liquid nitrogen: duration of the process, freezing capacity, advantages and disadvantages of this modern method.

Quick freezing of food products in a cryogenic freezer consist in the use of evaporation latent heat of the liquid nitrogen, as well as of the sensible heat of the vapors, whose temperature increase up to final temperature of the frozen product. The use of cryogenic freezing with liquid nitrogen and carbon-dioxide is regarded as the “centuries revolution” in the food area.

4. G. Coman, V. Damian, Cr. Iosifescu - FINITE DIFFERENCES ANALYSIS OF ICE SOLIDIFICATION OUTSIDE A FLAT WALL.

ABSTRACT

The substances solidification issue, seen by the temperature field in solid and liquid phases calculation and by the solid-liquid interface propagation, presents a special interest (from the theoretical and practical points of view), as the conductive transfer processes together with the phase transition phenomenon are present in numerous applications, such as the food freezing, soil freezing, phase change thermal storage etc.

B. Prezentarea in extenso a activităților desfășurate și a rezultatelor obținute

a) Stadiul actual pe plan mondial al congelării criogenice

Cuprins

Elemente caracteristice ale unui proces de congelare	8
Congelarea cu azot lichid	13
Tendințe actuale pe plan mondial privind congelarea criogenică	17
Particularitati privind congelarea fructelor	29
Fructele de pădure	31
Caracteristicile congelatoarelor firmei KELOX-Spania	35
Calculul timpului de congelare	41
Bibliografie	50

Elemente caracteristice ale unui proces de congelare

Prin congelare un produs este răcit la o temperatură finală de $-18...-25\text{ }^{\circ}\text{C}$, mult inferioară punctului crioscopic, proces în urma căruia peste 95% din conținutul de apă al produsului solidifică sub formă de gheață.

Punctul de congelare al produselor alimentare se situează la temperaturi cuprinse între $-0,5^{\circ}\text{C}$ și -4°C , în funcție de natura produsului.

Mărimea conservabilității obținută prin congelare se bazează pe efectele temperaturilor scăzute, de încetinire puternică sau inhibare completă a dezvoltării microorganismelor, de reducere sau stopare a proceselor metabolice în cazul produselor cu viață și de reducere a reacțiilor chimice și biochimice [2].

În timpul congelării unui produs alimentar au loc următoarele fenomene fizice importante:

- solidificarea într-o anumită proporție a apei conținute în produs;
- mărimea volumului produsului;
- întâlnirea consistenței.

Temperatura în produsele alimentare supuse congelării variază în timpul procesului de răcire în funcție de timp și locul punctului de măsură. Punctul cu temperatura cea mai ridicată la un moment dat se numește centrul termic al corpului respectiv și reprezintă un indicator al aprecierii stadiului congelării. Congelarea se consideră finalizată în momentul în care temperatura sa medie este egală cu temperatura la care urmează să aibă loc depozitarea.

Practic, se poate lua drept criteriu de apreciere a stadiului răcirii temperatura centrului termic, care trebuie să fie cu $3...5^{\circ}\text{C}$ mai ridicată decât temperatura la care urmează să aibă loc depozitarea produsului respectiv.

În timpul procesului de congelare pot avea loc și alte fenomene mai mult sau mai puțin reversibile: de exemplu, proteinele și alți biopolimeri pot pierde o parte din apa de constituție, iar la solidificare o parte din apa intracelulară, având drept consecințe deshidratarea și contracția celulelor.

Procesul de solidificare a apei conduce la formarea unor nuclee de cristalizare, în jurul cărora cresc și se formează cristalele de gheață. Ca să se formeze un nucleu stabil de cristalizare este necesar să se precizeze temperatura de subrăcire a lichidului, mai mare în cazul nucleelor omogene și mai mică în cazul celor eterogene, la care prezența particulelor străine favorizează crearea centrilor de cristalizare. La o temperatură de subrăcire inferioară celei minime cerute, crește numărul nucleelor de cristalizare în unitate de timp și prin urmare viteza de cristalizare (Fig.2).

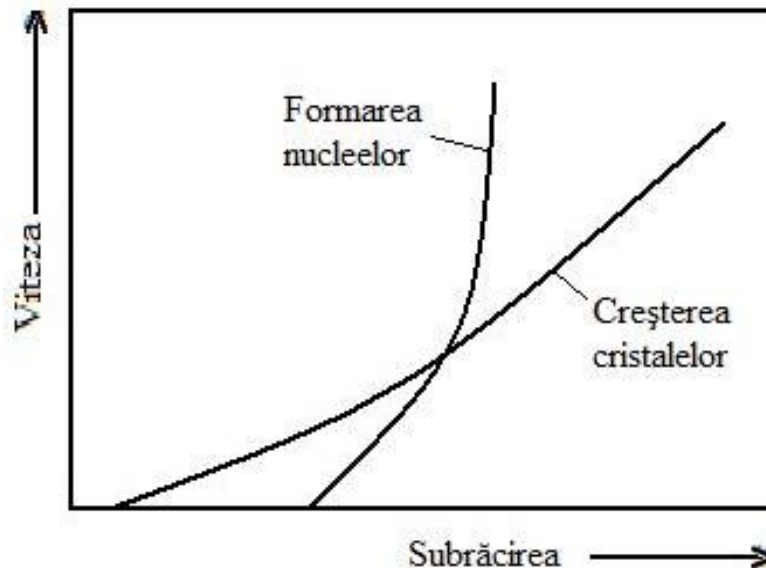


Figura 2. Influența subrăcirii lichidului asupra vitezei de formare a nucleelor și a creșterii cristalelor de gheață, în timpul fazei metastabile de început de solidificare.

Valoarea temperaturii de subrăcire, pe de altă parte, este strict legată de intensitatea fluxului termic și, ca urmare, influențează astfel timpul de congelare. Deci calitatea unui produs congelat este puternic influențată de temperatură în cazul unei congelări rapide, deoarece se obțin cristale mici de gheață, care produc minime daune în structura celulară.

Viteza de congelare are și un important efect asupra localizării cristalelor de gheață: la viteză mică de congelare, apa intracelulară poate părăsi celulele și să se solidifice în afara lor. Pentru a se evita formarea gheții extracelulare, care poate provoca daune importante pereților celulelor, este necesar ca viteza de răcire să fie:

0,3°C/min-pentru țesuturi animale

2°C/min-pentru țesuturi vegetale.

Inițierea cristalizării se face cu un consum energetic mai mare decât desfășurarea acesteia. Odată cu scăderea temperaturii, viteza de creștere a cristalelor de gheață scade ca urmare a creșterii viscozității fazei congelabile din produs.

Scăderea temperaturii superficiale a produsului supus congelării mărește diferența de temperatură dintre suprafață și faza încă necongelată, contribuind astfel la mărirea vitezei de creștere a cristalelor de gheață.

Refrigerarea produselor alimentare de origine animală și depozitarea acestora în stare refrigerată nu determină, de regulă, scăderea valorii nutritive. Singurele excepții sunt pierderile de suc (proteine, ș.a.) la tranșarea cărnii și deteriorării ale tiaminei.

Congelarea și depozitarea în stare congelată a produselor alimentare pot determina scăderea valorii nutritive prin denaturarea proteinelor, scăderea

capacității de reținere a vitaminelor esențiale, pierderile de valoare nutritivă la decongelare.

Denaturarea proteinelor (proces în care aranjamentul spațial al lanțului de polipeptide în cadrul moleculei este modificat de la forma tipică, naturală a proteinei, într-un aranjament dezordonat) scade odată cu scăderea temperaturii de depozitare, ajungându-se chiar la anularea denaturării. Astfel, la temperatura de -18°C , după un an de depozitare, valoarea de utilizare a proteinelor din pește rămâne practic neafectată.

Pierderile prin decongelare constau în pierderi din conținutul de vitamine, săruri minerale și proteine. Aceste pierderi pot fi prevenite dacă se gătește carnea direct din stare congelată (fără decongelare prealabilă) sau dacă exudatul de la decongelare se recuperează.

Sub acțiunea temperaturilor scăzute, în produsele alimentare se produc o serie de modificări fizice, determinate în special de transferul de căldură și de masă în timpul procesului de răcire și depozitare, iar pentru produsele congelate și în timpul decongelării. O astfel de modificare importantă este pierderea în greutate, în special prin deshidratare, a produselor supuse răcirii.

Ca urmare a aplicării răcirii se pot produce transformări nedorite ale pigmentilor naturali, modificări de consistență, modificări de formă. Cele mai multe modificări de natură fizică se produc în strânsă intercorelare cu modificările de natură chimică, biochimică sau microbiologică. Apa se poate solidifica în sistem cristalin sau amorf, iar mărimea cristalelor depinde, în mare măsură, de viteza de congelare. În cazul unei CONGELĂRI LENTE rezultă un număr redus de cristale cu dimensiuni mari și neregulate, pe când la CONGELAREA RAPIDĂ se obține un număr mare de cristale cu dimensiuni reduse și forme regulate. După cristalizare crește volumul specific al apei (cu 9% la 0°C), iar volumul specific al gheții se reduce odată cu scăderea temperaturii, dar rămâne mai mare decât al apei [3].

Solidificarea apei în sistem amorf (vitrificare) se face la temperaturi foarte scăzute ($< -150^{\circ}\text{C}$) și la viteze de răcire extrem de mari (de ordinul sutelor de grade pe secundă); la fel viteza de decongelare este foarte mare, pentru a se evita trecerea din stare amorfă în stare cristalină, condiții ce nu sunt practic folosite la congelarea produselor alimentare.

CINETICA PROCESULUI DE CRISTALIZARE a apei într-un produs alimentar se bazează pe apariția nucleelor de cristalizare când temperatura a atins punctul de congelare, depășindu-se starea de suprarăcire (la produsele care prezintă această proprietate).

a) Dacă procesul este lent, nucleele de gheață sunt puține și se formează mai ales în spațiile intercelulare, fiind numite de R. Ulrich GHEAȚĂ EXTRACELULARĂ. Apa din celule migrează, prin osmoză, către spațiile intercelulare și solidifică pe cristalele de gheață deja formate, care se măresc astfel și tind să ia o formă neregulată, unghiulară, deformând celulele și modificând structura țesuturilor. Cristale de gheață asemănătoare se pot forma și între

membrană și protoplasmă, fiind numite în acest caz GHEAȚĂ EXTRA-PROTOPLASMATICĂ (R. Ulrich, 1969).

b) Când viteza de congelare este mai mare, apar multe nuclee de cristalizare atât în spațiile intercelulare cât și în cele intracelulare, formându-se cristale de gheață mici și egal repartizate în spațiile inter și intracelulare. În timpul congelării volumul lor crește foarte puțin față de mărimea inițială și au o formă regulată, fără asperități, așa încât structura grosieră a țesuturilor și membrana celulelor sunt mai puțin solicitate mecanic, deci mai puțin vătămate. Conținutul celular devine opac datorită numărului mare de cristale mici de gheață, iar printre ele sunt prezente picături fine de suc celular, foarte concentrat, a cărui apă nu mai poate congela.

În concluzie, este necesar să se adopte procedee și tehnologii de congelare specifice produselor respective, care să asigure viteze mari de congelare, astfel încât, prin scăderea rapidă a temperaturii, să se obțină o structură microcristalină uniformă, atât în spațiile intercelulare cât și-n cele intracelulare, cu forme regulate, care au o acțiune redusă de vătămare a țesuturilor și nu perforarea membranei celulare.

Din acest punct de vedere, **congelarea cu azot lichid** îndeplinește toate condițiile tehnologice privind calitatea produselor, dar prețul de cost al procedeeului rămâne încă un obstacol pentru aplicarea sa pe scară largă, la toate produsele alimentare. Procesul de congelare necesită, pe lângă condițiile impuse de specificul tehnologiei respective, respectarea unei serii de condiții general valabile:

- utilizarea unor materii prime și produse de calitate corespunzătoare;
- asigurarea tuturor elementelor igienico-sanitare necesare evitării contaminării cu microorganisme a produselor înaintea congelării și după decongelare;
- asigurarea unor temperaturi de refrigerare adecvate în cazul în care produsele nu sunt introduse direct în spațiile sau aparatele de congelare, sau nu sunt utilizate imediat după congelare.

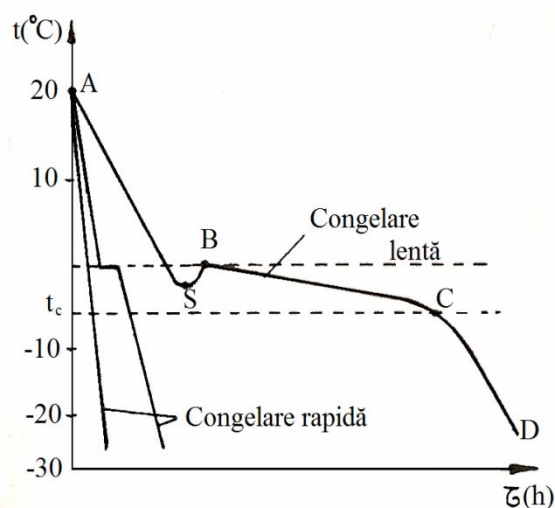


Figura 3. Curbele schematice de congelare în funcție de viteza de congelare.

Procesul tehnologic de conservare prin congelare a unui produs alimentar cuprinde următoarele faze: tratamentele preliminare, congelarea propriu-zisă, ambalarea, depozitarea în stare congelată, transportul, decongelarea, păstrarea de scurtă durată în stare decongelată până la consum sau utilizare într-un proces de fabricație.

După cum se observă în Fig. 3, scăderea temperaturii în produs are loc în trei faze importante:

- faza de refrigerare a produsului, adică porțiunea de curbă A-S-B, punctul S corespunzând temperaturii de suprarăcire, iar punctul B temperaturii de congelare, ambele specifice produsului respectiv;
- faza de congelare propriu-zisă (B-C), foarte apropiată de un palier (temperatura variază între -1°C și -5°C), apa fiind transformată în gheață în proporție de 60-70%. Lungimea palierului B-C depinde de viteza de congelare, de natura produsului, de procedeul utilizat;
- faza de subrăcire a produsului congelat până la o temperatură finală de $-18\dots-25^{\circ}\text{C}$ (C-D), proporția de apă congelată ajungând la 90-95%. Institutul Internațional al Frigului (I.I.F) a stabilit pentru produsele alimentare congelate prin procedee rapide următoarele condiții de temperatură:
 - temperatura finală în centrul termic al produsului: $\leq -15^{\circ}\text{C}$;
 - temperatura medie finală: $\leq -18^{\circ}\text{C}$;
 - temperatura de depozitare: $\leq -18^{\circ}\text{C}$;
 - temperatura în mijloacele de transport: $\leq -18^{\circ}\text{C}$;
 - temperatura de desfăcere: $\leq -15^{\circ}\text{C}$.

În timpul procesului de congelare au loc următoarele transformări fizice: solidificarea apei, creșterea volumului și a consistenței. Temperatura în produsul supus congelării variază în timp și spațiu. Din punct de vedere structural și biologic, formarea de cristale mari de gheață în timpul congelării determină în majoritatea cazurilor modificări ireversibile nefavorabile și a căror amploare depinde de: natura celulei, rezistența membranei, conținutul de apă etc. Aceste modificări sunt cauzate de acțiuni mecanice ale cristalelor de gheață asupra celulelor și țesuturilor și de acțiuni fizico-chimice ale soluțiilor concentrate în urma separării apei prin solidificare.

VITEZA DE CONGELARE caracterizează modul de avansare a frontului de cristale de gheață, de la suprafața produsului spre interiorul acestuia.

$$w = d\delta/d\tau, \text{ (cm/h) sau (mm/h)}$$

unde $d\delta$ reprezintă grosimea stratului de produs congelat în timpul $d\tau$.

$$w_m = \delta_0/\tau_0, \text{ (cm/h)}$$

δ_0 - distanța cea mai mică dintre centrul termic al produsului și suprafața acestuia, în cm sau m;

τ_0 - durata congelării de la 0°C la -15°C , în ore.

Pentru calculul duratei se utilizează relația empirică:

$$\tau_0 = \tau_t / (1 + 0,01t_{mi} - 0,015(t_{mf} + 15)), \text{ (h)}$$

unde: τ_t – durată totală a congelării, h;
 τ_{mi} – temperatura medie inițială a produsului, °C;
 τ_{mf} – temperatura medie finală a produsului, °C.

În funcție de viteza medie liniară, w_m , I.I.F. recomandă următoarea clasificare a metodelor de congelare;

- -congelare lentă: $w_m=0,2$ (cm/h)
- -congelare rapidă: $w_m=0,5...3$ (cm/h)
- -congelare foarte rapidă: $w_m=5...10$ (cm/h)
- -congelare ultrarapidă: $w_m=10...100$ (cm/h)

În unele țări s-a adoptat și o altă terminologie privind metodele de congelare:

PRODUSELE CONGELATE LENT („Frozen foodstuffs“), cu o viteză de congelare de 0,1...0,5 cm/h. Metoda este folosită pentru produsele cu grosimi mari, cum ar fi: carne în carcase sau blocuri, unt sau alte grăsimi ambalate în lăzi etc.

PRODUSELE CONGELATE RAPID („Deep Frozen foodstuffs“), cu viteze medii liniare mai mari de 0,5 cm/h, respectându-se următoarele condiții:

- ❖ -traversarea zonei de formare creșterea cristalelor de gheață într-un timp cât mai scurt;
- ❖ -temperatura medie a produselor să fie mai mică de -18°C;
- ❖ -depozitarea, transportul și desfăcerea să se facă la temperaturi mai mici de -18°C;
- ❖ -produsul congelat rapid va avea ambalaj individual inert față de conținut, rezistent și impermeabil;
- ❖ -interzicerea vânzării produselor alimentare sub denumirea de „produse congelate rapid“ în cazul decongelării accidentale, chiar dacă ulterior acestea au fost recongelate.

Congelarea produselor alimentare mai depinde și alți factori: metoda de congelare, natura și mărimea produsului supus congelării, modul de ambalare, etc.

Congelarea cu azot lichid

Azotul lichid este un produs secundar obținut în fabricile de oxigen, prin separarea din aer, sau este obținut în instalații speciale de producere a azotului. Se îmbuteliază în butelii sau cisterne speciale izolate termic prin vacuum avansat în spațiul dintre pereți; presiunea fiind de 2 bari la o temperatură de -189°C. Din studiile efectuate comparativ a rezultat că azotul lichid este cel mai indicat agent criogenic pentru congelare rapidă. Aparatele de congelare cu azot pot fi cu funcționare discontinuă sau continuă.

Aparatele de congelare cu azot lichid cu funcționare discontinuă sunt realizate sub formă de dulapuri sau celule de congelare relativ mici: 100-500 kg pe oră. Un asemenea dulap cuprinde o incintă izolată termic, două distribuitoare cu duză, două ventilatoare pentru convecția forțată a vaporilor de azot, un termostat pentru reglarea temperaturii ce acționează un robinet electromagnetic montat pe conducta de azot lichid. Acest aparat are caracteristicile:

- puterea electrică instalată la motoarele celor două ventilatoare: 2,3 kW;

- suprafața ocupată pe pardoseală: 1,5 m²;
- dimensiuni de gabarit: 1,3x1,2x2,2 m;
- capacitate de congelare: 100...400 kg/h.

Produsele sunt așezate pe tăvi dispuse pe un rastel mobil, care poate fi introdus sau scos din aparat.

În Fig. 4 se prezintă căldura pe care o poate absorbi 1 litru de azot lichid.

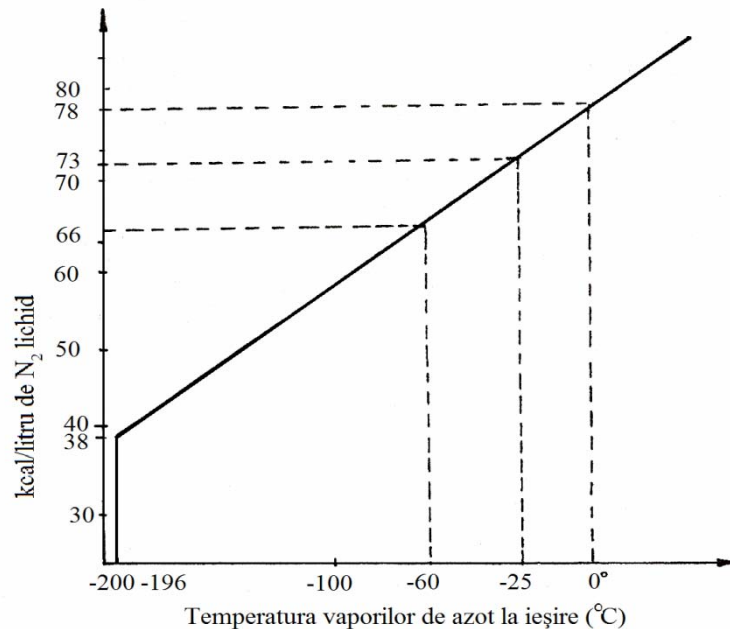


Figura 4. Căldura absorbită de un litru de N₂ lichid.

Se observă că, dacă temperatura de evacuare a vaporilor de N₂ este de -25°C, efectul frigorific aproape se dublează, față de situația când s-ar utiliza doar căldura latentă de vaporizare (73 kcal/kg față de 38 kcal/kg).

Aparatele de congelare cu azot lichid cu funcționare continuă pot fi cu imersie în azot lichid, prin pulverizare cu azot lichid sau cu răcire cu azot gazos. Cel mai utilizat procedeu este cel cu pulverizare cu azot lichid, caz în care aparatele sunt realizate cu banda în mișcare liniară sau cu bandă spirală.

Viteza benzii este reglabilă în funcție de natura produsului congelat, care trece succesiv prin trei zone: prerăcirea cu vapori, congelarea propriu-zisă prin aspersie de azot și uniformizarea temperaturii produsului.

Există numeroase tipuri de aparate criogenice: „MAGIC-FREEZE“ și „CRYO-QUICK“ (S.U.A.), „CRYOTRANSFER“ (SUEDIA), „AIR PRODUCT“ (FRANȚA), „KRIOMAT“ (GERMANIA).

În Fig.6 sunt prezentate unele tipuri de aparate criogenice. Pe o bandă aflată într-o încălț izolată circulă produsele în contracurent cu vaporii de azot, care sunt evacuați la o temperatură de aproximativ -40°C.

Acești vapori pot fi utilizați în continuare pentru răcirea unui depozit de produse congelate, apoi evacuați în atmosferă.

Transferul termic de căldură este intensificat printr-o circulație intensă a vaporilor realizată cu ventilatoare axiale.

Carcasa aparatului este executată din tablă inoxidabilă (pereți dubli, cu izolație de poliuretan sau perlită între ei), iar banda este realizată din plasă de sârmă din oțel inoxidabil.

Durata cea mai mare din cadrul procesului de răcire o reprezintă faza de prerăcire cu azot gazos: 5 ... 6 min. din durata totală de aproximativ de 9 min. În Fig. 5 sunt date variațiile temperaturilor produsului și azotului în cele trei faze ale procesului de congelare.

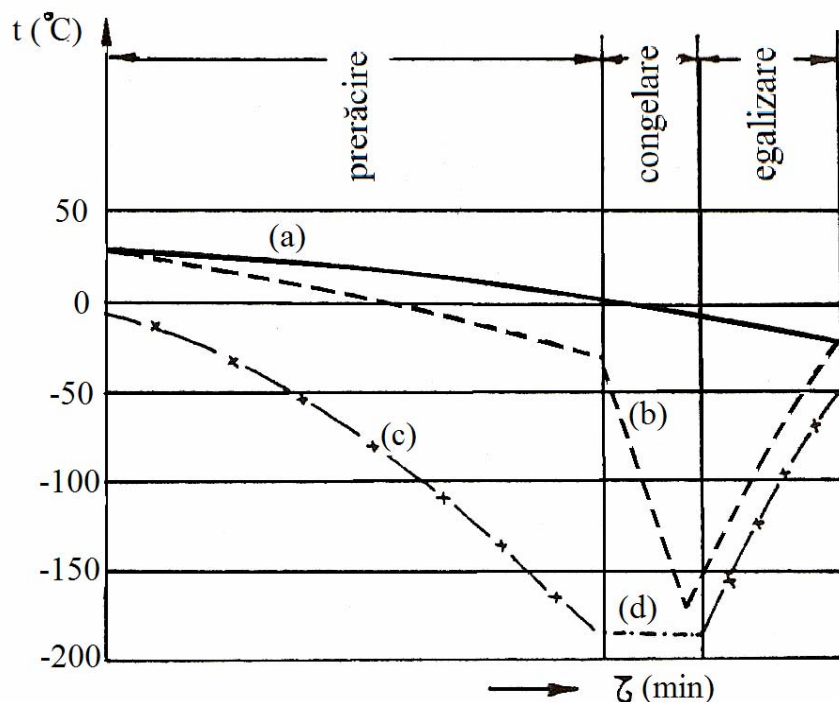


Figura 5. Variația temperaturilor în centrul produsului (a), la suprafața produsului (b), a azotului gazos (c) și a azotului lichid (d) în timpul procesului de congelare.

Consumul specific de azot lichid pentru congelarea unui kg de produs variază, în funcție de natura produsului și durata procesului, între 0,4 ... 1,5 kg N_2 . Aparatele de congelare cu bandă spirală au avantajul unor suprafețe ocupate pe pardosea mai mici, permițând congelarea unor produse de grosimi mai mari care necesită o durată de congelare mai mare și, implicit, o lungime mai mare a benzii transportoare.

De exemplu, față de 25 de m^2 de pardosea ocupată de un aparat de congelare cu bandă liniară, pentru o capacitate de 1 t/h de produse congelate, la aceeași capacitate un congelator cu bandă spirală ocupă 6 m^2 . Azotul lichid cu toate că

întreține condițiile necesare unui agent frigorific folosit pentru congelare directă, are și câteva dezavantaje specifice:

- ❖ datorită temperaturii foarte scăzute corespunzătoare presiunii atmosferice produsul capătă o crustă dură, apărând astfel tensiuni puternice în produs, care pot duce la fisurarea crustei și la degradarea produsului. Pentru produsele din carne se preferă o preambalare sub vid;
- ❖ în timpul procesului de congelare se produc pierderi importante de azot, prețul de cost al acestuia fiind relativ ridicat;
- ❖ din cauza temperaturilor scăzute, diferitele mecanisme ce compun congelatorul, sunt supuse unor condiții foarte grele de funcționare (problema ungerii mecanismelor, etc.).

Se poate folosi și aer lichid prin congelare, dar nu este complet lămurit aspectul pericolului de explozie, ca și cel al oxidării produsului în contact cu aerul (care se obține la un preț mai scăzut față de azot). Chiar dacă acest procedeu de congelare este mai scump în comparație cu altele, în unele situații se impune folosirea lui (în cazul unor capacități mici de congelare), durata optimă anuală de funcționare fiind de aproximativ 500 ore.

În Fig. 6 se prezintă schematic un congelator criogenic cu azot lichid.

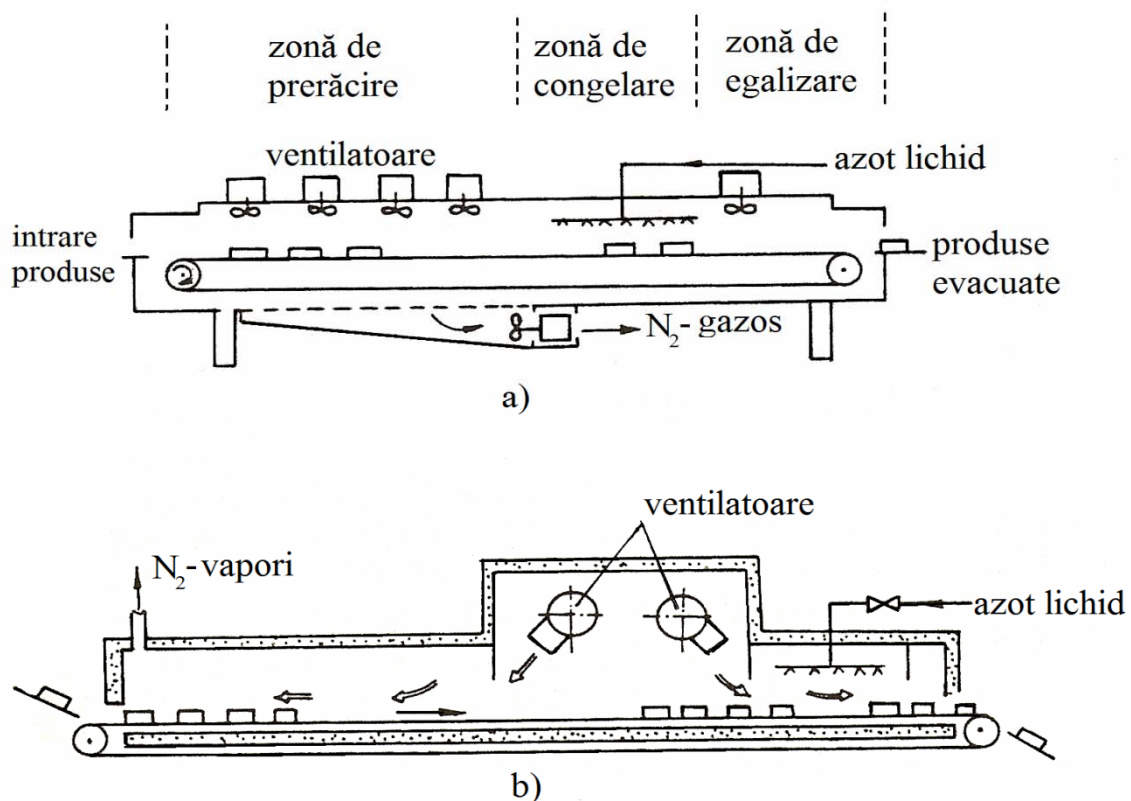


Figura 6. Congelator cu azot lichid
a) tip „MAGIC-FREEZE“; b) tip „CRYO-QUICK“

Tendențe actuale pe plan mondial privind congelarea criogenică

În comerțul internațional concurența se desfășoară mai mult la nivelul calității decât al prețurilor. După introducerea **atmosferei controlate** pentru conservarea fructelor și legumelor a urmat alt eveniment important: utilizarea congelării rapide (1945-S.U.A), așadar, **supraînghețarea** reprezintă revoluția secolului în domeniul alimentar [Site 4].

O diferență precisă între produsele congelate și produsele supraînghețate („SURGELÉES”-FRANȚA; „SURGELATE”-ITALIA) nu există.

Pentru produsele congelate rapid sunt valabile următoarele reguli:

- produsul este inițial în cea mai bună stare posibilă;
- înainte de congelare se fac tratamente specifice (pentru produse vegetale: spălare, cernere, mărunțire, decojire, opăreală);
- scăderea de temperatură în zona de cristalizare maximă (-1°C ... -5°C) se realizează cel mai rapid posibil, iar temperatura în centrul produsului este de -18°C ;
- produsul este protejat cu un ambalaj impermeabil apropiat produsului și condițiilor de folosire;
- temperatura este menținută la -18°C sau la valori inferioare (până la -30°C) pe durata conservării și transportului până la consumator, cu un minim posibil de fluctuații de temperatură.

Folosirea produselor congelate rapid explodează în manieră impresionantă în S.U.A., imediat după al doilea război mondial: 0,5 Mt de produse în 1946 și 8 Mt în 1975.

Alte țări industrializate se conformă acestui procedeu cu o întârziere de 15 ani, deci începând cu 1960. Acest aspect a dus la o creștere a capacității depozitelor la o temperatură joasă pentru produse congelate și supracongelate. Al treilea eveniment inovativ în domeniul conservării prin frig (după „atmosfera controlată” și congelarea rapidă) este studiul în domeniul biologic: fiziologia produselor și comportarea lor la frig.

Consumul de produse supraînghețate pe cap de locuitor și an a fost (în 1995):

S.U.A.	46 kg
DANEMARCA	29 kg
SUEDIA	25 kg
MAREA BRITANIE	21 kg
CANADA	18 kg
GERMANIA	18 kg
FRANȚA	15 kg (0,986 Mt de produse)
JAPONIA	8 kg
ITALIA	5 kg (4,5 în 1991)

Trebuie remarcat că produsele supracongelate prin metoda criogenică reprezintă aproximativ 8-10 % din cantitatea totală de produse congelate (8% în FRANȚA), restul fiind congelate utilizând frigul mecanic, care este încă cel mai

exploatat. Sistemele de supraînghețare criogenică utilizează energia fluidelor criogenice (N_2 sau CO_2) ca sursă de frig. Aceste sisteme au fost introduse în FRANȚA în 1966 și, la început, au fost importate din S.U.A. sau JAPONIA.

Tabelul 1

Agent criogenic	N_2	CO_2
Proprietăți		
Stare inițială		
-Temperatură	-187°C	-20°C
-Presiune absolută	2,5 bari	21 bari
-Stare de agregare	lichidă	lichidă
Detentă de presiune atmosferică		
-Temperatură	-196°C	-78,5°C
-Presiune absolută	1 bar	1 bar
-Stare de agregare	lichidă+gaz	lichidă+gaz
Căldură latentă de schimbare de fază	150,5 kJ/l N_2	267,5 kJ/l CO_2
Stare finală		
-Temperatură	0°C	0°C
-Presiune absolută	1 bar	1 bar
-Stare de agregare	gaz	gaz
Variația entalpiei între starea finală și starea inițială	309,3 kJ/l N_2	329,3 kJ/l CO_2
Procentajul de energie schimbată în timpul schimbării de fază	$(150,5/309,3)100=49\%$	$(267,5/329,3)100=81\%$

Primele tunele franceze au fost construite în 1970 de firma L'AIR LIQUIDE. În tabelul 1 sunt date, pentru comparație, proprietățile frigorifice ale celor mai utilizate fluide criogenice (N_2 și CO_2).

Sistemele criogenice de congelare utilizează deci frigul obținut prin vaporizarea azotului lichid și a CO_2 , care apoi sunt eliminate în atmosferă. Se observă din tabelul 1 că frigul dat de 1l de N_2 lichid este aproape echivalent cu frigul obținut de la 1l de CO_2 , dar modalitățile de al schimba sunt diferite:

-în cazul azotului se poate obține temperatura cea mai joasă (-196°C), iar jumătate din frig se obține la vaporizare, cealaltă jumătate se obține prin

reîncălzirea vaporilor reci (-196°C) până la temperaturi cât mai ridicate posibil (Fig. 7).

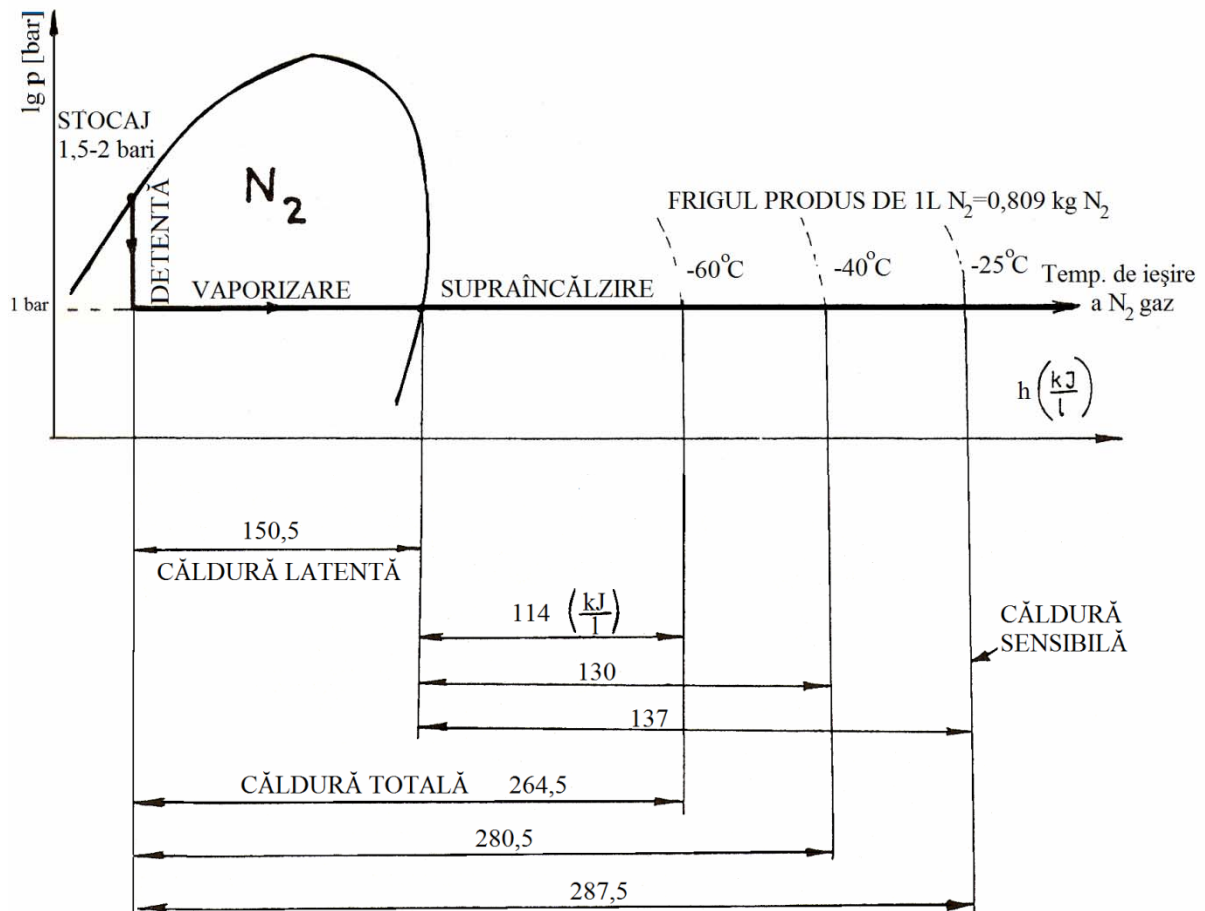


Figura 7. Diagrama lg p-h pentru N_2

Avantajele congelării criogenice sunt:

- -simplitate și economie de instalație, de exploatare și de întreținere;
- -flexibilitate pentru adaptarea capacității după nevoi;
- -înscrierea unității de supraînghețare într-o linie de congelare continuă, pentru reducerea timpului de congelare;
- -ameliorarea calității produsului;

Aplicările privilegiate ale supraînghețării cu azot lichid se clasifică în 6 categorii:

- -produse de înaltă calitate și mare valoare (creveți și languste);
- -industria patiseriei;
- -păsări;
- -**fructe roșii (fragi, afine, mure)** și produse vegetale sezoniere;
- -conopidă și ciuperci;
- -carne și preparate pe bază de carne.

Din punct de vedere al proprietăților organoleptice, s-a verificat că aparatul de congelare rapidă nu aduce un avantaj decisiv față de tunelul clasic, dar după 5-6 luni de depozitare carnea prezintă deteriorări mai pronunțate în cazul congelării lente. Pierderile în greutate totală după congelare, și fierbere descresc vizibil la viteze mari de congelare.

Congelarea lentă face să apară o culoare închisă după decongelare, iar la viteze mari de congelare apare o culoare albicioasă care necesită o ușoară reîncălzire pentru a ameliora prezentarea comercială.

Concluzii:

- prețul de cost al înghețării cu gaze lichefiate rămâne un obstacol care va depinde, prin urmare, de progresele viitorului asupra prețului de producere și distribuție a acestor fluide și de randamentul termic al aparatului;
- vitezele mari de congelare ameliorează textura și reduc pierderile în greutate;
- dintre procedee se impune aspersiona cu azot lichid;
- supraînghețarea se poate face într-un ciclu de congelare: în amonte sau aval, în funcție de scopul urmărit;
- congelarea criogenică are o investiție redusă (50% din valoarea corespunzătoare congelării „mecanice“).

Tipuri de congelatoare criogenice

Diferențele dintre tunelele cu azot și cele cu CO₂ sunt importante. Ca regulă generală, ele au întotdeauna o zonă „rece“, unde se efectuează injecția azotului lichid, și o zonă de recuperare a căldurii sensibile a gazului. Pentru o capacitate dată, lungimea zonei de recuperare a căldurii sensibile rămâne constantă, așa că lungimea zonei „rece“ poate varia în funcție modul de injecție a azotului în sistem (Fig. 8):

- imersia produsului în azot lichid: zona „rece“ de lungime foarte redusă;
- aspersiona produselor cu azot: zona „rece“ de lungime redusă;
- convecția gazoasă: zona „rece“ de lungime aproape egală cu aceea a recuperării căldurii sensibile.

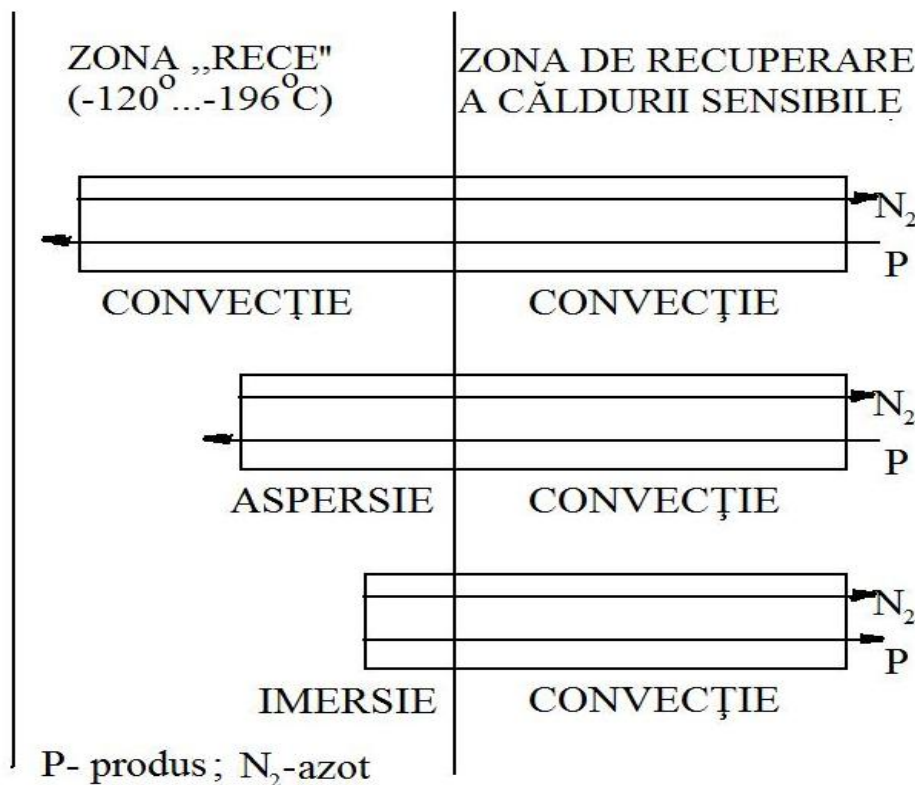


Figura 8. Tunelul cu azot lichid: principii de funcționare.

De notat că gazul (azot) și produsul (P) circulă, în general, în contracurent, în afară de cazul sistemului cu imersie. În acest caz imersia se face la capătul sistemului și se obține astfel o crustă înghețată instantaneu pentru produs.

Tunelele cu CO_2 funcționează aproape la temperatură constantă, în general cuprinsă între -60 și -70 °C.

Tunelele comercializate în EUROPA funcționează toate pe principiul convecției gazoase.

Ventilarea și injecția de CO_2 sunt realizate pentru a sublima în totalitate zăpada carbonică produsă prin detenta la presiune atmosferică.

Trebuie să se evite antrenarea zăpezii carbonice cu produsul și acumularea acesteia în tunel.

Zonele de recuperare a căldurii sensibile a CO_2 sunt scurte, chiar pot lipsi, fără a influența mult consumul de CO_2 (81% din frig se obține prin sublimare).

Având în vedere cele descrise până acum se poate spune că metoda de congelare criogenică se realizează prin procedeele prezentate în tabelul 2.

Tabelul 2. Procedee de congelare criogenica.

MOD DE PRODUCERE A FRIGULUI	SISTEM DE CONGELARE	GRAD DE MECANIZARE	TIPURI DE PROCEDEE		
			Grosimea produselor		
			mare	mijlocie	mică
FLUID CRIOGENIC (livrat de uzină și pierdut)	C R I O G E N I C	discontinuu manual		CELULE-DULAPURI: CO ₂ -N ₂	
		continuu mecanizat		CONGELATOARE RAPIDE CU BANDĂ: CO ₂ -N ₂ -aparate liniare (cu 1,2 sau 3 benzi) -aparate spirale	
		continuu mecanizat		APARATE SPECIALE -cu imersie în N ₂ +1/2 fluidizare cu CO ₂ sau N ₂ (gaze) -în amestec cu CO ₂ solid sau N ₂ lichid	

Cele mai renumite firme producătoare și distribuitoare de congelatoare criogenice sunt: SIAC („CRYOJET“), L’AIR LIQUIDE („ZIP-SAS“, „ZIP-ROL“, „ZIPFREEZE“), CAR DOX, CARBOXYQUE FRANCAISE, AGA-FRIGOSCANDIA, AIR PRODUCTS, PRODAIR, BOC, CRYOSTAR, FORMAX, LINDE, UNION CARBIDE, etc.

Congelarea rapida cu azot lichid a unor produse alimentare are o serie de avantaje, cel mai important fiind acela ca, după decongelare, produsul își păstrează calitățile inițiale.

CINETICA PROCESULUI DE CRISTALIZARE (congelare) a apei într-un produs alimentar se bazează pe apariția nucleelor de cristalizare când temperatura a atins punctul de congelare. Se deosebesc 2 situații:

a) Dacă procesul este lent (congelare lentă), nucleele de gheață sunt puține și se formează mai ales în spațiile intercelulare, formându-se o GHEAȚĂ EXTRACELULARĂ.

Apa din celule migrează, prin osmoză, către spațiile intercelulare și solidifică pe cristalele de gheață deja formate, care se măresc astfel și tind să ia o formă neregulată, unghiulară, deformând celulele și modificând structura țesuturilor.

b) Când viteza de congelare este mai mare (congelare rapidă), apar multe nuclee de cristalizare atât în spațiile intercelulare cât și în cele intracelulare, formându-se cristale de gheață mici și egal repartizate în spațiile inter și intracelulare.

În timpul congelării volumul lor crește foarte puțin față de mărimea inițială și au o formă regulată, fără asperități, așa încât structura grosieră a țesuturilor și membrana celulelor sunt mai puțin solicitate mecanic, deci mai puțin vătămate.

Conținutul celular devine opac datorită numărului mare de cristale mici de gheață, iar printre ele sunt prezente picături fine de suc celular, foarte concentrat, a cărui apă nu mai poate congela.

Din punct de vedere structural și biologic, formarea de cristale mari de gheață în timpul congelării determină, în majoritatea cazurilor, modificări ireversibile nefavorabile și a căror amploare depinde de natura celulei, rezistența membranei, conținutul de apă, etc.

Aceste modificări sunt cauzate de acțiuni mecanice ale cristalelor de gheață asupra celulelor și țesuturilor și de acțiuni fizico-chimice ale soluțiilor concentrate în urma separării apei prin solidificare.

Formarea cristalelor de gheață începe întotdeauna în spațiile intercelulare, unde punctul de congelare este mai ridicat decât în spațiile intracelulare.

În funcție de viteza de congelare și de temperatura finală a produsului congelat, formarea cristalelor se poate limita la spațiile intercelulare (în cazul congelării lente), sau să se extindă și la spațiile intracelulare (în cazul congelării rapide)(Fig. 9).

Volumul cristalelor de gheață fiind mai mare decât al apei din care au provenit, apar tensiuni locale care afectează structura celulei prin dislocări mecanice, deformări și chiar perforarea membranei, în funcție de mărimea cristalelor, grosimea acestora depinzând de viteza de congelare și de natura produsului ($1 \div 500 \mu\text{m}$).

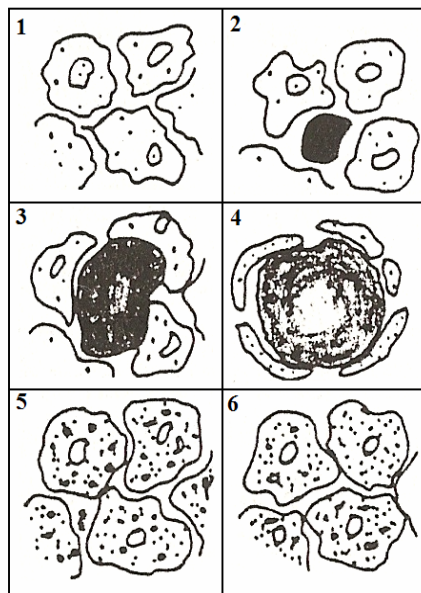


Figura 9. Formarea și dezvoltarea cristalelor de gheață în țesuturi: 1 - celule fără cristale de gheață; 2,3,4 - formarea cristalelor de gheață extracelulare la congelarea lentă; 5,6 – formarea cristalelor de gheață extra- și intracelulare la congelarea rapidă (după O. Fennema).

La **CONGELAREA LENTĂ**, unde predomină cristalizarea intercelulară, tensiunile locale cauzate de cristalele mari și neuniforme determină deformarea țesuturilor, dislocarea și perforarea pereților celulari.

Datorită diferenței de presiune osmotică creată, suc concentrat din interiorul celulei migrează în spațiul intercelular, deshidratând astfel celula.

Acest „șoc osmotic“ are un rol determinant în vătămarea și moartea celulelor, iar la decongelare apar pierderi mari de suc, scurgerea acestuia făcându-se din rețeaua continuă de canale a spațiilor intercelulare .

La **CONGELAREA RAPIDĂ**, unde predomină cristalizarea intracelulară, se formează o structură microcristalină uniformă, repartizată atât în spațiile intercelulare cât și în cele intracelulare, ceea ce determină tensiuni locale mult mai slabe și diferențe de presiuni osmotice mult mai mici, având ca efect modificări structurale ale țesuturilor, mai puțin vătămătoare.

La decongelare pierderile de suc sunt mai reduse, o mare parte din apă aflându-se în celule împreună cu elemente din care s-a separat, membrana celulelor nefiind perforată.

Pentru majoritatea produselor alimentare conservate prin congelare, pierderile de suc celular rezultate la decongelare constituie un indicator negativ de calitate, fenomenul ducând la pierderea fermității produsului, a gustului și chiar a aromei.

La **căpșuni**, de exemplu, pierderile de suc celular sub 5% fac ca produsul congelat să poată fi comparat cu cel proaspăt; la pierderi de suc de 5-8% produsul finit are o calitate acceptabilă, dar la pierderi de suc de 20% și mai mult produsul devine practic nevandabil.

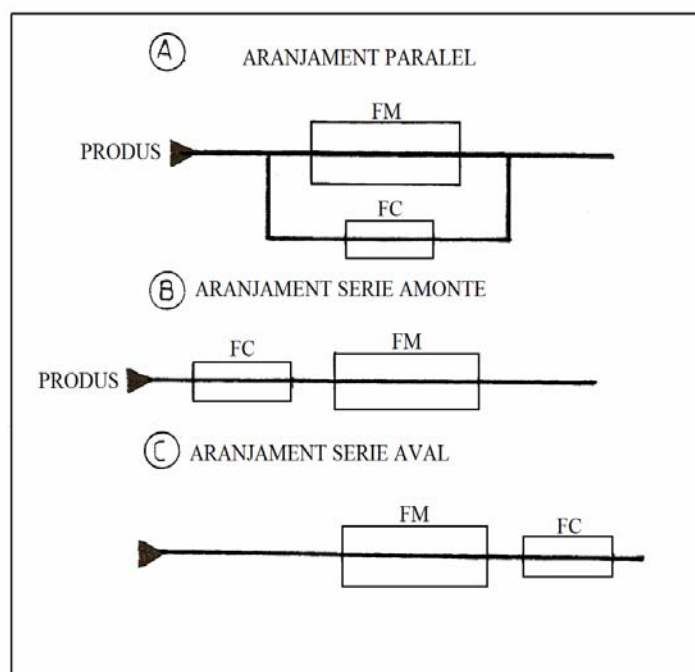


Figura 10. Tendințe de cuplare a frigului mecanic (FM) cu frigul criogenic (FC).

Din documentații [2] rezulta 3 tendințe de cuplare a frigului mecanic (FM) cu frigul criogenic (FC), pentru congelarea produselor alimentare, astfel (Fig. 10):

A – Aranjament paralel: Acest sistem se aplică în cazul fructelor și legumelor, congelate în pat fluidizat (FM), iar FC utilizează azotul lichid sau CO₂ lichid.

Astfel se permite mărirea producției sezoniere și numeroasele aplicații care au fost făcute într-un deceniu au arătat că soluția este viabilă atât în plan tehnic, cât și în plan economic.

B – Aranjament serie amonte: În acest caz se tratează produse fragile (**fructe de pădure**, cazul temei proiectului de cercetare), mai întâi cu FC, pentru realizarea unei cruste de protecție, apoi cu FM (Fig. 12).

Este evident că produsul criogenic consumat pentru „blindajul” produselor este în cantitate mai mică, comparativ cu tratarea criogenică completă și este proporțional cu grosimea stratului de „blindaj”.

Această durificare a stratului exterior ameliorează și calitățile gustative prin: blocarea aromelor, reducerea tensiunii vaporilor de apă și limitarea pierderilor în greutate.

Pentru sistemul FM, care primește produsul pretrat, se reduce perioada de degivrare a bateriilor de răcire și, prin reducerea timpului de congelare, apare o ușoară creștere a debitului nominal.

Trebuie remarcat că acest mod de cuplare dintre FM și FC se face esențial pentru ameliorarea calității produsului și nu pentru creșterea productivității.

C - Aranjament serie aval: Debitul nominal (D_n) de produse congelate corespunde la o producție de maximă și la o putere frigorifică maximă.

Scopul principal este adesea de a crește debitul de produse congelate, în ciuda unui timp de congelare mai mare, dar utilizând la maximum puterea frigorifică (Fig. 13 și Fig. 14).

Singura soluție la care s-ar putea recurge ar fi creșterea stratului de produs de pe bandă, având drept consecință directă o reducere a debitului de aer, o absență a fluidizării și o deteriorare fatală a calității produsului finit. Dar pentru un timp de trecere de 50% din timpul total (pentru un tunel cu o singură bandă) se extrage 70% din căderea totală de entalpie a produsului, restul de 30% se extrage pe a doua jumătate a parcursului. Împărțind la 2 timpul de trecere τ_t și dublând debitul D_g (dublând viteza benzii), capacitatea orară a tunelului va fi:

$$C=2D_g\tau_t/(2 \times 60)$$

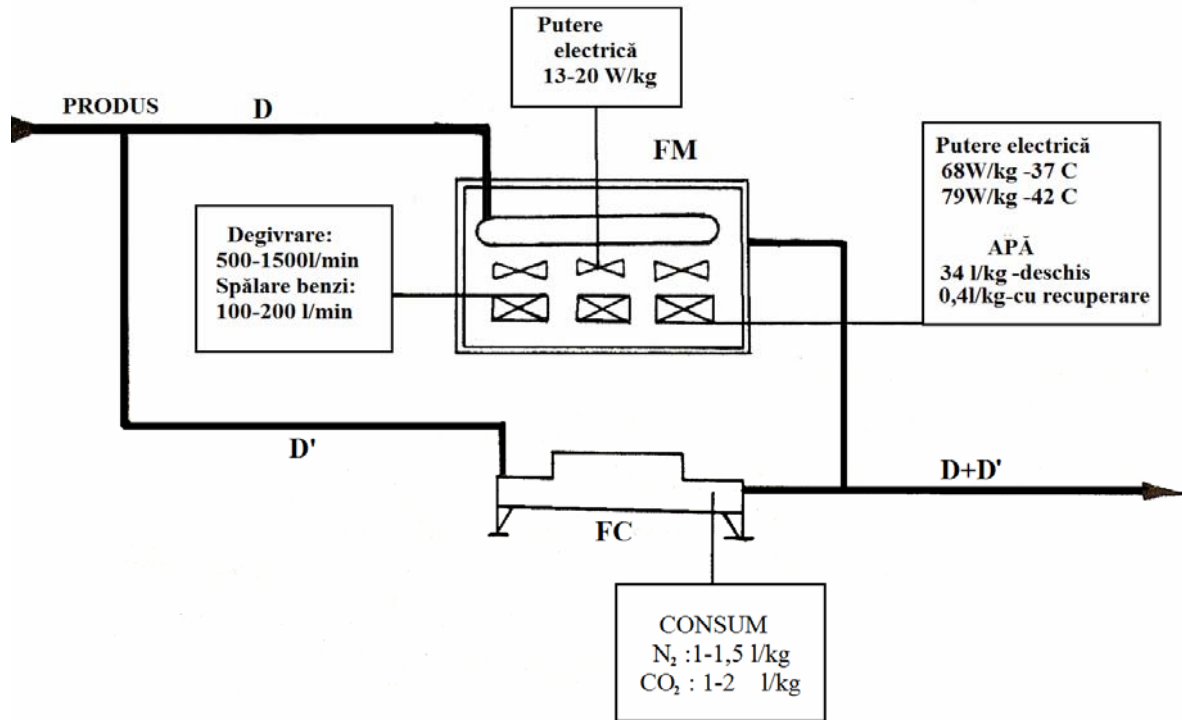


Figura 11. FM în paralel cu FC (CREȘTEREA CAPACITĂȚII).

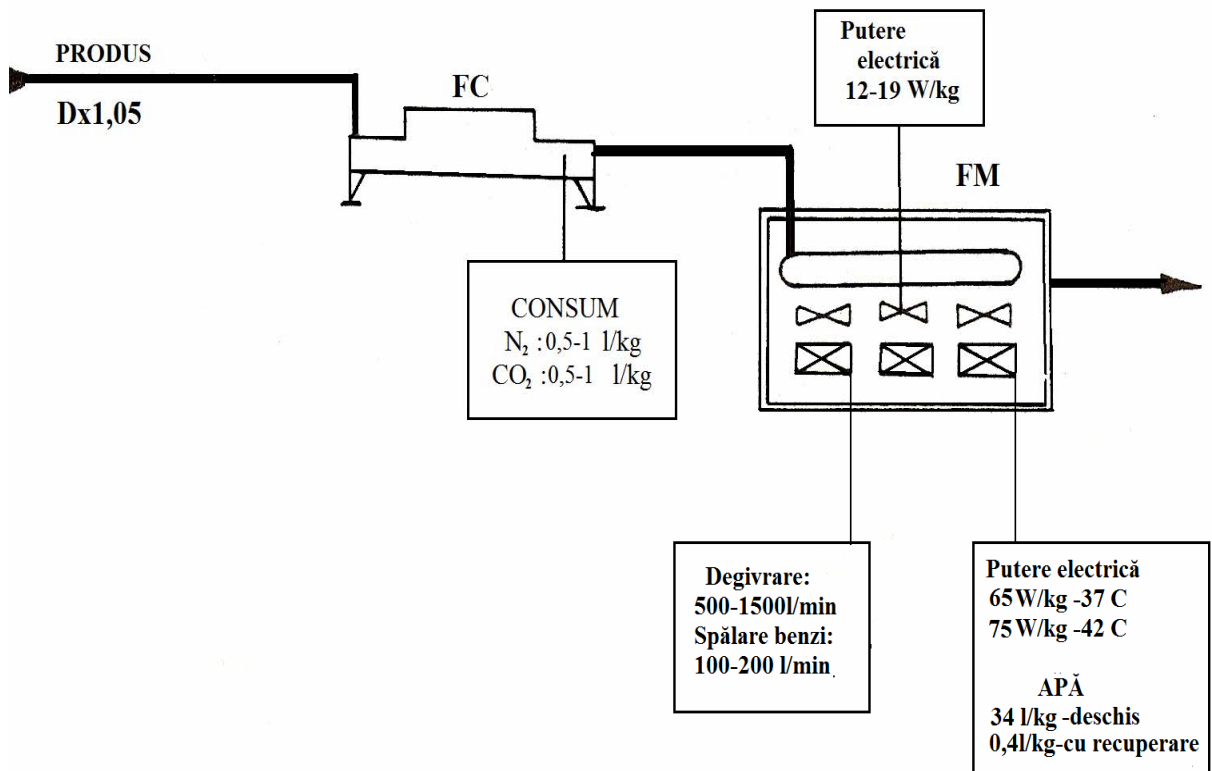


Figura 12. FC în amonte de FM (CREȘTEREA CALITĂȚII).

Puterea frigorifică va fi (pentru produs):

$$P_p = 0,7 \Delta h 2D_g = 1,4 \Delta h D_g$$

Prin urmare, se poate utiliza în procesul de congelare un sistem FC a cărei putere frigorifică va fi:

$$P'_p = 0,3 \Delta h 2D_g = 0,6 \Delta h D_g$$

Acest procedeu se poate aplica și pentru fabricarea înghețatei, etapele fiind următoarele:

-melanjul cu ingrediente ce indică în fabricarea cremei de stocat la $+4^\circ\text{C}$ în vederea maturării;

-precongelarea se face în congelator de tip continuu, unde se insuflă aer pentru a se realiza îmbogățirea produsului ($-3^\circ\text{C} \dots -7^\circ\text{C}$);

-punerea în forme în vederea solidificării (-18°C), aceasta putându-se face într-un tunel criogenic, sau într-un tunel cu aer, sau cu un aparat răcit cu saramură (în cazul batoanelor de înghețată).

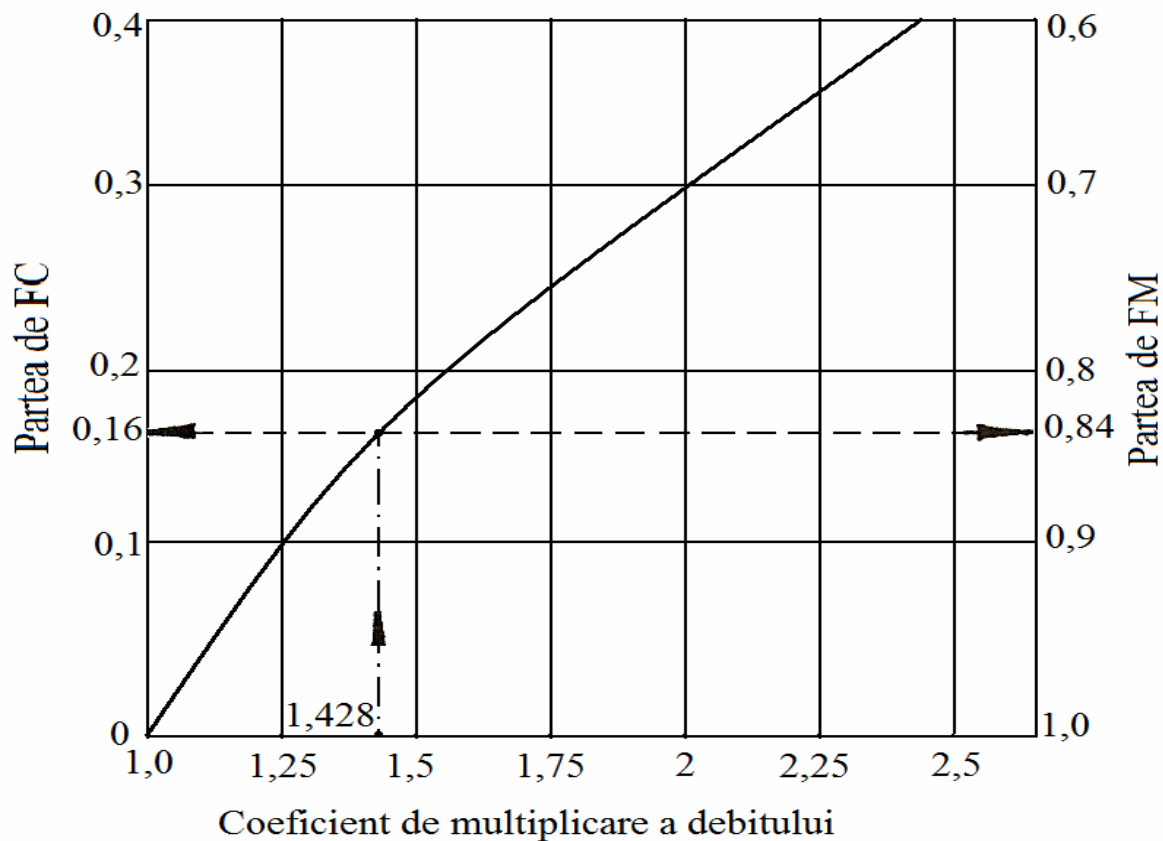


Figura 13. FC în aval de FM (exemplu de calcul).

FC în aval de FM (exemplu de calcul, Fig. 13 și Fig. 14).

-Debitul nominal: $4200 \text{ kg/h} = D_n$;

-Puterea frigorifică corespunzătoare: 520 kW ;

-Capacitatea dorită: $6000\text{kg/h} \Rightarrow$ coeficient $6000/4200=1,428$

Partea de FM= 0,84; Partea de FC=0,16

FM $P_p=520 \times 1,428 \times 0,84=624\text{kW}$

$P_{\text{ventil}}=120\text{kW}$

$P_{\text{totala}}=744\text{kW} < P_N=760\text{kW}$

FC $P_c=520 \times 1,428 \times 0,16=119\text{kW}$

Furnizată de un echipament cu N_2 sau CO_2 .

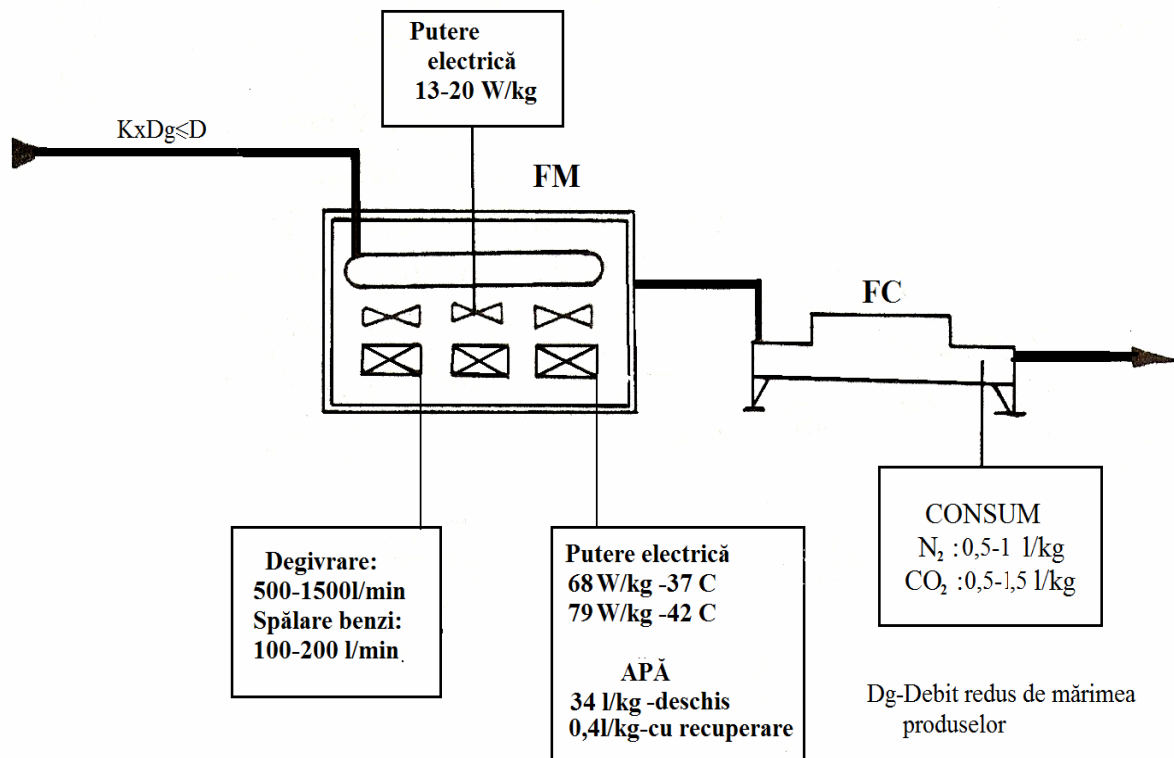


Figura 14. FC în aval de FM (CREȘTEREA CAPACITĂȚII)

Concluzii

Acest scurt studiu face să apară posibilități de cuplare ale celor două procedee care, considerate individual, acoperă utilizări câteodată foarte diferite și care foarte adesea nu sunt concurente. Prin cuplarea procedeelelor se rezolvă două probleme:

-creșterea capacității de congelare (FM în paralel cu FC și FC în aval de FM). Costul de producție este superior celui ce va fi obținut într-un tunel cu frig mecanic adaptat la capacitate maximă;

-ameliorarea calității (FC în amonte de FM) produselor fragile. Trebuie realizat un studiu pentru a se putea stabili modul de alegere a procedeelelor de congelare în funcție de starea produsului.

Particularități privind congelarea fructelor

Viteza de congelare

Controlul vitezei de congelare este un factor important care poate influența reducerea deteriorării celulelor ce duce la pierderi importante ale calității fructelor congelate. Se au în vedere 3 tipuri de deteriorări ale celulelor [17]:

- deteriorări datorate substanței dizolvate
- deteriorări osmotice
- deteriorări structurale

Deși deteriorările datorate substanței dizolvate apar atât în cazul proceselor de congelare lentă cât și rapidă, ele pot fi caracterizate printr-o viteză mică de congelare. Deteriorările osmotice și cele structurale depind de viteza de congelare (Fig. 15).

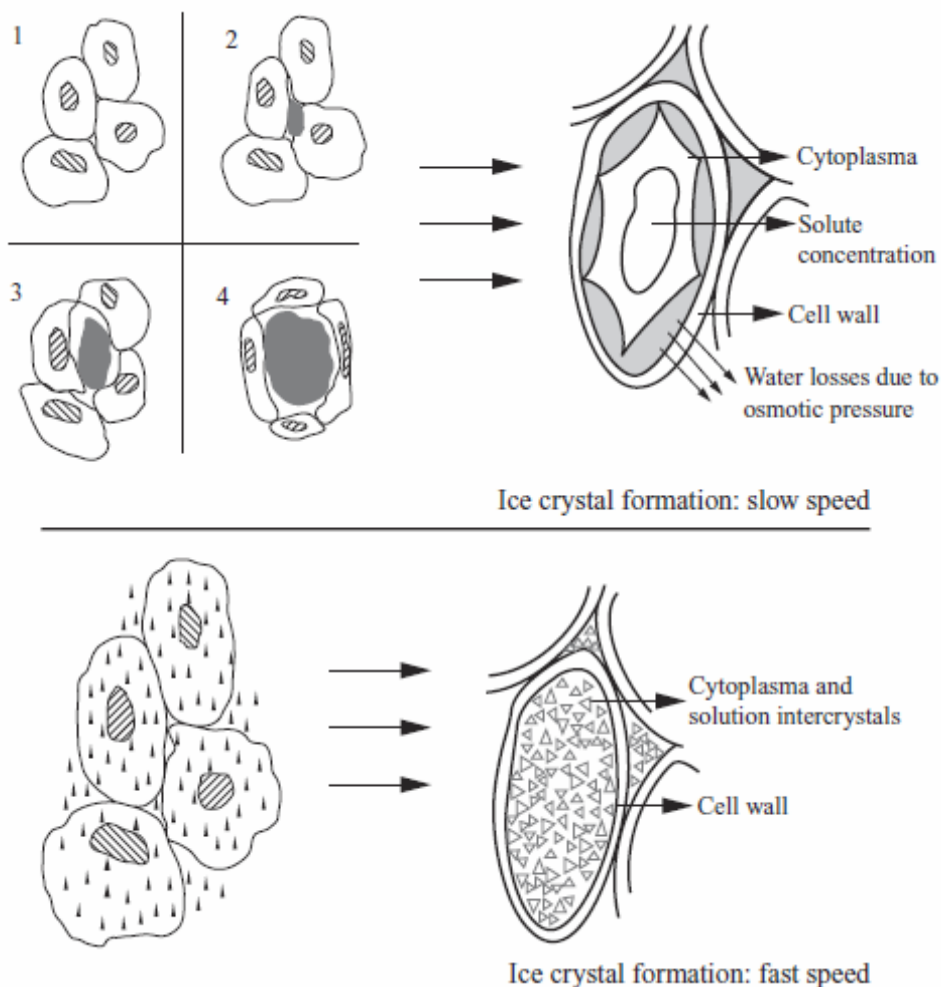


Figura 15. Formarea cristalelor de gheață în țesuturile vegetale la viteză de congelare mică (sus) și mare (jos).

Viteza de congelare reprezintă viteza cu care frontul de congelare se deplasează din exteriorul produsului spre interior și depinde de sistemul de congelare folosit („frig mecanic” sau „frig criogenic”), temperatura inițială a produsului, forma și

dimensiunile produsului precum și de tipul acestuia. În funcție de viteză, procesul de congelare poate fi clasificat astfel (IIR - International Institute of Refrigeration, 1986):

- lent, 1 cm/h
- semirapid, 1...5 cm/h
- rapid, 5...10 cm/h
- foarte rapid, 10 cm/h.

Factori care afectează calitatea produselor congelate

Congelarea fructelor încetinește dar nu oprește complet reacțiile fizice, chimice și biochimice care produc deteriorarea lor. Produsele suferă modificări lente și progresive ale calităților senzoriale și nutriționale pe durata depozitării, modificări care devin perceptibile după o anumită perioadă de timp. Produse sigure și de înaltă calitate, cu valori nutriționale maxime, pot fi obținute dacă se menține un control permanent pe toată durata procesului. Acestea includ: controlul temperaturii, calitate ridicată pe durata de depozitare, siguranță microbiologică, precum și păstrarea nutrienților.

Controlul calității și siguranței produselor alimentare congelate este dominat de 2 principii: factorii produs - prelucrare - ambalare (product-process-package: PPP), și factorii timp - temperatură - toleranță (time-temperature-tolerance: TTT). Factorii PPP trebuie avuți în vedere încă de la începutul producerii fructelor congelate și ei reprezintă bazele succesului comercial al produsului. Ei sunt după cum urmează:

- Produsul: Produsele congelate de înaltă calitate necesită materie primă și ingrediente de înaltă calitate
- Prelucrarea: Viteza și eficiența congelării și folosirea unor procese suplimentare (opărire, etc.)
- Ambalarea: oferă produselor protecție fizică și chimică.

Factorii TTT păstrează calitatea și siguranța în timpul depozitării. Conceptul TTT se referă la relația dintre temperatura de depozitare și durata de păstrare. Pentru alimente diferite există mecanisme diferite care guvernează viteza de degradare a calității, iar modul cel mai sigur de determinare al duratei de păstrare este de a depozita produsele pe termen lung la temperaturi diferite. Relația dintre TTT estimează efectele modificării sau variației de temperatură asupra duratei de păstrare. Produse congelate sigure, de înaltă calitate, cu valori nutriționale maxime pot fi obținute dacă sunt respectate următoarele indicații:

- alegerea unor produse care se pretează congelării
- factorii PPP
- cunoașterea efectului congelării, depozitării și decongelării asupra țesuturilor fructelor care produc modificări fizice, chimice și biochimice
- stabilitatea fructelor congelate
- decongelarea

- calitatea microbiologică și siguranța produselor congelate.

Perspective de viitor

Iradierea. Iradierea ionizantă a fost folosită ca o metodă sigură și eficientă pentru eliminarea bacteriilor patogene din diferite alimente precum și pentru dezinfectarea fructelor, legumelor și sucurilor. A fost studiată aplicarea unei doze reduse de radiație (< 3 kGy) asupra unui număr de produse vegetale congelate în scopul eliminării patogenilor umani. Cantitatea de radiație ionizantă necesară pentru a reduce populația de bacterii crește odată cu descreșterea temperaturii.

Creșterea presiunii. Starea fizică a produselor poate fi schimbată prin modificarea externă a presiunii și temperaturii conform diagramei de fază a apei. Principalul avantaj al congelării la presiune ridicată este acela că la reducerea bruscă a presiunii se obține o suprarăcire ridicată care are drept rezultat o viteză mare de nucleație care face ca formarea inițială a gheții să fie instantanee și omogenă în întreg volumul. Folosirea presiunii ridicate favorizează suprarăcirea, contribuie la o nucleație și la o creștere rapidă și uniformă a gheții, producându-se astfel cristale de gheață de dimensiuni mici care duc la o îmbunătățire semnificativă a calității produsului.

Dezghetarea la presiune ridicată. Dezghetarea se desfășoară mult mai lent decât congelarea. În timpul dezghetării se pot produce atât deteriorări fizice și chimice, cât și contaminarea cu microorganisme, care pot reduce calitatea produsului. Din punct de vedere al texturii, o dezghetare incorectă poate duce la o înmuierea excesivă a țesutului vegetal. O dezghetare rapidă la temperatură scăzută, pentru a evita creșterea temperaturii, poate ajuta la asigurarea calității produsului. Studii recente au arătat că dezghetarea la presiune ridicată asigură păstrarea calității (texturii) produsului și reduce timpul necesar dezghetării.

Fructele de pădure

Afinele (coacăzele negre)

Afinele sunt plante perene care rodesc peste 30 de ani [17]. Condițiile ideale pentru cultivarea lor sunt reprezentate de: sol nisipos, bogat în compuși organici, pH de 4,5...5,0 și un nivel al apei subterane freatice de 0,5...1 m, necesar pentru a asigura umiditatea în sezonul de creștere. Afinele încep să rodească după 3...4 ani de creștere, dar ajung la întregul lor potențial roditor în 6...8 ani. Deoarece coacerea nu este uniformă, recoltarea lor se face de 2 până la 5 ori pe sezon.

În tabelele 3-5 se prezintă producția de diferite fructe de pădure în câteva țări din lume.

Tabelul 3 Producția de afine (tone) a principalelor țări producătoare din lume -
Sursa: FAO (2007):

	Țara	1999	2000	2001	2002	2003
1.	Statele Unite	110.859	134.446	121.745	115.480	122.380
2.	Canada	63.794	59.035	67.708	64.861	78.608
3.	Polonia	20.500	21.500	30.000	16.400	16.500
4.	Ucraina	0	5.500	3.000	5.000	5.000
5.	Olanda	3.800	3.800	3.800	4.000	4.000
6.	România	5.000	4.000	3.000	2.500	2.500
7.	Lituania	3.000	3.000	2.000	1.600	2.000
8.	Italia	1.647	1.896	1.880	1.811	1.800
9.	Noua Zeelandă	1.100	1.740	1.750	1.750	1.750
10.	Franța	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	Total	212.920	238.537	238.703	217.272	238.358

Există 3 soiuri de afine: cu tufiș înalt (de cultură), ochi de iepure, și cu tufiș jos (sălbatic). Majoritatea afinelor sălbatice produse sunt folosite în formă prelucrată; din contră, puțin peste 40% din afinele cultivate sunt consumate proaspete, iar restul sunt prelucrate.

Afinele sunt congelate la grămadă sau individual, proces care asigură păstrarea atât a prospețimii cât și a nutrienților. Afinele prelucrate sunt folosite ca ingrediente pentru produse de panificație, produse lactate și alimente semipreparate. Afinele uscate sunt folosite ca ingrediente pentru pungile sau batoanele de cereale. Afinele pot fi folosite și pentru producerea de gemuri, jeleuri, siropuri, sucuri, concentrate și multe alte tipuri de gustări.

Calități nutriționale și fizico-chimice: Brix, aciditate și zaharuri

Spre deosebire de alte fructe, aceste fructe mici și delicatese nu necesită coajire sau tăiere înaintea folosirii. Afinele sunt ușor dulci și nu acrișoare precum merișoarele, căpșunile sau zmeura.

Afinele de cultură au cca. 12...17,5 °Brix (raportul masic de zahăr dizolvat în apă) iar aciditatea titrabilă este de 0.8...1%. Afinele sălbatice au în medie aciditate mai scăzută (0.4...0.7%) decât cele cultivate, iar valorile sunt de 7...14°. Atât afinele cultivate cât și cele sălbatice conțin îndeosebi glucoză și fructoză.

Afinele au arome fructate și florale datorită esterilor, acetatului de etil, 3-izopropil-butirat-ului, cât și altor compuși aromați.

Culoarea albastră este dată de pigmenții de antocianină. Spre deosebire de struguri, la care nivelele mai ridicate de antioxidanți se găsesc în sămburi datorită taninurilor, la afine, majoritatea antioxidanți se găsesc în pielea. Mai mult chiar, țesuturile frunzelor au o concentrație mai mare de fenoli decât cele ale fructelor.

Coacăzele și aghișele

Coacăzele și aghișele sunt plante sub formă de arbuști care cresc bine în climatele reci. Spre deosebire de aghișe, care au țepi moi, coacăzele nu au țepi deloc. Coacăzele cresc sub formă de ciorchini și pot fi roșii, negre, roz sau albe. Aghișele sunt de obicei roșu aprins. În tabelele 4 și 5 este data producția acestor fructe în unele țări producătoare.

Tabelul 4. Producția de coacăze (tone) a principalelor țări producătoare din lume.

Sursa: FAO (2007).

	Țara	1999	2000	2001	2002	2003
1.	Federația Rusă	206.000	220.000	203.000	228.000	222.000
2.	Polonia	153.353	146.780	175.300	157.434	192.475
3.	Germania	155.400	158.300	148.100	148.000	148.000
4.	Austria	19.537	22.861	19.072	19.581	18.342
5.	Anglia	8.400	12.300	15.400	12.900	18.800
6.	Ucraina	14.594	19.887	19.372	16.500	17.000
7.	Republica Cehă	22.792	18.089	16.597	13.487	13.472
8.	Ungaria	12.304	11.848	12.194	8.138	12.000
9.	Franța	8.364	8.382	8.604	9.191	9.145
10.	Danemarca	5.000	4.000	3.500	3.500	3.500
	Total	633.809	650.900	650.543	645.543	687.806

Tabelul 5. Producția de aghișe (tone) a principalelor țări din lume.

Sursa: FAO (2007).

	Țara	1999	2000	2001	2002	2003
1.	Germania	84.800	88.200	90.300	90.100	90.100
2.	Federația Rusă	38.000	35.000	30.000	50.000	42.000
3.	Polonia	31.463	28.514	29.622	21.738	20.345
4.	Ucraina	4.500	8.900	8.000	7.500	7.000
5.	Republica Cehă	8.350	6.824	4.816	4.091	4.046
6.	Ungaria	4.641	4.649	3.683	4.000	4.000
7.	Austria	1.668	1.815	1.800	1.800	1.800
8.	Anglia	1.700	1.500	1.380	1.580	1.610
	Total	177.031	177.629	171.622	182.557	172.553

Formarea microstructurii în timpul solidificării

Forța motrice globală a solidificării este un ansamblu complex de factori termodinamici și de transfer de masă care predomină în diferite părți ale procesului. Creșterea cristalelor tinde să fie paralelă și opusă direcției de transfer de căldură și, prin urmare, dacă se impune un transfer de căldură unidirecțional, se pot forma dendrite sub formă de degete (Fig. 16).

În cazul congelării unidirecționale, principala formă de cristal este dendrita. În cazul răcirii direcționale se pot forma structuri asemănătoare celor celulare.

Oricum, anizotropia proprietăților legate de transferul de căldură și masă favorizează celulele dendritice și dezvoltarea dendritică. Formarea unei dendrite începe prin ruperea interfeței plane solid-lichid.

Vârfurile dendritice resping substanța dizolvată în toate direcțiile, și prin urmare, în spațiile dintre dendrite se acumulează substanța dizolvată respinsă, favorizând formarea de dendrite de tip celulă. Dacă condițiile o permit, ulterior se formează ramuri secundare.

Deplasarea frontului de congelare depinde de transferul de căldură și masă. În timpul răcirii unidirecționale, transferul de căldură tinde să fie mai rapid decât cel de masă, datorită conductivității termice ridicate a gheții și a coeficienților de difuzie masică reduși. Prin urmare, factorul limitator al creșterii va fi difuzia substanței dizolvate, iar în zona vârfurilor se va observa o subrăcire.

Această suprarăcire este cunoscută sub numele de subrăcire constitutivă (*constitutional undercooling*) și a fost folosită pentru modela distanța primară între dendrite, adică distanța dintre vârfurile a 2 dendrite.

În general, toate modelele au în comun relația care face legătura dintre distanța interdendritică și cinetica congelării: distanța medie inter-dendritică este proporțională cu produsul dintre viteza frontului de congelare și gradientul de temperatura dintre frontul de gheață și peretele solid, fiecare dintre acestea ridicate la o putere constantă.

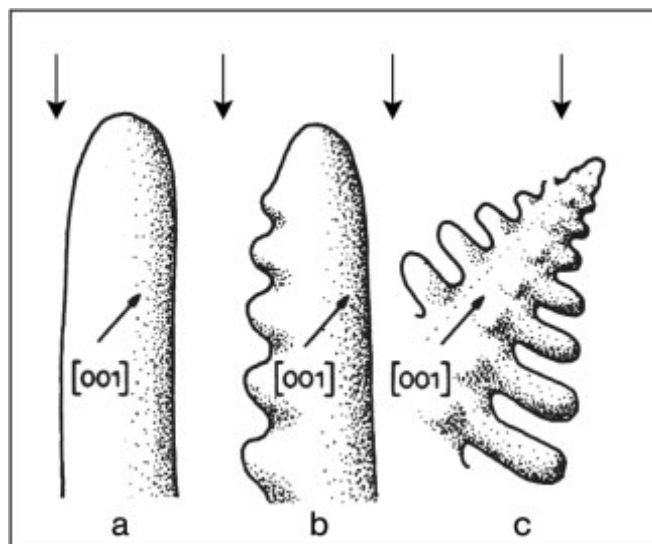


Figura 16. Diferite forme ale cristalelor de gheață: (a) celulă în cazul înghețării unidirecționale, (b) celulă dendritică, (c) dendrită.

Caracteristicile congelatoarelor firmei KELOX-Spania

Firma **KELOX** [site 2] produce tunele de congelare de tip **ZIP FREEZE**, utilizate și pentru congelarea criogenica cu azot lichid a fructelor de padure (Fig. 17).



Figura 17. Tunel de congelare de tip ZIP FREEZE.

Un tunel este format dintr-o carcasă izolatoare, executată din poliester alimentar, prin care trece o bandă transportoare din oțel inox care transportă produsul care va congelat dintr-un capăt în altul al tunelului.

Congelarea ultra rapidă se obține prin pulverizarea benzii transportoare cu un lichid criogenic care poate fi: azot lichid (la $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$) sau CO_2 (la $-65\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Astfel, produsul intră în tunel la temperatura ambiantă și iese complet congelat. Produsele care pot fi congelate într-un astfel de tunel criogenic sunt variate și, în funcție de acestea, tipul și dimensiunile benzii transportoare pot varia (Tab. 7).

Tabelul 7. Caracteristici ale tunelurilor de tip ZIP FREEZE - Kelox

Tip	ZF 60 x 6	ZF 75 x 9	ZF 90 x 12	ZF 110 x 12
DIMENSIUNI (mm.):				
În funcțiune				
Lungime	6.600	8.500	10.000	12.000
Lățime	1.500	1.800	2.100	2.100
Înălțime	1.800	1.900	1.900	1.900
La curățare				
Lungime	7.400	9.500	11.000	12.800
Înălțime	2.240	2.400	2.400	2.400
Zona de congelare				
Lungime	6.000	7.500	9.000	11.000
Lățime utilă	600	900	1.200	1.200
Înălțime utilă	250	280	280	280
Înălțimea zonei de încărcare	900-1.000	1.000-1.100	1.000-1.100	1.000-1.100
DATE ELECTRICE:				
Putere (kW)	6	7,4	9,4	10,5
Tensiune de alimentare (V)	380 III + PE	380 III + PE	380 III + PE	380 III + PE
Intensitate (A)	16	20	25	28,15
Frecvență (Hz)	50/60	50/60	50/60	50/60
Clasa de protecție (IP)	IP 55	IP 55	IP 55	IP 55
DIVERSE				
Greutate aprox. (kg)	1000	1500	2000	2500
Capacitate de congelare (kg/h)	200	400	650	800
Durata Min./Max (min)	2'la 25'	3'la 30'	3'la 35'	4'la 40'

Principii de funcționare

În aceste tuneluri congelarea se obține prin pulverizarea produsului cu un fluid criogenic. Debitul de fluid este întotdeauna proporțional cu cantitatea de produs care va fi congelat. La intrarea produsului în tunel, în **zona I de refrigerare**, are loc un transfer intens de căldură între fluidul criogenic și produs, a cărui suprafață se refrigerază în contact cu vaporii de fluid criogenic.

În continuare, în **zona II de congelare propriu-zisă**, produsul este stropit direct cu fluidul criogenic care îl congelează și în interior.

După aceasta, în **zona III de egalizare**, temperaturile din produs se echilibrează datorită circulației forțate a vaporilor reci de către ventilatoare.

La intrarea în tunel, fluidul criogenic se află în stare lichidă. Atunci când este pulverizat, datorită variației de presiune și diferenței de temperatură, el trece rapid în stare gazoasă, și este trimis de ventilatoare către produs.

Densitatea vaporilor descrește pe măsură ce acestea își pierd capacitatea calorică, facilitând acumularea lor în partea superioară a camerei de congelare. Folosind un sistem de extracție amplasat în exteriorul tunelului, acești vapori sunt redirecționați către intrarea produsului și apoi evacuați.

Atât forma tunelului cât și sistemul de distribuție a fluidului criogenic și elementele de ventilare au fost calculate pentru a obține o eficiență maximă a fluidului.

Camera de congelare

Camera de congelare constă într-o carcasă în formă de U întors și un postament (șasiu, soclu) pe care se sprijină carcasa pe întreaga ei lungime. Între postament și carcasă există o garnitură de silicon acoperită cu o țesătură de tip Akron, care etanșează și izolează camera atunci când tunelul este în funcțiune. Pereții camerei, atât cei ai carcasei cât și cei ai postamentului, sunt confecționați din poliester armat, umplut cu spumă de poliester. În vederea accesului în interiorul camerei, carcasa poate fi ridicată de pe postament prin intermediul unui sistem hidraulic.

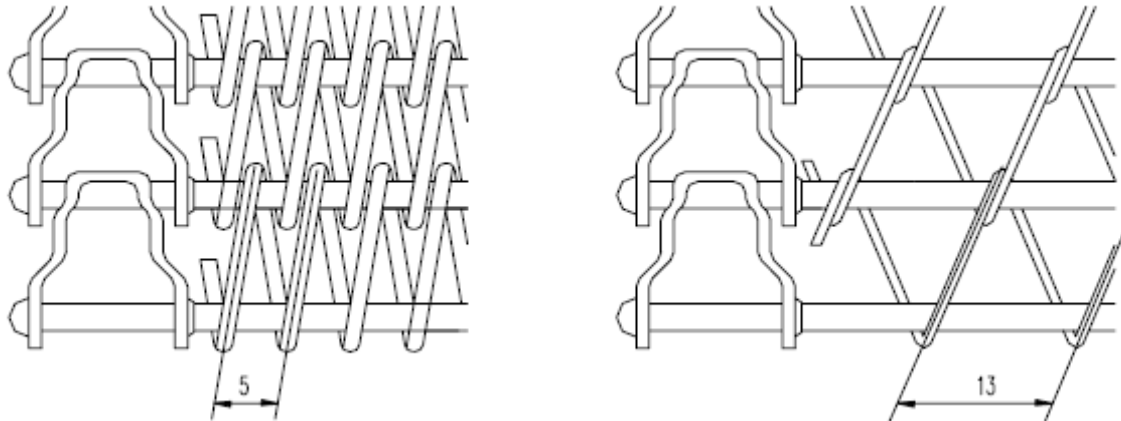
Banda transportoare



Banda transportoare este confecționată în întregime din oțel inox și constă dintr-un covor sau o plasă pe care sunt așezate produsele care vor fi congelate și două lanțuri de antrenare dispuse în lateral. Banda este antrenată de către un arbore amplasat la ieșirea produselor, prin intermediul unui angrenaj cu roți dințate care transmit mișcarea lanțurilor de antrenare ale benzii.

Mișcarea sistemului descris mai sus provine de la un sistem motor-reductor printr-un lanț cu role. Motorul este fixat de carcasa tunelului. Viteza benzii poate fi variată cu ajutorul unui potențiomtru amplasat pe panoul de control. Arborii care

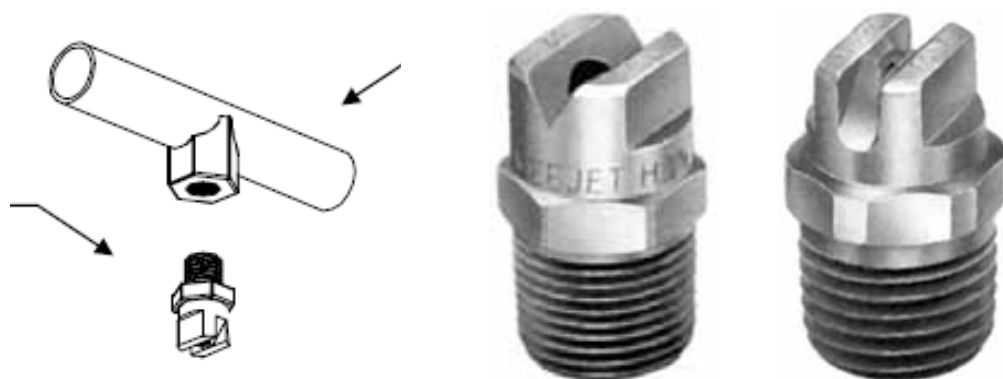
produc deplasarea benzii sunt prevăzuți pe lungimea lor cu un set de role de sprijin pentru a împiedica ca banda să se sprijine pe arbore doar la extremitățile acestuia. Pentru a împiedica banda să se deplaseze lateral, arborele de la intrarea produselor este prevăzut cu două role laterale de ghidare. În scopul de a asigura o tensiune corectă în banda transportoare în timpul funcționării, tunelul este echipat cu un sistem de întindere automată care menține constantă rigiditatea benzii indiferent de dilatațiile sau contracțiile datorate variațiilor de temperatură. În figura de mai jos se observă cele două tipuri de plasă (deasă sau rară) care poate fi folosită, în funcție de tipul produselor care vor fi congelate.

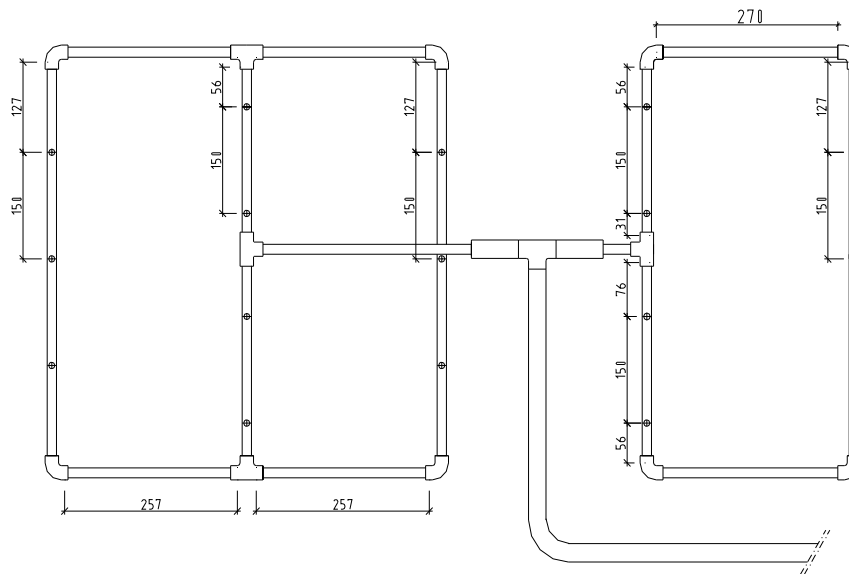


Sistemul de injecție a azotului lichid

Acesta este format dintr-un sistem de țevi fixate de carcasă, prevăzute cu duze (injectoare) - a căror număr, dispunere și orientare depinde de model - distribuite uniform în zona de congelare, cu scopul de a pulveriza azotul lichid pe bandă cât mai uniform.

Țevile sunt din oțel inox (de ex. AISI 304) cu diametrul de 14-18 mm, iar injectoarele sunt din alamă (de ex. Veejet H-VV 1/8") cu racorduri de conectare de la 1/8" la 1/2", debite de până la 3.9 l/min la presiunea de 3 bar și unghiuri de dispersie de la 15° la 110°.





Ventilația

Pentru ventilare se folosesc ventilatoare cu diametrul de 400 mm, cu palete din poliester armat și turația de 1500 r.p.m., antrenate de motoare electrice de 0.55 kW fixate de tavanul carcasei. Sensul de rotație și dispunerea lor depinde de modelul tunelului.

Evacuare vaporilor de azot

Tunelul trebuie echipat cu un sistem de evacuare conectat la o hotă amplasată la intrarea produsului, care are o tubulatură de ieșire cu diametrul de 200 mm.

Conexiunea dintre extractor și tunel se face printr-o conductă rigidă. Lungimea și geometria acestei conducte rezultă în urma studierii amplasării tunelului și a poziției gurii de extracție și a sistemului disponibil pentru evacuarea vaporilor. Sistemul de control este reglat astfel încât, în cazul defectării sistemului de extracție, pulverizarea azotului este oprită automat.

În general, sistemul de evacuare trebuie amplasat în exterior, departe de tunel, pentru a evita, pe cât posibil, zgomotul. Deși puterea de extracție este constantă, cantitatea de azot extrasă efectiv poate fi variată printr-o trapă de by-pass amplasată în hotă; astfel poate fi reglat amestecul de aer/azot aspirat de sistemul de extracție.

Debitul maxim care poate fi aspirat este evident mult mai mare decât cantitatea de azot care trebuie extrasă, și astfel, această trapă de reglare trebuie lăsată întotdeauna deschisă pentru a se evita aspirarea de prea mulți vapori din tunel.

Reglarea temperaturii

Aceasta se face cu ajutorul unui regulator de temperatura care primește un semnal de la un sondă de tip PT100 amplasată în zona de pulverizare. Acest regulator asigură injecția cantității de azot necesare pentru atingerea și menținerea temperaturii impuse. Semnalul primit de regulator de la sonda de temperatură este

folosit pentru comanda robinetelor simple sau proporționale al căror rol este de a regla cantitatea de azot care intră în tunel.



Panoul de comandă

Toate dispozitivele de comandă și elementele de indicare sunt centralizate pe panoul de comandă, cu excepția butoanelor pentru oprire de urgență care se află de-a lungul carcasei.

Tendințe actuale

Piața de produse congelate este în continuă dezvoltare și este caracterizată de cicluri de viață tot mai scurte ale produselor, având drept consecință o schimbare tot mai rapidă a numărului și tipului de produse noi. Dacă perioada de recuperare a investițiilor de capital depășește durata de viață a produsului, atunci apare un risc comercial semnificativ, exceptând cazul în care echipamentul este suficient de flexibil pentru a se adapta la noi produse.

În cazul azotului, 48% din capacitatea frigorifică totală este reprezentată de căldură latentă de schimbare de fază, iar restul de 52% îl reprezintă căldura sensibilă a vaporilor, care, din acest motiv, sunt recirculați în tunel în scopul de a utiliza la maxim capacitatea frigorifică. Comparativ cu CO₂, consumul de azot este mai redus, dar pierderile la depozitare sunt mai mari.

În ceea ce privește construcția acestor tunele, s-au conceput diverse soluții constructive pentru a îmbunătăți și mai mult performanțele acestora. Printre acestea se numără și construcția în care ventilatoarele sunt plasate sub banda transportoare pentru a produce vârtejuri de vapori care duc la dublarea productivității, reduc consumul de azot cu 20% și reduc nivelul de deshidratare (deja scăzut) cu 60%.

Avantajele congelării criogenice

- pot fi integrate ușor în liniile de producție deja existente
- costuri de investiție /închiriere reduse
- instalare și punere în funcțiune ușoare
- congelare flexibilă și eficientă

- productivitate ridicată
- produse de calitate criogenică ridicată
- întreținerea acestor utilaje este practic nulă, iar operațiile recomandate se referă la curățirea înainte și după funcționare
- pierderi de masă prin deshidratare mai mici (0.5% față de 1.0...8.0% la tunelele de congelare cu convecție forțată a aerului)
- congelare rapidă (coeficienți superficiali de transfer de căldură de cca. 1500 W/m²-K, față de max. 500 W/m²-K la congelare prin imersiune - cea mai rapidă dintre toate celelalte metode)
- excluderea oxigenului în timpul congelării (lipsa oxidării)
- pornire rapidă și lipsă timpi morți pentru decongelare.

Principalul **dezavantaj** îl reprezintă costul relativ ridicat al fluidului criogenic.

Calculul timpului de congelare

Procesul de congelare al unui produs alimentar este un proces tipic nestationar de transfer de caldura și masa. Fenomenele de transfer termic sunt complexe datorita schimbarii de faza prin solidificarea apei și a modificarii unor proprietati termo-fizice ale produsului (conductivitate termica, caldura specifica, densitate, etc.).

Metodele de calcul folosite au la baza o serie de ipoteze simplificatoare care permit stabilirea unor relații simple pentru calculul duratei de congelare (dupa Planck): întreaga cantitate de caldura este preluata la temperatura punctului de congelare, produsele sunt omogene și izotrope, mediul de racire are o temperatura constanta, produsul a fost racit in prealabil pana la temperatura de congelare.

Pentru un produs de forma sferica, asa cum vor fi considerate fructele de padure, durata congelarii propriu-zise se calculeaza cu formula lui Planck:

$$\tau_{cg} = \frac{\rho \cdot l_{cg}}{t_{cg} - t_{mII}} \cdot \left(\frac{r_0^2}{6 \cdot \lambda} + \frac{r_0}{3 \cdot \alpha} \right) [s] \quad (1)$$

unde:

- r_0 (m)- raza sferei;
- l_{cg} (kJ/kg) - caldura latentă de congelare (solidificare) a produsului;
- ρ (kg/m³) - densitatea produsului;
- t_{cg} - temperatura de congelare;
- t_{mII} (°C) - temperatura mediului de racire (zona II);
- α (W/m²K) - coeficient de convecție;
- λ (W/mK) - conductivitatea termică a produsului;

Durata totala a procesului de congelare este:

$$\tau_c = \tau_r + \tau_{cg} + \tau_{sr} \quad (2)$$

unde: τ_r [s] – durata refrigerării prealabile;
 τ_{cg} [s] – durata congelarii propriu-zise;
 τ_{sr} [s] – durata subracirii produsului.

Durata de racire prealabila se calculeaza cu relatia:

$$\tau_r = \frac{m \cdot c}{\alpha \cdot s} \cdot \ln \frac{t_i - t_{mI}}{t_f - t_{mI}} \quad (3)$$

in care:

- $m = \rho \cdot V$ [kg] – masa produsului;
- $V = \frac{4 \cdot \pi \cdot r_0^3}{3}$ [m³]-volumul produsului;
- c (kJ/kg) - caldura specifica a produsului;
- α (W/m²K) - coeficient de convecție;
- s (m²)- suprafata exterioara a produsului;
- t_i (°C) - temperatura initiala a produsului;
- t_f (°C) - temperatura finala a produsului;
- t_{mI} (°C) - temperatura mediului de racire(zona I).

Durata subracirii produsului congelat pana la temperatura medie finala(t_{mf}) se calculeaza cu relatia lui Planck:

$$\tau_{sr} = 933 \cdot c_m \cdot n \cdot \left| \lg \frac{t_{cg} - t_{mIII}}{t_{cf} - t_{mIII}} - 0,0913 \right| \cdot \left(\frac{2 \cdot r_0}{\alpha} + \frac{r_0^2}{\lambda} \right) \cdot \frac{1}{3,6} \text{ [h]} \quad (4)$$

in care:

- c_m (kJ/kgK) - caldura specifica medie a produsului congelat;
- n - coeficient adimensional a carui valoare depinde de criteriul Biot;
- t_{cg} (°C)- temperatura la sfarsit de congelare;
- t_{mII} (°C)- temperatura mediului de racire(zona II);
- t_{mIII} (°C)- temperatura mediului de racire(zona III).

Prin modernizarea congelatorului existent in Hala Frigotehnie a **Catedrei de Sisteme termice și ingineria mediului** se vor putea realiza cercetările propuse in Contractul de cercetare.

b) Amenajarea (parțială) Laboratorului pentru determinări fizico-chimice (pentru fructe înainte și după congelare/decongelare)

Acest laborator este amenajat in Hala FRIGOTEHNIE, unde este amplasat și congelatorul criogenic și va permite determinari de: temperatura, substante solubile, umiditate, aciditate totala, vitamina C, pigmenti antocianici, **analiza microscopica a fructelor congelate/decongelate, pentru a se putea masura la microscop marimea cristalelor de gheata, verificandu-se daca aceste cristale sunt mai mici decat celulele fructelor**, astfel ca membrana acestora nu va fi strapunsa și deci la decongelare nu se pierde sucul fructelor.

In aceasta etapa(2009) au fost achizitionate : stative, cilindri gradati, pipete, pahare, biurete, buloane cotate, pâlnii, sticle de ceas, fiole, eprubete, cleme, triunghi de sarma, mojar cu smalt, pistil pentru mojar, pahare.

Dupa congelarea criogenica cu azot lichid a fructelor de padure și analize de laborator pentru: zmeura, afine, mure și catina, in functie de perioada optima de culegere, urmarindu-se masurarea unor marimi fizice și calcularea altora, și anume:

- -temperatura in diverse puncte ale produsului congelat;
- -timpul de congelare;
- -temperatura vaporilor de azot de-a lungul tunelului de congelare;
- -se vor analiza proprietatile organoleptice ale fructelor înainte și dupa congelare/decongelare;
- -analiza microscopica a fructelor congelate/decongelate ;
- -evaluarea formarii cristalelor de gheata.

Aspecte privind analiza produselor horticole înainte și după congelare

Materia primă: fructe de pădure

Având in vedere costurile de producție (frigul tehnologic, construcții, etc.) în realizarea produselor congelate se va folosi cea mai buna materie primă, numai astfel obținându-se rezultate cu eficiență economică.

În fond, conservarea prin congelare nu este decât un procedeu de a menține pe o perioadă mai îndelungată și în cea mai mare măsură, calitățile inițiale ale unei materii prime în stare proaspătă la maturitatea de consum.

Pentru produsele congelate, calitatea materiei prime se referă la următoarele aspecte principale:

-calitatea sanitară, care se caracterizează prin gradul de prospețime, curățenie, încărcătură microbiană;

-calitatea nutritiv-energetică, ce se definește prin bogăția materiei prime în principii biodinamice, indispensabile vieții, cum ar fi, vitaminele (vitamina C, în special, principala sursă naturală fiind doar fructele și legumele).

Acizi, elemente oligodinamice minerale etc., precum și potențialul caloric (glucidele) sunt surse ce dau valoarea nutritivă și energetică a produselor horticoale.

-calitatea organoleptic-comercială, care se referă la gust, aromă, consistență și la aspectul materiei prime. Ca și calitățile sanitar-nutritive, aceasta este strâns legată de natura, starea de prospețime a acesteia, calitatea comercială putând fi influențată pozitiv de modul de prezentare și condiționare a produselor.

Pentru caracterizarea anatomo-morfologică și fizico-chimică a materiei prime horticoale, respectiv fructe de pădure, se vor folosi următoarele metode generale:

1. DETERMINAREA PROPRIETĂȚILOR ORGANOLEPTICE ALE LEGUMELOR ȘI FRUCTELOR

Noțiunea de calitate pentru legume și fructe are un caracter complex și dinamic, fiind în funcție de destinația pe care o are produsul: consum imediat în stare proaspătă, industrializare, depozitare pentru păstrare îndelungată etc.

Pentru aprecierea calității legumelor și fructelor se folosesc diferite criterii specifice fiecărui produs și care scot în evidență caracteristicile cele mai importante după care se stabilește valoarea calitativă a acestuia: autenticitatea soiului, uniformitatea, forma, mărimea, culoarea, aspectul pieluței, starea de prospețime, prezența sau absența pedunculului, starea de sănătate și curățenie, gradul de maturare, culoarea și fermitatea pulpei, consistența și succulența acesteia, gustul, aroma precum și defectele interioare. Aceste caracteristici sunt prevăzute în standarde, norme interne, caiete de sarcini etc., care sunt în continuă îmbunătățire ca urmare a perfecționării tehnologiilor de producție, introducerii de noi soiuri și hibrizi, diversificării modului de valorificare.

Examinarea și verificarea produselor în vederea stabilirii calității se face pe o probă de laborator, urmărind caracteristicile următoare:

- a. Autenticitatea soiului se referă la omogenitatea lotului din punctul de vedere a originalității soiului și se stabilește pe baza proprietăților fizice și senzoriale: mărime, culoare, formă, gust, aromă, aspectul pieluței etc.
- b. Uniformitatea de soi se stabilește ca proporție de legume sau fructe corespunzătoare caracteristicilor de bază ale soiului din lotul respectiv comparativ cu totalul produselor apreciate.
- c. Pedunculul și caliciul

Se apreciază pozitiv:

- pentru căpșuni și fructele de pădure- fructele cu pedunculi subțiri sau potrivit de groși cu caliciul mic sau mijlociu, superficial așezat în pulpă, ușor detașabil și fără partea vascularizată a receptaculului.

d. Forma se apreciază vizual prin comparație cu: mostre de referință, planșe, mulaje etc.

f. Culoarea și aspectul pielitei sau al cojii (netezimea, asprimea, luciul, zbârciturile, crăpăturile etc.) se apreciază vizual, pe cât posibil la lumina naturală. În general, se cere ca pielea să fie curată, lucioasă, fără crăpături, netedă, fără zbârcituri sau lovituri, fără urme de substanțe insecto-fungicide, iar culoarea să fie uniformă și specifică soiului.

Se apreciază pozitiv:

- pentru căpșuni - fructele intens și viu colorate, cu pielea roșie, cărămizie sau închis portocalie, de toate nuanțele, uniform sau aproape uniform colorate pe toată suprafața (se acceptă diferențe mici de culoare între partea umbră și cea însorită a fructelor), inclusiv vârful lor și cu luciu foarte dezvoltat.

g. Caracterul suprafeței

Se apreciază pozitiv:

- pentru piersici - fructele cu pielea glabră sau slab catifelată și a căror pubescență se înlătură ușor prin frecare;
- pentru căpșuni - fructele cu suprafață slab pubescentă și cu nucule (semințe) mici, rare sau superficial îngropate în pulpă.

Se apreciază negativ:

- pentru caise și piersici - fructele cu pubescență dezvoltată ca și cele a căror pubescență nu se înlătură sau se îndepărtează greu prin frecare.
- pentru căpșuni - fructele cu pubescență pronunțată și cu nucule mari, numeroase sau adânc îngropate în pulpă.

h. Starea de prospețime se apreciază organoleptic, după gradul de turgescență și după aspectul viu al fructului sau legumei.

i. Starea de sănătate și curățenie se examinează cu ochiul liber sau cu ajutorul lupei, stabilindu-se procentul de fructe sau de legume atacate de boli și dăunători, a celor murdare, a celor cu urme de substanțe antiparazitare, în care caz toxicitatea lor se determină prin analize de laborator.

j. Gradul de maturitate se determină după culoarea pielitei, după consistența pulpei, după gust și aromă etc.

k. Consistența pulpei se apreciază prin palparea a 10 - 20 fructe sau legume, eventual și prin degustare. La fructe se consideră ca însușiri pozitive: pulpa compactă, cu consistență fermă sau mijlocie, crocantă, fondantă, untoasă, fină, lipsită de celule pietroase și pete de sticlozitate sau cu celule pietroase puține și fine (la pere și gutui), pietroasă (la cireșe), lipsită de fibre sau cu fibrozitate redusă (la piersici), lipsită de goluri sau cu goluri mici în interior (la căpșuni).

l. Culoarea pulpei se apreciază vizual, pe 5 - 10 fructe sau legume, îndată ce au fost secționare.

Se apreciază pozitiv:

- pentru căpșuni - pulpa de culoare roz sau roșie de toate nuanțele, cu condiția de a fi uniform colorată sau cu inima fructului doar puțin mai deschisă la culoare față de restul pulpei.

m. Culoarea sucului

Se apreciază pozitiv:

- culoarea roșie a sucului de vișine și de cireșe amare și cu atât mai mult, cu cât ea este mai intensă. Sucul incolor al cireșelor dulci constituie un factor pozitiv.

n. Gustul se apreciază organoleptic pe 5 - 10 fructe sau legume.

La fructe se apreciază pozitiv:

- pentru căpșuni - gustul dulce, dulce-acidulat sau acrișor-dulce, echilibrat, expresiv și plăcut.

Se apreciază negativ:

- pentru căpșuni - gusturile lipsite de expresivitate, fade, apoase, neechilibrate, acide sau prea acide.

o. Aroma se apreciază prin degustarea a 5 - 10 fructe sau legume. Se apreciază pozitiv: pulpa cu aromă bine pronunțată sau fină, plăcută; iar ca însușiri negative: pulpa slab aromatizată, cu miros de iarbă sau cu miros străin, neplăcut, nespecific soiului.

2. CARACTERIZAREA MORFOLOGICA A FRUCTELOR

Fructele tuturor plantelor pomicele prezintă numeroase elemente caracteristice după care se pot recunoaște soiurile. De aceea, în descrierile pomologice, *fructului* - considerat ca obiect de studiu pomologic - i se acordă foarte mare importanță. În acest scop se iau în considerație atât caracterele morfologice exterioare, cât și cele interioare.

La fructele speciilor semințoase (mere, pere și gutui) se studiază următoarele *caractere exterioare*: mărimea, forma, caracterul suprafeței, culoarea fructului, pedunculul, cavitatea pedunculară, caliciul, cavitatea calicială, pielița, pruina, rugina și punctele de sub pieliță.

Mărimea fructelor se definește prin diametrul mare și înălțimea, precum și prin greutatea lor. Acest caracter variază foarte mult de la un soi la altul și chiar în cadrul aceluiași soi: merii și perii altoiți pe portaltoi vegetativi produc de obicei fructe mai mari decât cei altoiți pe pădureț. Pe pomii tineri întotdeauna fructele sunt mai mari decât pe cei mai în vârstă. De asemenea, în condiții nefavorabile de

climă, sol și agrotehnică, fructele rămân mai mici față de mărimea normală pentru soiul în cauză.

Dintre *caracterele morfologice interioare*, la determinarea soiurilor se iau în considerație: *inima*, la care mărimea, forma și locul de așezare variază de la un soi la altul; *fasciculele vasculare*, care delimitează inima și care, de asemenea, variază în ceea ce privește grosimea, culoarea și structura; *lojile*, la care se iau în considerație: forma, dimensiunile, precum și culoarea pereților; *camera axială*, la care se iau în seamă mărimea și gradul de deschidere a ei .

3. ANALIZA MATERIEI PRIME HORTICOLE

Pentru analizarea fructelor și legumelor se vor executa următoarele determinări:

- extractul refractometric;
- aciditatea;
- substanțele pectice;
- inactivarea peroxidazei;
- dozarea vitaminei C.

4. DETERMINAREA SUBSTANȚEI USCATE TOTALE PRIN USCARE LA ETUVĂ. METODA GRAVIMETRICĂ

Principiul metodei

Metoda se bazează pe scăderea în greutate a probei până la masă constantă, datorită evaporării apei prin încălzire în etuvă la temperatură moderată - până la 105°C la presiune atmosferică și 70°C la presiune redusă. Se folosește pentru analiza conservelor de fructe și legume, fructe și legume uscate, în afară de sucurile de fructe, struguri și fructe de pădure.

Materiale necesare:

- etuvă termoreglabilă;
- balanță analitică;
- fiole de sticlă sau de aluminiu cu capace cu diametrul și înălțimea de 50...55 mm;
- exicator;
- nisip de cuarț curățat;
- clește pentru fiole;
- baghetă de sticlă (lungimea corespunde înălțimii fiolei);
- mojar cu pistil.

5. DETERMINAREA SUBSTANTELOR SOLUBILE (EXTRACTULUI SEC SOLUBIL) PRIN METODA REFRACTOMETRICĂ

Prezenta lucrare se referă la determinarea prin metoda refractometrică a substanțelor solubile din siropuri, sucuri de fructe, compoturi, dulcețuri și gemuri, bulion și pastă de tomate, produse congelate sau deshidratate etc.

Principiul metodei

Se determină indicele de refracție la temperatura de 20°C și din valoarea acestuia se deduce conținutul de substanțe solubile exprimat în zaharoză, cu ajutorul unui tabel de conversiune.

Prin *substanțe solubile* se înțelege concentrația exprimată în procente de masă, a unei soluții apoase de zaharoză, care are același indice de refracție ca al produsului de analizat, în condițiile determinării.

Aparatură

Refractometru prevăzut cu scară gradată în valori ale indicilor de refracție cu precizie de $\pm 0,0002$ sau refractometru prevăzut și cu scară gradată în procente de zaharoză, cu precizie de 0,1%

Refractometrul va fi prevăzut cu termoregulator sau cu dispozitiv de circulare a apei la $20^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$.

Produse congelate

După decongelarea probei și eliminarea sâmburilor și a casei semințelor, se amestecă produsul cu lichidul provenit de la decongelare și se operează după indicațiile metodei de analiza.

6. DETERMINAREA ACIDITĂȚII TOTALE

Metodele de analiză prezentate se referă la determinarea acidității titrabile și a acidității volatile din produsele de legume și fructe (conserve de legume și fructe, pastă de tomate, legume și fructe murate, legume și fructe congelate, sucuri și siropuri de fructe etc.), la determinarea acidității volatile din produsele de fructe conservate cu dioxid de sulf (sucuri, pulpe, marcuri de fructe etc.) și la determinarea acidității volatile din produsele conservate cu acid benzoic (pastă de tomate etc.).

Determinarea **acidității titrabile** se face prin metoda titrimetrică.

Determinarea **acidității volatile** se face prin metoda antrenării cu vapori.

7. DETERMINAREA VITAMINEI C (ACIDUL ASCORBIC)

Prezenta lucrare stabilește metoda de determinare a conținutului de vitamină C (acidul ascorbic) din produsele de legume și fructe.

Determinarea conținutului de vitamină C se face prin metoda titrimetrică cu 2,6 diclorfenolindofenol.

8. DETERMINAREA IMPURITĂȚILOR MINERALE

Prezenta metodă de analiză se referă la determinarea impurităților minerale grele (nisip, pământ, fragmente metalice sau alte fragmente minerale cu densitate mare) din produse de legume și fructe, bulion și pastă de tomate, marcuri și pulpe de fructe, compoturi, legume și fructe deshidratate etc.

9. DETERMINAREA PIGMENTILOR ANTOCIANICI

Principiul metodei:

Aceasta constă în extragerea pigmentilor antocianici din fructe cu soluție acidulată alcoolică și măsurarea absorbției la lungimea de undă specifică antocianului respectiv.

În acest scop sunt necesari următorii reactivi:

-alcool etilic 70%

-soluție tampon de HCl și KCl.

Antocianii constituie o grupă specială de flavonoide întâlnite în regnul vegetal.

Preocupările legate de culoarea și coloranții antocianici prezenți și în fructele de pădure, s-au concretizat în lucrarea: *Description of the Elder Tree Fruit Concentrates*.

Bibliografie

1. Nazrul I. Shaikh, Vittal Prabhu - *Mathematical modeling and simulation of cryogenic tunnel freezers* - Harold and Inge Marcus Department of Industrial and Manufacturing Engineering, The Pennsylvania State University, University Park, PA 16802, United States, 7 September 2006, *Journal of Food Engineering*.
2. Damian V., Vasilescu C.- *Congelarea criogenică a produselor din carne*, Ed. Evrika Brăila, 1997, ISBN. 973-97854-5-X.
3. Porneală S., Porneala C.- *Procese in instalații frigorifice și pompe de caldura*, vol I, Ed. Fundatiei Universitare Dunarea de Jos -Galati, 2004.
4. Porneală S. – *Tehnica frigului și climatizării în Industria Alimentară*, Ed. Fund. Univ. Dunărea de Jos -Galati, 2000.
5. Bansal, P, K., Dutto, T. and Hivet, B. (1992). *Performance evaluation of environmentally benign refrigerants in heat pump*, International Journal of Refrigeration, 15:6, 340-348.
6. Beermann, K. and Kruse, H. (1992). *Experiences with the refrigerant R-134a as a "drop-in" replacement in a large water-water heat pump*, Proceedings of the 1992 International Refrigeration Conference - Energy Efficiency and New Refrigerants, 14-17 July 1992, Purdue University, West Lafayette, Indiana, Vol. I, pp. 211-219.
7. Cecchini, C. and Marchal, D. (1992). *A simulation model of refrigerating and air-conditioning equipment based on experimental data*, ASHRAE Transactions, 97, part 2, 388-393.
8. Domanski P. and Didion, D. (1983). *Computer modelling of the vapour compression cycle with constant flow area expansion device*, NBS Building Science Series 155, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD.
9. CHO S.H., SUNDERLAND J. E. *Phase Change of Spherical bodies* – Int.J. Heat Mass Transfer Vol. 13, 1231-1233 , 1970.
10. DUMITRASCU GH., HORBANIUC B. – *Model numeric pentru o transformare de faza lichid-solid neizoterma*, Galati, 1993
11. THOMAS L.J., WESTWATER J.W – *Microscopic Study of Solid-Liquid Interfaces During Melting and Freezing*, , 1963.
12. HALE N.W., VISKANTA R. – *Solid Liquid Phase – Change Heat Transfer and Interface Motion in Materials Cooled or Heated From Above and Below*, Int.J. Heat Mass Transfer ,23, 1980.
13. MURRAY W.D., LANDIS F – *Numerical and Machine Solutions of Transient Heat Conduction Problems Involving Melting and Freezing*, Trans.Am.Soc.Nech.Engrs. Series C- J. Heat Mass Transfer ,81, 1959.

14. Brennan, James G. - Food Processing Handbook - WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA (2006)
15. Fellows, P. - Food Processing Technology - Principles and Practice, 2nd Edition, Woodhead Publishing Limited and CRC Press LLC (2000)
16. Holdsworth D. & Simpson R. - Thermal Processing of Packaged Foods, Springer (2008)
17. Hui - Handbook Of Fruits And Fruit Processing - Blackwell (2006)
18. Jongen, Wim - Fruit and Vegetable Processing, Improving Quality - CRC Press (2002)
19. Richardson, Philip - Thermal Technologies în Food Processing - Woodhead Publishing (2001)
20. Sun - Handbook Of Frozen Food Processing And Packaging, CRC Press (2006).
21. Nazrul I. Shaikh, Vittal Prabhu- Mathematical modeling and simulation of cryogenic tunnel freezers, Journal of Food Engineering 80 (2007) 701–710.
22. *** Kelox SA Spain - Fișe Tehnice
23. Delgado, A. E., & Sun, D. W. (2001). Heat and mass transfer models for predicting freezing process – a review. Journal of Food Engineering, 47, Delgado, A. E., & Sun, D. W. (2001). Heat and mass transfer models for predicting freezing process – a review. Journal of Food Engineering, 47, 157–174.
24. Ramakrishnan, S., Wysk, R. A., & Prabhu, V. V. (2004). Prediction of process parameters for intelligent control of tunnel freezers using simulation. Journal of Food Engineering, 65(1), 23–31.
25. Shaikh, N. I., & Prabhu, V. V. (2002). Model based control strategies for cryogenic tunnel freezers. Working paper, 2002, The Pennsylvania State University, Department of Industrial and Manufacturing Engineering, University Park, PA.

SITE

1. <http://www.linde.com>
2. <http://www.windtrax.com>
3. <http://www.iifir.org/en/>
4. www.praxair.com/praxair.com
5. <http://www.kelox.es>
6. <http://www.airliquide.com>
7. <http://www.linde.com>

c) Articole științifice publicate (Anexa).

ASPECTS REGARDING THE MODELING OF THERMIC TRANSFER PROCESSES IN ENVIRONMENTS WITH PHASE CHANGE WITH PLANE GEOMETRY

Gelu COMAN, Spiru PARASCHIV, Valeriu DAMIAN

University "Dunarea de Jos" of Galati, ROMANIA
Domneasca Str, Nr.111.tel.0236414871, fax0236461353
e-mail: gcoman@ugal.ro

ABSTRACT. *An important category of thermal transfer processes is that of environments with phase change. We refer to the processes of melting and solidification of some substances with different shapes, involved in thermal and accumulation transfer processes. In this case, the enunciation of the mathematical problem is called the Ștefan problem and it refers to the thermal transfer in environments with a variable frontier.*

KEYWORDS *solidification, heat, phase, accumulation, transfer processes.*

1. INTRODUCTION

In order to solve this problem, we will consider a plain plate made of a substance with phase change. We consider it horizontally, the upside being in thermal contact with the fluid environment above it and the downside being perfectly isolated from the thermal point of view.

2. NUMERICAL METHOD

First of all, the numerical method that we will describe will admit an important simplifying hypothesis, saying that the plate's temperature is equal on all its thickness, but, of course, variable in time.[2] The differential thermal balance in an unstable regime of the plate in the stage of sensible heat taking over is:

$$\alpha(t - \theta) \cdot d\tau = \delta \cdot \rho \cdot c \frac{d\theta}{d\tau} \cdot d\tau \quad (1)$$

where: α [W/m²K] - convection coefficient

ρ [kg/m³] - density

c [J/kg]- specific heat

t [⁰C] - environment temperature

θ [⁰C] - plate temperature

τ [s] - time

Thus obtaining the linear differential equation:

$$\frac{d\theta}{d\tau} = -\frac{\alpha}{\delta \cdot \rho c} \cdot \theta + \frac{\alpha}{\delta \cdot \rho c} \cdot t \quad (2)$$

Taking into account the initial condition:

$$\theta|_{\tau=0} = \theta_0 \quad (3)$$

Supposing that the environment temperature is constant in time, $t > \theta_F$. Thus the solution of the differential equation is:

$$\theta = t + (\theta_0 - t) \cdot \exp\left(-\frac{\alpha}{\delta \cdot \rho c} \cdot \tau\right) \quad (4)$$

$$\text{or:} \quad \theta = E^\tau \cdot \theta_0 + (1 - E^\tau) \cdot t \quad (5)$$

$$\text{where:} \quad E = \exp\left(-\frac{\alpha}{\delta \cdot \rho c} \cdot \sigma\right) \quad (6)$$

That's how the plain plate made of the environment with phase change behaves during the solid and the liquid stages. Between these two stages, there is an intermediary passage stage from the solid stage to the liquid stage, during which latent melting heat is taken over. We have to determine how long this stage takes. We are thus writing the thermal balance characteristic to this phase[3]:

$$\alpha \cdot (t - \theta_F) \cdot \tau_F = \delta \cdot \rho c \cdot r \quad (7)$$

results:

$$\tau_F = \frac{\delta \cdot \rho c \cdot r}{\alpha \cdot (t - \theta_F)} \quad (8)$$

It is also important to establish the moment when the solid plate reaches the phase change temperature, θ_F .

$$\tau_1 = \frac{\delta \cdot \rho c}{\alpha} \ln \frac{t - \theta_0}{t - \theta_F} \quad (9)$$

From the moment $\tau_2 = \tau_1 + \tau_F$ begins the heating in sensibility of the liquid plate.

Similarly, we can raise this question when the external heat depends on time.

Due to the simplifying hypothesis it contains, this model doesn't allow us to follow the plate's temperature variation in thickness, this being an abatement from the real development of the thermic transfer processes. In what follows, we will try to rectify this by working on a model with layers of equal temperature.

3.THE MODEL WITH LAYERS OF EQUAL TEMPERATURE

In order to solve this problem, we will consider that the plain plate is made of n layers, each of them having an equal temperature.

We will practically analyze the case when the upside part of the plain plate is in limit conditions of 3rd case, and at the downside, the themic flux is null. The plate made of phase change material is initially at the θ_0 temperature and the upside part is into contact with a fluid environment at the $t(\tau)$ temperature.

We differentiate two stages of the heating (cooling) process: the 1st stage when the heat

accumulation between the plate's strata is made in sensible with the raising of the strata temperatures and the 2nd stage when the heat accumulation happens latently while keeping constant the strata temperature at the phase change temperature value θ_F . [4]

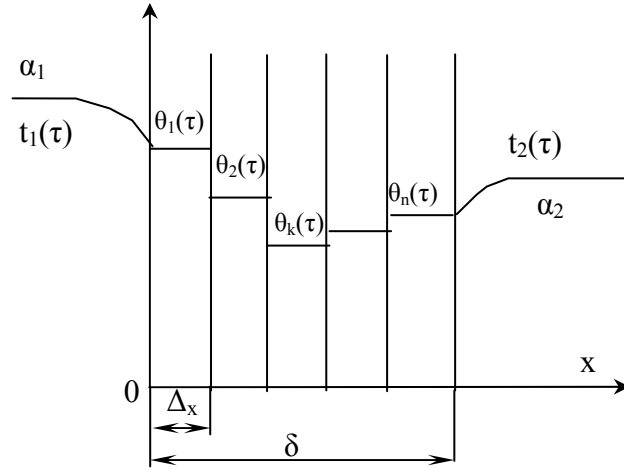


Fig1. The plain plate

We will thus write the thermic balances of each stratum during the 1st heat accumulation stage in sensible.

$$\text{Layer 1:} \quad \alpha_1 \cdot (t_1 - \theta_1) \cdot d\tau + \frac{\lambda}{\Delta x} (\theta_2 - \theta_1) \cdot d\tau = \Delta x \cdot \rho c \cdot d\theta_1 \quad (10)$$

$$\text{Layer k:} \quad \frac{\lambda}{\Delta x} (\theta_{k-1} - \theta_k) \cdot d\tau + \frac{\lambda}{\Delta x} (\theta_{k+1} - \theta_k) \cdot d\tau = \Delta x \cdot \rho c \cdot d\theta_k \quad (11)$$

$$\text{And for the last layer:} \quad \frac{\lambda}{\Delta x} (\theta_{n-1} - \theta_n) \cdot d\tau = \Delta x \cdot \rho c \cdot d\theta_n \quad (12)$$

Processing the thermic balance relations, we obtain the system of 1st order differential linear equations:

$$\frac{d\theta_1}{d\tau} = -\frac{a}{\delta^2} n(n + Bi) \cdot \theta_1 + \frac{a}{\delta^2} n^2 \cdot \theta_2 + \frac{a}{\delta^2} nBi \cdot t \quad (13)$$

$$\frac{d\theta_k}{d\tau} = -2 \frac{a}{\delta^2} n^2 \cdot \theta_k + \frac{a}{\delta^2} n^2 \cdot \theta_{k-1} + \frac{a}{\delta^2} n^2 \cdot \theta_{k+1} \quad (14)$$

for $k = 2, 3, \dots, n-1$

$$\frac{d\theta_n}{d\tau} = -\frac{a}{\delta^2} n^2 \cdot \theta_n + \frac{a}{\delta^2} n^2 \cdot \theta_{n-1} \quad (15)$$

The utility of this system lasts as long as the first stratum has an inferior temperature compared to the phase change temperature of the plate material. As soon as the temperature of the first stratum reaches the θ_F value, the heat accumulation in this stratum will happen latently,

while heat accumulation in the other strata will happen in sensible (that is with strata temperature modification). We can practically say that the plain plate has divided into two areas: an upside area where heat accumulation happens without temperature change and a downside area where heat accumulation happens with temperature change. The duration of the period while the first stratum accumulates heat without temperature change depends on the second characteristic of the material, which is the latent heat r .

The thermal balance of the first stratum during this considered period of τ_F duration is:

$$\alpha \cdot \int_0^{\tau_F} (t - \theta_F) d\tau - \frac{\lambda}{\Delta x} (\theta_F \tau_F - \int_0^{\tau_F} \theta_2 d\tau) = \Delta x \cdot \rho \cdot r \quad (16)$$

To this thermal balance equation we associate the other thermal balance equations corresponding to the 2, 3, ..., n strata, mentioning that the 2nd stratum is into an upside contact with the 1st stratum which has a constant temperature θ_F . This system can be solved separately, but meanwhile we have to follow the satisfaction of the thermal balance of the 1st stratum, in order to establish the time value τ_F after which the phase change in the first stratum has entirely happened.

After this first period, the first stratum is incorporated to the other strata, following up the modification in sensible of temperatures in all strata. This stage lasts until the temperature of the second stage reaches the phase change temperature value θ_F and from now on the second stratum separates the strata into two areas, an upside one and a downside one in which accumulation happens in sensible. In parallel we will also follow up the latent heat accumulation in the second stratum until the phase transformation in this stratum will happen entirely. From now on the stages alternate identically for each stratum of the plate, until, eventually, all strata change their phase.

4. CONCLUSION

It is well-known that the substance suffers physical changes, once it has reached the temperature of phase change. The accumulation of heat will happen for a period of time without changing the substance temperature, the energy received or lost thus contributing to the change of the substance structure. There are complications from the mathematical point of view, because the substance melting or solidification leads to the appearance of a separation frontier between the solid substance and the liquid one that continually moves during the thermal transfer process.

REFERENCES

- [1] CHIRIAC, F., LECA, A., POP, M., "Procese de transfer de caldura si masa in instalatiile industriale", Editura tehnica 1982
- [2] IORDACHE, F., BALTARETU, F., "Modelarea si simularea proceselor dinamice de transfer termic" Editura Matrix 2002.
- [3] LEWIS, R.W., MORGAN, K., "The finite element method in heat transfer analysis" John wiley & Sons, Chichester, England, 1996
- [4] PATANKAR, S.V., "Numerical heat transfer and fluid flow" Hemisphere Publishing Corporation, 1980.
- [5] PORNEALA S. "Tehnologia utilizarii frigului artificial" Editura Fundatiei Universitare "Dunarea de Jos" 2007

STUDY OF AMMONIA-WATER ABSORPTION TRIPLE EFFECT CYCLE

C. Iosifescu¹ V. Damian¹

***Abstract:** The paper presents a study of an ammonia-water absorption triple effect cycle known as the kangaroo cycle, and investigates its limitations. The triple effect absorption processes were modeled and a parametric study was performed*

***Key words:** modeling, absorption, triple effect cycle.*

1. Introduction

Vapor compression cycles require electricity to run the compressor that raises the refrigerant's pressure. Absorption cycles accomplish the same task by absorbing the refrigerant into a liquid, pumping the high density liquid mixture up to a higher pressure, and then desorbing the refrigerant by heating. The refrigerants used in absorption systems are naturally occurring, which should reduce the risk of potential problems. Additionally, if higher-efficiency absorption systems can be developed, carbon emissions can be reduced as well.

2. Ammonia water absorption cycles

The simplest type of absorption cycle is the single stage, or basic, cycle. Unfortunately, most of ammonia-water single stage absorption cycles are only able to produce COPs of approximately 0.5, which are well below the 1.0 to 1.3 range necessary for competition with vapor compression cycle efficiencies. Both the operating costs and the equipment costs of a single stage absorption cycle are higher than those of a vapor compression cycle, further

demonstrating its lack of commercial economic potential.

One alternative to the basic cycle is the generator-absorber heat exchange (GAX) cycle. The GAX cycle can achieve efficiencies of 0.8 to 1.0, and has been a major research thrust in the absorption area. Despite this effort, however, commercial development has been problematic. New advanced GAX cycles, which may improve upon the basic GAX cycle's performance, are currently under investigation.

This study analyzes the performance characteristics of another multiple effect cycle. Multiple effect cycles are designed by combining single stage components and cycles.

Three triple effect cycles are:

- the three-absorber cycle,
- the three-condenser cycle, and
- the two-absorber/two-condenser, or kangaroo, cycle

Triple effect ammonia water cycles are limited by the nature of the ammonia-water mixture. At generator temperatures above about 200 °C, corrosion becomes a major issue. The kangaroo-type triple effect is so named because it is comprised of a single effect cycle that is driven by heat rejected from a coupled

¹ Dept of Thermodynamics, "Dunărea de Jos" University of Galați.

high pressure single effect cycle. The low pressure cycle is considered to be within the 'pouch' of the high pressure cycle. The component diagram for the low and high pressure cycles are displayed in Fig 1. For this cycle, the heat rejected from the high pressure loop

condenser, absorber and rectifier is used to run the low pressure cycle. The heat added at the generator is used to create cooling from two evaporators, which can be combined, and to run the low pressure desorber.

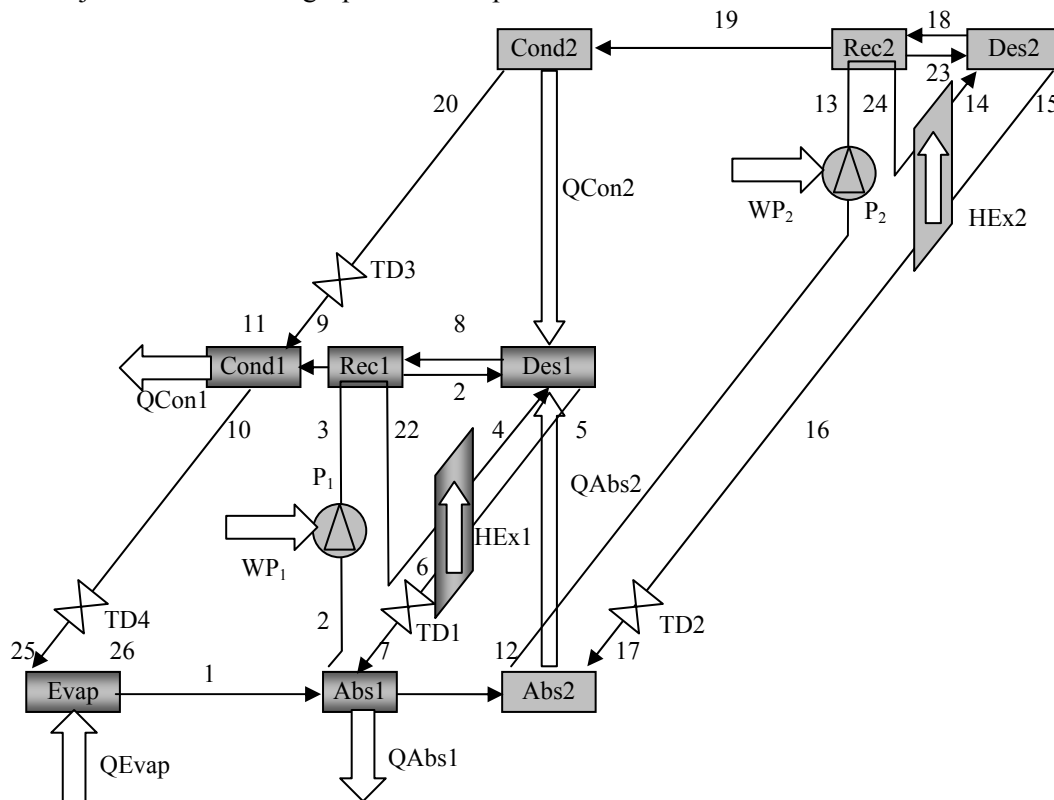


Fig 1 Component diagram for the low and high pressure cycles

3. Modeling the triple effect cycle

a. Introduction

In order to determine the states of the mixture at each point, the designer must examine the cycle requirements, or application operating specifications. The cycle requirements can be used to determine mixture properties at several of the state points. Once these properties are known, other properties can be determined from additional cycle

constraints.

b. Parameters

The following parameters were chosen in order to allow solving of the system and therefore were also varied in order to perform the study:

$\Delta t = 3 \text{ K}$ - pinch temperature (smallest temperature difference between the two streams) for the heat exchangers;

$\Delta X = 0.06$ - concentration difference between rich and poor solution;

$T_{10} = 35 \text{ }^\circ\text{C}$ - condensing temperature

for Cond1; temperature in;
 $X_{10} = 0.995$ - ammonia vapor $T_{10} = T_{26} + 10$ K - vapor temperature at
concentration; evaporator out;
 $T_{26} = 4$ °C - saturated liquid

Parameters of the cycle state points Table 1

State point	Description	Known parameters	Flowrate	System unknown
10	Cond1-out	$t, X, q = 0$	$\dot{m}_1 + \dot{m}_2$	p_{h1}
26	Evap	$t, X = X_{10}, q = 0$	$\dot{m}_1 + \dot{m}_2$	p_l
25	TD4-out	$p = p_l, X = X_{10}, h = h_{10}$	$\dot{m}_1 + \dot{m}_2$	
1	Evap-out	$t, p = p_l, X = X_{10}$	$\dot{m}_1 + \dot{m}_2$	
9	Rec1-out	$p = p_{h1}, X = X_{10}, q = 1$	\dot{m}_1	
2	Abs1-out	$t = t_{10}, p = p_l, q = 0$	$\dot{m}_1 \cdot fp_1$	X_2
5	Des1-out	$p = p_{h1}, X = X_2 - \Delta X, q = 0$	$\dot{m}_1 \cdot (fp_1 - 1)$	X_5
3	P1-out	$p = p_{h1}, X = X_2, h$	$\dot{m}_1 \cdot fp_1$	
21	Rec1-out - Des1-in	$p = p_{h1}, X = X_2, q = 0$	$\dot{m}_1 \cdot R_1$	
8	Des1-out - Rec1-in	$t = t_{21}, p = p_{h1}, q = 1$	$\dot{m}_1 \cdot (R_1 + 1)$	X_8
22	Rec1-out	$p = p_{h1}, X = X_2, h$	$\dot{m}_1 \cdot fp_1$	
4	HEX1-out	$p = p_{h1}, X = X_2, t(h)$	$\dot{m}_1 \cdot fp_1$	
6	HEX1-out	$p = p_{h1}, X = X_5, t(h)$	$\dot{m}_1 \cdot (fp_1 - 1)$	
7	TD1-out	$p = p_l, X = X_5, h = h_6$	$\dot{m}_1 \cdot (fp_1 - 1)$	
20	Cond2-out	$t = t_4 + \Delta t, X = X_{10}, q = 0$	\dot{m}_2	p_{h2}
11	TD3-out	$p = p_{h1}, X = X_{10}, h = h_{20}$	\dot{m}_2	
19	Rec2-out - Cond2-in	$p = p_{h2}, X = X_{10}, q = 1$	\dot{m}_2	
12	Abs2-out	$t = t_4 + \Delta t, p = p_l, q = 0$	$\dot{m}_2 \cdot fp_2$	X_{12}
15	Des2-out - HEX2-in	$p = p_{h2}, X = X_{12} - \Delta X, q = 0$	$\dot{m}_2 \cdot (fp_2 - 1)$	X_{15}
13	P2-out	$p = p_{h2}, X = X_{12}, h$	$\dot{m}_2 \cdot fp_2$	
23	Rec2-out - Des2-in	$p = p_{h2}, X = X_{12}, q = 0$	$\dot{m}_2 \cdot R_2$	
18	Des2-out - Rec2-in	$t = t_{23}, p = p_{h2}, q = 1$	$\dot{m}_2 \cdot (1 + R_2)$	X_{18}
24	Rec2-out - HEX2-in	$p = p_{h2}, X = X_{12}, h$	$\dot{m}_2 \cdot fp_2$	
14	HEX2-out - Des2-in	$p = p_{h2}, X = X_{12}, t(h)$	$\dot{m}_2 \cdot fp_2$	
16	HEX2-out - TD2-in	$p = p_{h2}, X = X_{15}, t(h)$	$\dot{m}_2 \cdot (fp_2 - 1)$	
17	TD2-out	$p = p_l, X = X_{15}, h = h_{16}$	$\dot{m}_2 \cdot (fp_2 - 1)$	

c. Model equations (selected)

Circulation factors (1: Baby stage, 2: Mother stage):

$$FP_1 = \frac{X_1 - X_5}{X_2 - X_5}, FP_2 = \frac{X_1 - X_{15}}{X_{12} - X_{15}} \quad (1)$$

Reflux coefficients:

$$R_1 = \frac{X_9 - X_8}{X_8 - X_{21}}, R_2 = \frac{X_{19} - X_{18}}{X_{18} - X_{23}} \quad (2)$$

Loads:

$$\Phi_{des1} = \dot{m}_1 \cdot ((R_1 + 1) \cdot H_8 - R_1 \cdot H_{21} + (FP_1 - 1) \cdot H_5 - FP_1 \cdot H_4) \quad (3)$$

$$\Phi_{abs1} = \dot{m}_1 \cdot (H_1 + (FP_1 - 1) \cdot H_7 - FP_1 \cdot H_2) \quad (4)$$

$$\Phi_{cond1} = \dot{m}_1 \cdot (H_9 - H_{10}) + \dot{m}_2 \cdot (H_{11} - H_{10}) \quad (5)$$

$$\Phi_{evap1} = \dot{m}_1 \cdot (H_1 - H_{25}) \quad (6)$$

$$\Phi_{des2} = \dot{m}_2 \cdot ((R_2 + 1) \cdot H_{18} - R_2 \cdot H_{23} + (FP_2 - 1) \cdot H_{15} - FP_2 \cdot H_{14}) \quad (7)$$

$$\Phi_{abs2} = \dot{m}_2 \cdot (H_1 + (FP_2 - 1) \cdot H_{17} - FP_2 \cdot H_{12}) \quad (8)$$

$$\Phi_{cond2} = \dot{m}_2 \cdot (H_{19} - H_{20}) \quad (9)$$

$$\Phi_{evap2} = \dot{m}_2 \cdot (H_1 - H_{25}) \quad (10)$$

Work of pumps:

$$W_{P1} = \dot{m}_1 \cdot FP_1 \cdot (P_{H1} - P_{Low}) \cdot V_2 \quad (11)$$

$$W_{P2} = \dot{m}_2 \cdot FP_2 \cdot (P_{H2} - P_{Low}) \cdot V_{12} \quad (12)$$

Check energy balance:

$$\Phi_{chk12} = (\Phi_{des1} - \Phi_{cond2} - \Phi_{abs2}) - \Phi_{abs1} - \Phi_{cond1} + \Phi_{evap1} + W_{P1} + (\Phi_{des2} + \Phi_{evap2} + W_{P2}) \quad (13)$$

Internal heat exchange between first and second stage:

$$\Phi_{des1} = \Phi_{cond2} + \Phi_{abs2} \quad (14)$$

COPs for cooling/heating mode:

$$COP_{c12} = \frac{\Phi_{evap1} + \Phi_{evap2}}{W_{P1} + (\Phi_{des2} + W_{P2})} \quad (15)$$

$$COP_{h12} = \frac{\Phi_{abs1} + \Phi_{cond1}}{W_{P1} + (\Phi_{des2} + W_{P2})} \quad (16)$$

Remarks:

- Absorber1 and Condenser1 are cooled with the same cooling media: $t_2 = t_{10}$
- in order to perform heating of Des1, Cond2 and Abs2 have the same output temperature: $t_{20} = t_{12} = t_4 + \Delta t$
- equilibrium is assumed between states 8 and 21, and 18 and 23.

d. External Cycle Constraints

We assume that the application considered in this study for the ammonia-water triple effect cycle is space cooling. This dictates the condenser and absorber heat sink and the evaporator external heat source.

e. Design Parameters

The upper loop is coupled to the lower loop by the rejection of heat from the condenser, rectifier and absorber to the lower loop desorber. The mass flow rate of the refrigerant on the upper loop is not a design variable, as it is in the lower loop. This is the result of requiring that the heat required to drive the lower loop desorber be equal to the total heat rejected from the upper loop. Designation of the refrigerant mass flow rate is replaced by this heat transfer

constraint.

Higher COPs are achieved with higher desorber exit temperatures, but the upper loop desorber temperature is constrained to 200 °C by the maximum temperature of an ammonia-water mixture that can be achieved without incurring undue corrosion problems. The refrigerant concentration in the refrigeration loop should be as high as possible, as the increased concentration reduces the temperature glide in the evaporator and raises the evaporator/absorber pressure, which maximizes the COP.

4. Results

In order to assess the system behavior some of the input parameters (ΔX_1 , ΔX_2 , T_{10} , T_{26} , X_{10}) were varied and their influence on COP is presented below.

The increase of condensing temperature of the baby cycle T_{10} leads to an almost linear increase of the corresponding condensing pressure PH1 and of the condensing temperature of mother cycle T_{20} (but to a steeper increase of corresponding condensing pressure PH2) (see Fig 2). The increase of evaporation temperature leads to a decrease of the condensing temperature of mother cycle T_{20} (and of corresponding condensing pressure PH2). For $T_{10} = 36$ °C and $T_{26} = 2$ °C, T_{20} reaches almost 80 °C, and corresponding pressure PH2 is above 40 bar).

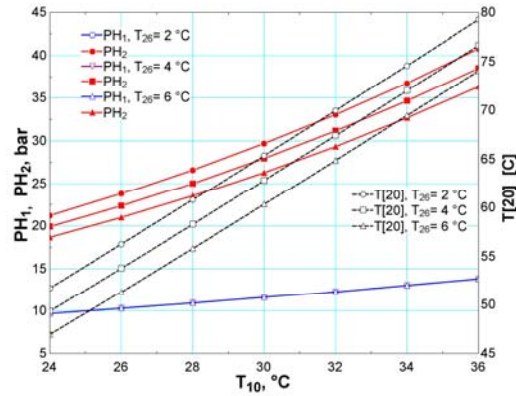


Fig 2 Influence of condensing temperature T_{10} on PH_1 and PH_2 for different evaporation temperatures T_{26}

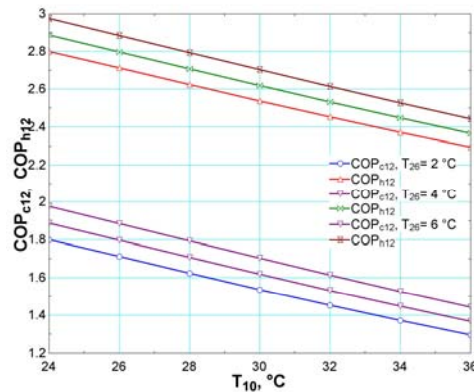


Fig 3 Influence of condensing temperature T_{10} on COP_c and COP_h for different evaporation temperatures T_{26}

The increase of concentration difference between rich and poor solution for both lower (ΔX_1) and higher loop (ΔX_2) have a healthy influence on COPs for cooling and heating modes (see Fig 4 and Fig 5).

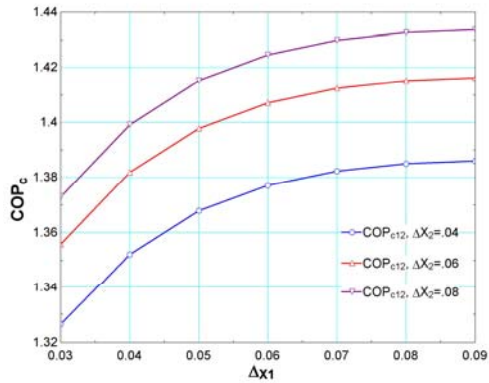


Fig 4 Influence of concentration difference between rich and poor solution for lower loop ΔX_1 on COP_c for different concentration difference for upper loop ΔX_2

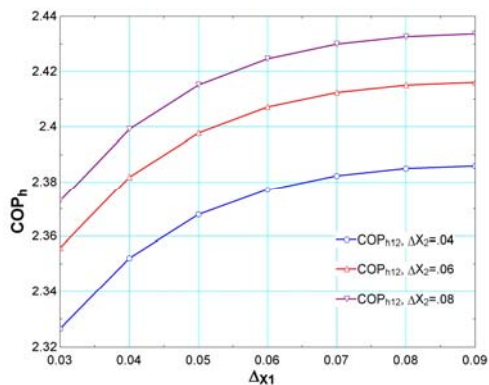


Fig 5 Influence of concentration difference between rich and poor solution for lower loop ΔX_1 on COP_h for different concentration difference for upper loop ΔX_2

Increase of vapor concentration X_{10} have a similar faint positive effect on COP (see Fig 6)

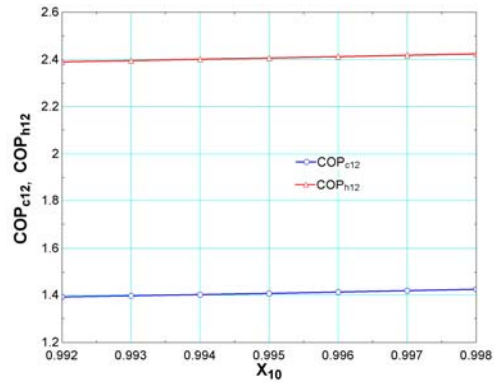


Fig 6 Influence of vapor concentration X_{10} on COP_c and COP_h

5. Conclusions

The purpose of this study was to investigate the triple effect ammonia-water cycle. While the cycle itself was shown to be viable, further studies should address equipment and commercialization issues such as pumps, corrosion, and cost.

References

1. Herold, K.E., Radermacher R., and Klein S.A.: *Absorption Chillers and Heat Pumps*, CRC Press, 1996
2. Chiriac F., Țârlea M. G., Gavriluc R., Ilie, A., Dumitrescu, R.: *Mașini și instalații frigorifice*, București, AGIR, 2006, pg. 136
3. Shelton, Sam V., Jacob, D., Schaefer, L.A.: *Modeling and analysis of the air cooled ammonia-water triple effect cycle*, Advanced Energy Systems Division, 1999 Mechanical Engineering Congress and Exposition, Nashville, TN, Nov. 1999.
4. Porneală, S. - *Procese în instalații frigorifice și pompe de căldură - Vol.2: Absorbție, eiecție, aer*, Ed Zigotto, Galați, 2005.

FREEZING GRAPES USING LIQUID NITROGEN

Valeriu DAMIAN, Gelu COMAN

University "Dunarea de Jos" of Galati, ROMANIA
Domneasca Str, Nr.111.tel.0236414871, fax0236461353
e-mail: valeriu.damian@ugal.ro, Gelu.Coman@ugal.ro

ABSTRACT. *Quick freezing of food products in a cryogenic freezer consist in the use of evaporation latent heat of the liquid nitrogen, as well as of the sensible heat of the vapors, whose temperature increase up to final temperature of the frozen product. This paper presents some aspects concerning grapes freezing using liquid nitrogen: duration of the process, freezing capacity, advantages and disadvantages of this modern method. The use of cryogenic freezing with liquid nitrogen and carbon-dioxide is regarded as the "centuries revolution" in the food area.*

KEYWORDS: *grapes, freezing, liquid nitrogen.*

1. INTRODUCTION

Freezing is the favorite modern mean for best preservation of nutrient properties of a large number of alimentary products, ensuring long term preservation.

Direct contact freezing using liquids (nitrogen or CO₂), is done either by sinking the product in a cold liquid or by spraying the product with this liquid.

The liquid can evaporate or not, but in either cases, the method has the main advantage of a great improvement of the heat transfer coefficient between the product to be frozen and the refrigerant.

Using cryogenic systems one can avoid the large investment required for a compression refrigeration system, using only from time to time cold delivery in the shape of the liquefied cryogenic fluid.

2. REQUIRE FREEZING TIME

Freezing is the process by which most of the water from the cellular liquid and the water from a product's tissues (capillary vases, intercellular spaces) is turned into ice.

Water crystallization temperature ranges between -1...-5°C, at which 60...75% of the whole water content turns into solid. The process must be continued afterwards by subcooling the product to a final temperature of -18...-25°C, at which 90...95% of the water content turns into solid. Thermal core temperature is a main indicator of the end of the freezing process as it can be with maximum 3...5°C higher than the products' storage temperature.

International Institute of Refrigeration established the following conditions: final temperature of the products thermal core $\leq -15^{\circ}\text{C}$, average final temperature $\leq -18^{\circ}\text{C}$.

Freezing process of a food product is a typically transient heat and mass transfer process. Transfer phenomenon are complex due to the phase change of the solidifying water and of the transport properties of the product (thermal conductivity, specific heat, etc.).

Computing methods use some simplifying hypotheses which allow establishing some simple calculus relations for the freezing duration (according to Planck):

- all the heat is drawn from the product at the freezing point temperature;
- the products are homogenous and isotropic;
- the cooling surroundings has a constant temperature;
- the product has already been cooled down to the freezing temperature.

For a spherical shape product, freezing duration can be determined using Planck's formula [3]:

$$\tau_{cg} = \frac{\rho \cdot l_{cg}}{t_{cg} \cdot t_{mII}} \cdot \left(\frac{r_0^2}{6 \cdot \lambda} + \frac{r_0}{3 \cdot \alpha} \right) [s] \quad (1)$$

where:

$t_{cg} = -0,7$ [°C] - freezing temperature;

$t_{mII} = -150$ [°C] - cooling surrounding temperature (zone II);

$\alpha = 530$ [W/m²K] - convection coefficient;

$r_0 = 0,013$ [m] - sphere radius;

$l_{cg} = 280,4$ [kJ/kg] - freezing latent heat of the product;

$\rho = 1068$ [kg/m³] - product density;

$\lambda = 0,51$ [W/mK] - thermal conductivity of the product.

$$\tau_{cg} = 180.83 [s]$$

For freezing using liquid nitrogen the values for α are between 35 [W/m²K] (vapor precooling area) and 525...535 [W/m²K] (nitrogen liquid spraying area).

Total duration of the freezing process is:

$$\tau_c = \tau_r + \tau_{cg} + \tau_{sr} [s] \quad (2)$$

where:

τ_r [s] - primary refrigeration duration;

τ_{cg} [s] - freezing duration;

τ_{sr} [s] - product duration subcooling.

Primary refrigeration duration can be computed from the following relation:

$$\tau_r = \frac{m \cdot c}{\alpha \cdot s} \cdot \ln \frac{t_i - t_{mI}}{t_f - t_{mI}} [s] \quad (3)$$

where: $m = \rho V$ [kg] - product mass.

$$\rho = 1068 \text{ [kg/m}^3\text{]}; \quad V = \frac{4 \cdot \pi \cdot r_0^3}{3} \text{ [m}^3\text{]}.$$

$$m = 1068 \cdot \frac{4 \cdot \pi \cdot 0,013^3}{3} = 0.01 \text{ kg}$$

$c = 3.62$ [kJ/kg]- product's specific heat;

$\alpha = 35$ [W/m²K] - convection coefficient;

$s = 4\pi r_0^2 = 0,00212$ [m²] - product's external surface;

$t_i = 25$ [°C] - product's initial temperature;

$t_f = -0,7$ [°C] - product's final temperature;

$t_{mI} = -60[^\circ\text{C}]$ -cooling surrounding temperature (zone I).

$$\tau_r = 175.65 \text{ [s]} = 2.92 \text{ [min]}$$

The duration for subcooling of the frozen product to the final average temperature (t_{mf}) can be calculated using Planck's relation:

$$\tau_{sr} = 933 \cdot c_m \cdot n \cdot \left| \lg \frac{t_{cg} - t_{mIII}}{t_{III} - t_{mII}} - 0,0913 \right| \cdot \left(\frac{2 \cdot r_0}{\alpha} + \frac{r_0^2}{\lambda} \right) \cdot \frac{1}{3,6} \quad (4)$$

where:

$c_m = 1,81 \text{ [kJ/kgK]}$ - frozen product average specific heat;

n - dimensionless coefficient, whose values depends on the Biot dimensionless group, defined by:

$$\text{Bi} = \frac{\alpha \cdot \delta}{\lambda} \quad (5)$$

where: $\delta = r_0$.

Table 1. Values for the dimensionless coefficient n vs. Bi .

Bi	0.2	0,25	0,5	1,0	2,0	4,0	10	∞
n	1.232	1,21	1,188	1,156	1,112	1,06	1,02	1,00

$$\text{Bi} = 0,89 \Rightarrow n = 1,147.$$

$t_{cg} = -4 [^\circ\text{C}]$ - freezing final temperature;

$t_{mII} = -80 [^\circ\text{C}]$ - cooling surrounding temperature (zone III);

$t_{mIII} = -18 [^\circ\text{C}]$ - thermal core final temperature of the product;

$$\tau_{sr} = 0,015 \text{ [h]} = 55,71 \text{ [s]}.$$

Freezing process total duration is:

$$\tau_c = 412,19 \text{ [s]} = 6,86 \text{ [min]}$$

3. FREEZING CAPACITY

For freezing grapes was used cryogenic freezer using liquid nitrogen designed and built by the author. Grapes are placed in a plastic wrapping with the dimensions:

- L x W x H (mm): 160x100x70;

- wrapping volume: 0,00112 m³;

- grapes radius: $r=13 \text{ mm}$;

- the number of the grapes in a box: $n_c=120$;

- volume occupied by the grapes in a box.

A sketch with grapes displacement in a box is shown in Fig.1.

$$V = \frac{4 \cdot \pi \cdot r^3}{3} \cdot n_c = 0,001 \text{ [m}^3\text{]}$$

The weight of a box of grapes:

$$m = \rho \cdot V = 1068 \cdot 0,001 = 1,17 \text{ [kg]}$$

The boxes will be placed on a single row, as shown in Fig. 2.

τ_p - time in which the product covers a distance equal to the length of the box; $\tau_p = 11,76$ [s]

$$\tau_n = \tau_c + (n-1)\tau_p \quad (6)$$

Number of frozen boxes hourly is:

$$n = 1 + \frac{\tau_n - \tau_c}{\tau_p} = 275,83 \text{ [boxes /hour]} \quad (7)$$

The quantity of grapes freezed hourly:

$$m_t = n \cdot m = 322.72 \text{ [kg/h]} \quad (8)$$

The actual quantity of grapes freezed hourly:

$$m_r = \frac{160}{165} \cdot m_t = 312.94 \text{ [kg/h]} \quad (9)$$

Hourly capacity for grapes displaced in a single layer:

$$\dot{m} = \frac{312.94}{4} = 78.23 \text{ [kg/h]} \quad (10)$$

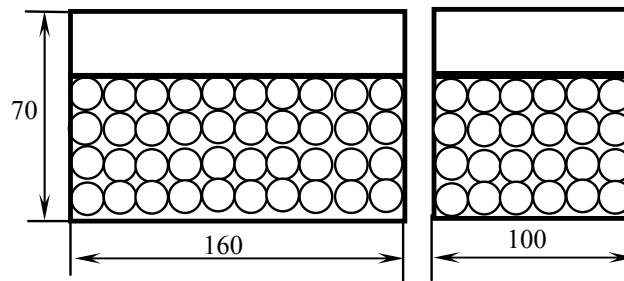


Fig. 1. Grapes displacement in a box.

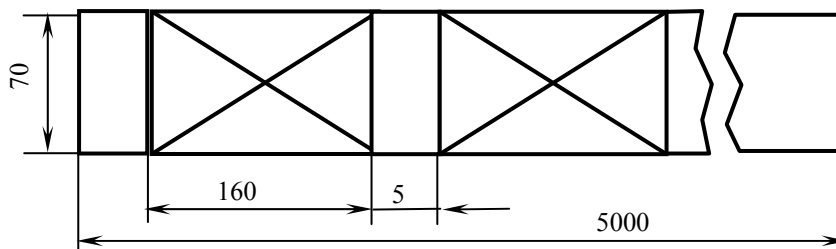


Fig.2. Placed boxes.

4. CONCLUSION

In order to make a comparison, in the following table are shown some economical parameters [1].

The main **advantages** of liquid nitrogen freezing are:

- simple design, small space required and easy cleaning;
- short startup and freezing times;
- reduced weight losses;
- investment costs are with 50% smaller than for vapor compression systems, and there are no maintenance costs involved;
- the system can be used for various food products with no modifications;
- movable freezers can be designed;
- the liquid nitrogen is obtained as a auxiliary product in oxygen manufactory.

The main **disadvantage** of this freezing method is the high cost of liquid nitrogen, but considering that freezing cost accounts only for 7,3% of the product's price, one may disregard this disadvantage.

REFERENCES

- [1] Damian V., Vasilescu C., “*Congelarea criogenică a produselor din carne*”, Ed. Evrika Brăila, 1997.
- [2] Porneală S., Porneala C., “*Procese in instalatii frigorifice si pompe de caldura*”, vol I, Ed. Fundatiei Universitare “Dunarea de Jos” Galati, 2004.
- [3] Porneală S. – “*Tehnica frigului si climatizării în Industria Alimentară*”, Ed. Fund. Univ."Dunărea de Jos" Galați, 2000.
- [4] Radcenco V., Porneală S. ,”*Procese în instalații frigorifice*”, Ed. Did. si Ped. București, 1983.



AUTOMATION FOR A LIQUID NITROGEN CRYOGENIC FREEZER

Valeriu DAMIAN, Gelu COMAN, Laurentiu FRANGU

Abstract: The paper presents an automation system for a liquid nitrogen cryogenic freezer for quick freezing of meat products, using both the evaporation latent heat of liquid nitrogen and sensible heat of the nitrogen vapor. The suggested automation design partially solves the problem of automatic control of the conveyor speed. The dynamic model gives data using computer simulation. This equipment was designed by the principal author and is fully operational at the Thermal Engines Department, "Dunărea de Jos" University of Galați. **Key words:** automatic regulation, cryogenic freezer, nitrogen, speed control.

1. INTRODUCTION

Quick freezing of meat products in a cryogenic freezer consist in the use of evaporation latent heat of the liquid nitrogen, as well as of the sensible heat of the vapors, whose temperature increase up to final temperature of the frozen product. The use of cryogenic freezing with liquid nitrogen and carbon-dioxide is regarded as the "centuries revolution" in the food area.[4]

The quality of the quick frozen products is superior compared to vapor compression system products. Because today's competition in the food international market concerns more the quality level than the price, quick freezing systems developed continuously, starting from 1960 in the USA and then in Europe.

For example, in France (1988) the frozen products consumption was 25.9 kg/year, from which 2 kg were cryogenically frozen. Therefore, needs is, that in Romania as well, to be carried-out research in this direction.

The simplified dynamic model allows the obtaining of results by computer simulation, and further investigations could improve the present model.

2. BAND SPEED AUTOMATIC ADJUSTMENT.

The cryogenic freezer is shown in Fig. 1, and has the following features:

- hourly freezing capacity: 110 kg
- dimensions: 5220 x 750 x 1450 mm
- weigh: 500 kg
- the temperature of frozen product: -18°C
- the length of conveyer band: 4.2 m
- speed of the band: 0.44 m/min
- freezing time: ≈ 10 min

Based on the tests carried out on a pork product with a constant thickness (25 mm), one found out that the thermal core temperature of the product ($t_c \leq -18^{\circ}\text{C}$) was achieved depending on the exhausted nitrogen vapors temperature, for constant freezer capacity and sprayed liquid nitrogen flow-rate.[3]

Other parameters that can influence the operating conditions of the cryogenic freezer in stationary regime are: outside air temperature, fat contents of the product, the distance among products on the band, the blockage of a forced air circulation fan and product thickness.

If the exhausted nitrogen vapors temperature increases, the nitrogen consumption decreases.

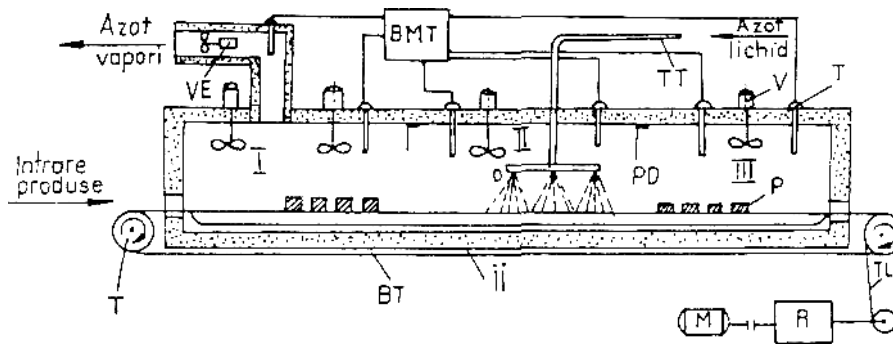


Fig. 1. Cryogenic freezer.

M - electric motor; P - meat product; BT - belt conveyer; R - worm reducer; TL - chain transmission; V - fan; VE - vapor exhaust fan; D - nozzle; PD - separating wall; TT - nitrogen transfer line; T - drum; BMT - temperature measuring unit; T - thermo resistance; I - pre-cooling area; II - freezing area; III - subcooling area;

For a vapors temperature of $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$, a $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperature in the core of product is easily achieved. One considered that the exhausted low temperature nitrogen vapors can be used for cooling a temporary food-bank used for product storage prior shipping.

The band speed automatic adjusting system has to operate for a temperature interval of -40 to $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, with a $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ reference temperature).

3. AUTOMATIC ADJUSTING SYSTEM

The main objective for automatic adjusting system is to assure minimum errors for output parameters, without operator intervention. The goal of the adjusting system is achieved if the disturbances are maintained within the previously known limits. The objective, structure and operation mode of the adjusting system are presented in the next paragraphs. The regulated target is the cryogenic freezer described in the previous paragraph.

The technological purpose is cooling of the product pieces at $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ average temperature, with a small temperature variation inside the product, a maximum productivity and a minimum consumption of cooling agent. Some conditions can be contradictory, so, it is useful to analyze the model of the regulated object, in order to decide the performance limits and required compromises.

Fig. 2, schematically shows the parameters.

1. product thermal core temperature when leaving the tunnel.
2. product surface temperature when leaving the tunnel.

3. cooling agent outlet vapor temperature
4. productivity
5. average temperature of the cooling-room
6. band speed
7. initial temperature of the cooling agent
8. cooling agent flow-rate
9. product density on the conveyer band
10. size of the product
11. initial temperature of product
12. average exterior temperature

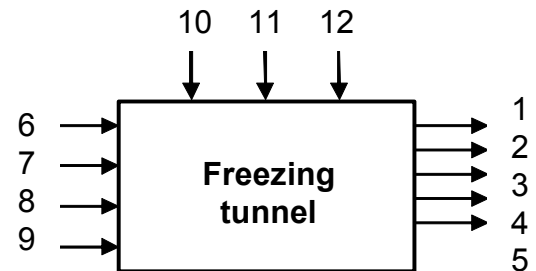


Fig. 2. System's parameters flowchart.

The sizes 1, 2, 3, 4 are process controlled conditions. The average temperature in the cooling-room is an intermediate parameter of the model, and 6, 7, 8, 9 are the input parameters. Of them, the cooling agent initial temperature was definitively fixed when the liquid nitrogen was chosen for the cooling process. The product size (10) represents a perturbation parameter, hard to modify (it's a technological given), but easy to measure, in order to choose the average operating point of the tunnel.[2]

The product density on the band is also a technological given (the distance between pieces of the product is 10 mm). Therefore, only the liquid nitrogen flow-rate and the band

speed can be selected as the execution sizes for the system. The last two parameters are disturbances, the most important being the product temperature.

From technological considerations, some of the presented parameters have a small variation range. The productivity represents the product between the speed of the band and the density of product on the band; its value is limited by the flow-rate of liquid nitrogen, if we assume a constant product temperature.

The nitrogen flow-rate has an optimum value (in stationary regime) imposed by the tunnel parameters and by the main disturbances, meaning, that for certain product dimensions and for an initial temperature, there is a limit value above the productivity doesn't increase, but the losses increase.[5]

Because the productivity and the efficiency are main parameters for the equipment, is important to choose an operating point for which the agent flow-rate is close to the optimal one, and the band speed provides the specified outlet product parameters. Productivity value results, whose maximum value was limited by choosing the nitrogen flow-rate, considering the efficiency. Product size and inlet temperature are major disturbances, but average exterior temperature is not.

Therefore, in order to achieve its goal, the adjusting system can operate under the following conditions:

- there is a static operation point, chosen considering the efficiency and productivity, that depends on the product dimensions and initial temperature;
- the nitrogen flow-rate and speed of the band are the execution parameters;
- the output parameters are the core product temperature, the product surface temperature when leaving the tunnel, and the temperature of the exhausted nitrogen vapors.
- the quality sizes for adjusting control are: the average temperature of the product output from tunnel and difference between inside and surface temperature of the product.

The simplified dynamic model suggested has the structure presented in Fig. 3, where

v and \dot{m} are the speed of the band and the nitrogen flow-rate.

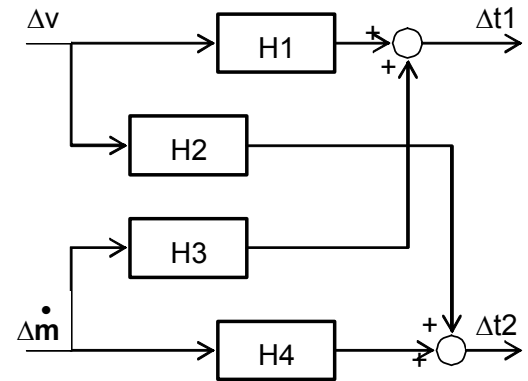


Fig. 3. The simplified dynamic model

The parameters t_1 , t_2 are the average output temperature of the product, respectively the output temperature of nitrogen vapor. All these parameters have small variations around the static operating point, therefore one can consider a linear behavior of the system.[1] Transfer functions are:

$$H_1(s) = \frac{K_1}{T_1s + 1} \quad (1)$$

$$H_2(s) = \frac{K_2 \cdot \exp(-T_{m2}s)}{T_2s + 1} \quad (2)$$

$$H_3(s) = \frac{K_3 \cdot \exp(-T_{m3}s)}{T_3s + 1} \quad (3)$$

$$H_4(s) = \frac{K_4 \cdot \exp(-T_{m4}s)}{T_4s + 1} \quad (4)$$

The time constants are about few minutes ($T_1 = 3 \dots 4$ min, $T_2 = 4 \dots 8$ min, $T_3 = 3 \dots 4$ min). The delay T_{m2} is relative small (below 10 sec) while T_{m3} , T_{m4} are between 20...40 sec. Model identification is done each time by the product density on the conveyer band and the inlet temperature. Nevertheless, the variations of these parameters are relatively small. Considering that the nitrogen flow-rate influences on both measurable parameters by means of the delay time, and also the difficulty of regulating this flow-rate, one chose, as the sole execution parameter the speed of the band.

The adjusting scheme is presented in Fig. 4 where the controlled parameter is the required product surface temperature when leaving the tunnel, computed (when starting the tunnel)

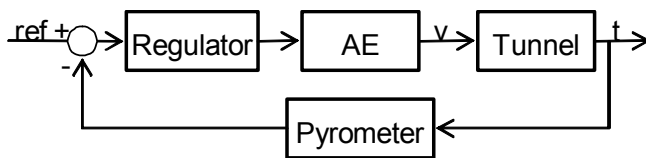


Fig. 4. Speed adjusting flow chart.

from the required average temperature and the estimated temperature gradient. AE is the motor automation and the pyrometer is the transducer for measuring the external temperature of the product.

Regulator speed control transfer function is:

$$H_R(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_I s} \right) \quad (5)$$

The size of the integration time constant is also of a few minutes, in order to compensate the main time constant of the H1 function.

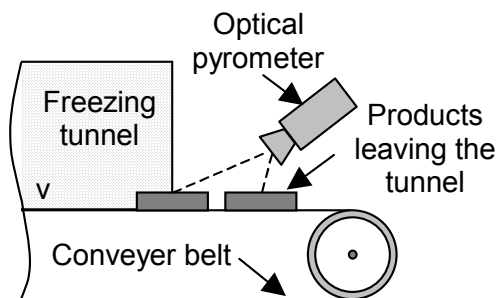


Fig. 5. Products' surface temperature measurement.

The temperature regulator is a standard one, used for slow processes, but it can also be used a numerical one, with the possibility of

recording the stationary regime values, characteristic for each perturbation range; in order to measure the surface temperature of the product when leaving the freezing tunnel, the pyrometer is placed above the conveyer belt, closed to it, aimed to the product surface, as shown in Fig. 5. The time constant of the pyrometer is neglectible (a matter of seconds)

4. CONCLUSION

Suggested automation design partially solves the problem of conveyer band speed adjusting. To fully solve the problem one need the use of cooling agent outlet vapor temperature as a control input. Time constants can be found out during testing.

5. REFERENCES

- [1] Niculiță, P., Ceangă, E., Bumbaru, S. - *Automatizarea instalațiilor frigorifice industriale*. Ed. Tehnică, București, 1983.
- [2] Ceangă, E. - *Automatizarea instalațiilor frigorifice*, Universitatea din Galați, 1988.
- [3] Damian, V. - *Teza de Doctorat*, Galați, 1995.
- [4] Damian, V., Vasilescu, C. - *Congelarea criogenică a produselor din carne*, Ed. Evrika, Brăila, 1997.
- [5] Porneală S., Porneala C. - *Procese in instalatii frigorifice si pompe de caldura*, vol I, Ed. Fundatiei Universitare "Dunarea de Jos" Galati, 2004.

Automatizarea unui congelator criogenic cu azot lichid

Lucrarea prezintă sistemul de automatizare pentru un congelator criogenic cu azot lichid utilizat pentru congelarea rapidă a produselor alimentare, care folosește căldura latentă de vaporizare a azotului lichid și căldura sensibilă a vaporilor de azot. Modelul de automatizare propus rezolvă partial problema controlului automat a vitezei benzii transportoare. Modelul dinamic oferă date folosind simularea pe calculator. Instalația a fost concepută și executată de autori și funcționează în cadrul Laboratorului de Termotehnică al Universității "Dunarea de Jos" din Galați.

Damian Valeriu, Professor PhD, Lower Danube University of Galați, Thermodynamics and Thermal Engines Dept. valeriu.damian@ugal.ro

Gelu Coman, Assist. Eng., Lower Danube University of Galați, Thermodynamics and Thermal Engines Dept., gcoman@ugal.ro

SOME ASPECTS CONCERNING STRAWBERRIES FREEZING USING LIQUID NITROGEN

V. DAMIAN¹ G. COMAN¹ C. IOSIFESCU¹

Abstract: *This paper presents some aspects concerning strawberries freezing using liquid nitrogen: duration of the process, freezing capacity, advantages and disadvantages of this modern method. Quick freezing of food products in a cryogenic freezer consist in the use of evaporation latent heat of the liquid nitrogen, as well as of the sensible heat of the vapors, whose temperature increase up to final temperature of the frozen product. The use of cryogenic freezing with liquid nitrogen and carbon-dioxide is regarded as the “centuries revolution” in the food area.*

Key words: *strawberries, freezing, liquid nitrogen*

1. Introduction

Freezing is the favorite modern mean for best preservation of nutrient properties of a large number of alimentary products, ensuring long term preservation.

Direct contact freezing using liquids (nitrogen or CO₂), is done either by sinking the product in a cold liquid or by spraying the product with this liquid.

The liquid can evaporate or not, but in either cases, the method has the main advantage of a great improvement of the heat transfer coefficient between the product to be frozen and the refrigerant.

Using cryogenic systems one can avoid the large investment required for a compression refrigeration system, using only from time to time cold delivery in the shape of the liquefied cryogenic fluid.

2. Require Freezing Time

Freezing is the process by which most of the water from the cellular liquid and the water from a product's tissues (capillary vases, intercellular spaces) is turned into ice. Water crystallization temperature ranges between -1...-5°C, at which 60...75% of the whole water content turns into solid. The process must be continued afterwards by subcooling the product to a final temperature of -18 -25°C, at which 90...95% of the water content turns into solid. Thermal core temperature is a main indicator of the end of the freezing process as it can be with maximum 3 5°C higher than the products' storage temperature.

International Institute of Refrigeration established the following conditions: final temperature of the products thermal core ≤ -15°C, average final temperature ≤ -18°C.

¹ University « Dunarea de Jos », Galati, Romania.

Freezing process of a food product is a typically transient heat and mass transfer process. Transfer phenomenon are complex due to the phase change of the solidifying water and of the transport properties of the product (thermal conductivity, specific heat.

Computing methods use some simplifying hypotheses which allow establishing some simple calculus relations for the freezing duration (according to Plank):

- all the heat is drawn from the product at the freezing point temperature;
- the products are homogenous and isotropic;
- the cooling surroundings has a constant temperature;
- the product has already been cooled down to the freezing temperature.

For a spherical shape product, freezing duration can be determined using Plank's formula [3]:

$$\tau_{cg} = \frac{\rho \cdot l_{cg}}{t_{cg} \cdot t_{mII}} \cdot \left(\frac{r_0^2}{6 \cdot \lambda} + \frac{r_0}{3 \cdot \alpha} \right) [s] \quad (1)$$

where:

$t_{cg} = -0,7$ [°C] - freezing temperature;

$t_{mII} = -150$ [°C] - cooling surrounding temperature (zone II);

$\alpha = 530$ [W/m²K] - convection coefficient;

$r_0 = 0,0075$ [m] - sphere radius;

$l_{cg} = 280,4$ [kJ/kg] - freezing latent heat of the product;

$\rho = 921$ [kg/m³] - product density;

$\lambda = 1,35$ [W/mK] - thermal conductivity of the product;

$$\tau_{cg} = 28,53 [s] = 0,5 (\text{min})$$

For freezing using liquid nitrogen the values for α are between 35 [W/m²K] (vapor precooling area) and 525...535 [W/m²K] (nitrogen liquid spraying area).

Total duration of the freezing process is:

$$\tau = \tau_r + \tau_{cg} + \tau_{sr} [s] \quad (2)$$

where:

τ_r [s] - primary refrigeration duration;

τ_{cg} [s] - freezing duration;

τ_{sr} [s] - product duration subcooling;

Primary refrigeration duration can be computed from the following relation:

$$\tau_r = \frac{m \cdot c}{\alpha \cdot s} \cdot \ln \frac{t_i - t_{ml}}{t_f - t_{ml}} [s] \quad (3)$$

where:

$m = \rho V$ [kg] - product mass;

$\rho = 921$ [kg/m³]; $V = \frac{4 \cdot \pi \cdot r_0^3}{3}$ [m³]

$$m = 1000 \cdot \frac{4 \cdot \pi \cdot 0,0075^3}{3} = 0,00174 \text{ kg}$$

$c = 3,852$ [kJ/kg] - product's specific heat;

$\alpha = 35$ [W/m²K] - convection coefficient;

$s = 4\pi r_0^2 = 0,000706$ [m²] - product's external surface;

$t_i = 25$ [°C] - product's initial temperature;

$t_f = -0,7$ [°C] - product's final temperature;

$t_{ml} = -60$ [°C] - cooling surrounding temperature (zone I);

$\tau_r = 90,92 [s] = 1,5 [\text{min}]$

The duration for subcooling of the frozen product to the final average temperature (t_{mf}) can be calculated using Plank's relation:

$$\tau_{sr} = 933 \cdot c_m \cdot n \cdot \left| \lg \frac{t_{cg} - t_{mIII}}{t_m - t_{mIII}} - 0,0913 \right| \quad (4)$$

$$\cdot \left(\frac{2 \cdot r_0}{\alpha} + \frac{r_0^2}{\lambda} \right) \cdot \frac{1}{3,6} (h)$$

where:

$c_m = 1,88$ [kJ/kgK] - frozen product average specific heat;

n - dimensionless coefficient, whose values depends on the Biot dimensionless group, defined by:

$$Bi = \frac{\alpha \cdot \delta}{\lambda} \quad (5)$$

where $\delta = r_0$.

Values for the dimensionless coefficient n vs. Bi

Table 1

Bi	0.2	0,25	0,5	1,0	2,0	4,0	10	∞
n	1.232	1,21	1,188	1,156	1,112	1,06	1,02	1,00

$Bi = 0,19 \approx 0,2 \Rightarrow n = 1,232$

The weight of a box of strawberries:

$t_{cg} = -4$ [°C] - freezing final temperature;
 $t_{mIII} = -80$ [°C] - cooling surrounding temperature (zone III);
 $t_m = -18$ [°C] - thermal core final temperature of the product;
 $\tau_{sr} = 0.0162$ [h]=58,32 [s]=1 (min)

$m = \rho \cdot V = 921 \cdot 0,000424 = 0,39$ [kg]

The boxes will be placed on a single row, as shown in Fig. 2:

$\tau_p = 11,76$ [s]

τ_p - time in which the product covers a distance equal to the length of the box;

Freezing process total duration is:
 $\tau_c = 3$ [min]

$\tau_n = \tau_c + (n-1) \tau_p$ (6)

Number of frozen boxes hourly is:

$n = 1 + \frac{\tau_n - \tau_c}{\tau_p} = 291,125$ [boxes /hour] (7)

The quantity of strawberries freezed hourly

$m_t = n \cdot m = 113.53$ [kg/h] (8)

3. Freezing Capacity

For freezing strawberries was used cryogenic freezer using liquid nitrogen designed and built by the author. Strawberries are placed in a plastic wrapping with the dimensions:

- L x W x H (mm):160x100x70;
- wrapping volume: 0,00112 m³;
- strawberries radius: r=7,5 mm;
- the number of the strawberries in a box: n_c= 240

The actual quantity of strawberries freezed hourly:

$m_r = \frac{160}{165} \cdot m_t = 110.098$ [kg/h] (9)

V- volume occupied by the strawberries in a box .

Hourly capacity for strawberries displaced in a single layer:

A sketch with strawberries displacement in a box is shown in Fig.1.

$\dot{m} = \frac{110}{4} = 27.5$ [kg/h] (10)

$V = \frac{4 \cdot \pi \cdot r^3}{3} \cdot n_c = 0,000424$ [m³] (6)

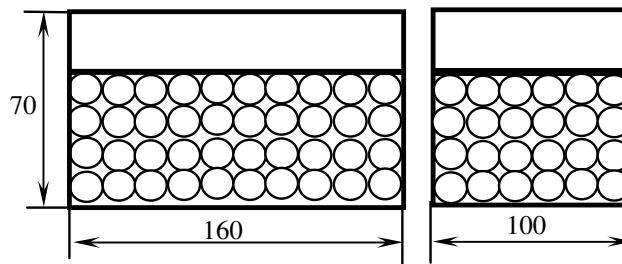


Fig. 1. Strawberries displacement in a box.

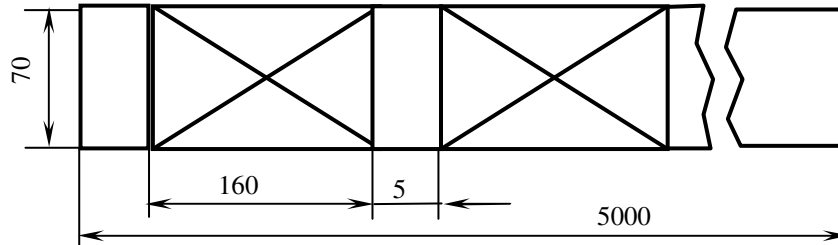


Fig.2 Placed boxes.

Economical aspects on freezing methods

Table 2

Objectives	UM	Freezing methods		
		fixed layer	fluidized bed	cryogenic fluids
Investment costs	%	100	100	50...66
Specific surface	m ² /t/h	40...60	15...35	10...25
Cooling need	10 ³ kcal/t	110...130	110...130	90...95
Required energy	kWh/t	110...130	100...120	-
Manual labor	%	67...470	100...2000	90...97

4. Conclusions

In order to make a comparison, in the following table are shown some economical parameters [4].

The main **advantages** of liquid nitrogen freezing are:

- simple design, small space required and easy cleaning
- short startup and freezing times,
- reduced weight losses,
- investment costs are with 50% smaller than for vapor compression systems, and there are no maintenance costs involved,
- the system can be used for various food products with no modifications,
- movable freezers can be designed.
- the liquid nitrogen is obtained as a auxiliary product in oxygen manufactory.

The main **disadvantage** of this freezing method is the high cost of liquid nitrogen, but considering that freezing cost accounts only for 5,3% of the product's price, one may disregard this disadvantage.

References

1. Damian, V., Vasilescu, C.: *Congelarea criogenică a produselor din carne*. Băila. Ed. Evrika, 1997.
2. Porneală, S., Porneala, C.: *Procese in instalatii frigorifice si pompe de caldura*, vol I. Galati. Ed. Fundatiei Universitare "Dunarea de Jos", 2004.
3. Porneală, S.: *Tehnica frigului si climatizării în Industria Alimentară*. Ed. Fund. Univ."Dunărea de Jos" Galați, 2000.
4. Radenco, V., Porneală S.: *Procese în instalații frigorifice*. București. Ed. Did. si Ped., 1983.