

6. ZAMRAŻANIE PRODUKTÓW SPOŻYWCZYCH

6.1. Teoretyczne podstawy zamrażania

6.1.1. Zamrażanie wody i roztworów

Zamrażaniem produktów żywnościowych nazywamy proces technologiczny pełnej lub częściowej zamiany wody zawartej w produkcie w lód (krystalizacji) oraz obniżenia temperatury produktu poniżej punktu krioskopowego. W czasie zamrażania obserwujemy w związku z wymianą ciepła zjawiska wtórne, polegające na przemieszczaniu się wody zawartej w produkcie w kierunku niższej temperatury, tzn. w kierunku powierzchni ciała. Zjawisko to jest o tyle zrozumiałe, że w środowisku ciekłym każda różnica ciśnienia, temperatury lub stężenia powoduje naturalny ruch cząsteczek w kierunku ich wyrównania. Ten ruch cząsteczek wody jest zjawiskiem, które decyduje o niekorzystnych zmianach w produkcie po zamrożeniu.

W początkowej fazie zamrażania wskutek odprowadzenia ciepła obserwujemy **przechłodzenie cieczy**. Poprzedza ono powstanie fazy stałej — krystalicznej. Woda i roztwory wodne po przechłodzeniu tworzą pewną uporządkowaną strukturę pseudokrystaliczną. Stopień przechłodzenia i trwałość stanu przechłodzenia zależą od wielu czynników; np. temperatura przechłodzenia wody zależna od stopnia czystości wody ulega obniżeniu w przypadku, gdy znajduje się ona w naczyniach włoskowatych. Wprowadzenie kryształ-zarodka do przechłodzonej wody narusza jej równowagę, ponieważ zaczyna się wzrost kryształów połączony z wydzielaniem ciepła zamrażania. Prędkość liniowa wzrostu kryształów jest tym większa, im większe jest przechłodzenie.

W produktach spożywczych woda nie występuje nigdy w stanie czystym, lecz w formie roztworów soli i związków organicznych, a ponadto część wody jest związana trwale w strukturach białek i wielocukrów. Czynniki te silnie wpływają na własności fizyczne wody oraz na proces jej zamrażania. Obecność w wodzie substancji, tworzących z nią roztwór o rozdrobnieniu cząsteczkowym, powoduje zmianę jej charakterystycznych punktów fizycznych i obniżenie temperatury krioskopowej zamrażania t_z , podniesienie temperatury wrzenia i obniżenie ciśnienia pary wodnej nad roztworem.

Obniżenie temperatury krioskopowej w stosunku do czystego rozpuszczalnika wyraża się wzorem Raoult'a:

$$\Delta t_z = -\varepsilon_{kr} \cdot nK$$

w którym: ε_{kr} — współczynnik charakterystyczny dla danego rozpuszczalnika, tzw. stała krioskopowa; dla wody $\varepsilon_{kr} = 1,86$ K/mol;
 n — stężenie molarne roztworu (w molach rozpuszczonej substancji na 1000 g rozpuszczalnika).

Stała krioskopowa zależy wyłącznie od cech rozpuszczalnika; rodzaj rozpuszczonej substancji nie ma na nią wpływu. Na temperaturę krioskopową roztworu nie ma wpływu obecność substancji o koloidalnym stopniu rozdrobnienia oraz substancji wysokocząsteczkowych, jak np. skrobia.

Początkowa temperatura krioskopowa dla większości naturalnych produktów spożywczych wynosi ok. -1°C . Zależy ona od stężenia roztworów w tkankach produktów. Im mniej jest wody w produkcie, a więcej soli mineralnych, cukrów, kwasów organicznych oraz innych rozpuszczalnych w wodzie związków organicznych, tym niższa jest początkowa temperatura krioskopowa. Gdy w rozcieńczonym roztworze tworzy się lód, to stężenie roztworu zwiększa się i obniża się stopniowo jego temperatura krioskopowa. Podczas zamrażania czystych roztworów proces ten kończy się osiągnięciem stężenia i temperatury eutektycznej. Roztwór eutektyczny została się jako jedna całość bez oddzielania się kryształów rozpuszczalnika i rozpuszczonych soli.

6.1.2. Proces krystalizacji

W technologii chłodniczej od dawna już przywiązuje się duże znaczenie do tworzenia kryształów lodu w zamrażanych produktach jako do drugiego (po temperaturze) z czynników wpływających na jakość produktów. Proces ten, jako zjawisko wtórne w stosunku do procesu obniżania temperatury, zależy od rodzaju surowca, który poddajemy zamrożeniu, oraz od prędkości przebiegu zamrażania. Szybkie zamrażanie, odznaczające się tworzeniem małych kryształów lodu, ma najwięcej zalet. Doświadczalnie stwierdzoną współzależność między prędkością zamrażania a przeciętną wielkością tworzących się kryształów interpretowano w różny sposób. Proponowane teorie z reguły opierano na założeniach powstawania zarodków kryształów

lub centrów krystalizacji w różnych częściach zamrażanego produktu oraz wzrostu oddzielnych kryształów z tych zarodków czy centrów. W praktyce w procesie zamrażania, przy intensywnym odprowadzaniu ciepła od powierzchni zamrażanego produktu, w jego zewnętrznych warstwach rozpoczyna się proces tworzenia lodu, podczas gdy warstwy leżące głębiej nie osiągnęły jeszcze temperatury krioskopowej i wskutek tego nie tworzą się w nich zarodki krystalizacji.

Rozprzestrzenianie się kryształów lodu od powierzchni do wnętrza zamrażanego produktu zachodzi z pewną prędkością zwaną prędkością zamrażania, która określa prędkość odprowadzenia ciepła (jeśli tylko nie będą przeszkadzać takiemu rozprzestrzenianiu się rosnące kryształy lodu). Takie przedstawienie zjawiska jest zgodne z teorią przesuwaną się granicy rozdziału fazy stałej (lodu) i ciekłej (roztworu — np. soku komórkowego) i jest podstawą do matematycznego obliczenia czasu zamrażania.

6.1.3. Wielkość i rozmieszczenie kryształów lodu

Prędkość zamrażania wpływa zarówno na ilość powstających zarodków kryształów lodu jak i wzrost tych kryształów i ich charakterystyczną formę. W praktyce zamrażalniczej spotyka się trzy podstawowe typy kryształów. Są to:

- kryształy regularne *h e k s a g o n a l n e* (o podstawie sześciokątnej), w których osie symetrii wyprowadzone z zarodka krystalizacji tworzą między sobą kąt 60° . Kryształy takie powstają podczas bardzo powolnego zamrażania;
- kryształy nieregularne tzw. dendryty, które powstają podczas średnioszybkiego i szybkiego zamrażania; z ich zarodków krystalizacji wychodzi nie sześć, lecz znacznie więcej osi kryształów, tworzących między sobą różne kąty;
- kryształy kuliste tworzące się podczas szybkiego i ultraszybkiego zamrażania; z poszczególnych zarodków wychodzi bardzo wiele cienkich igieł lodowych, które w zewnętrznym zarysie przybierają kształt kuli; przy bardzo dużej prędkości zamrażania igły te stają się coraz cieńsze, aż w końcu niewidoczne i kryształy stają się przezroczyste. Podczas powolnego zamrażania roztworów wodnych w ich warstwach

zewnętrznych tworzy się czysty lód, natomiast substancje rozpuszczone przechodzą w głąb naczynia i w jego części środkowej powstaje lód naj-

bogatszy w te substancje. Im szybciej przeprowadza się zamrażanie, tym bardziej jednorodny skład ma utworzony lód. Zjawisko to można zaobserwować, używając do doświadczenia zabarwionej wody. Zabarbioną wodę wlewamy do dwu jednakowych naczyń. W jednym naczyniu zamrażamy wodę powoli, w drugim szybko. Łatwo zauważyć, że przy powolnym zamrażaniu lód nie jest zabarwiony przy ściankach naczynia, natomiast jest silnie zabarwiony w środkowej jego części. W naczyniu, w którym zamrażanie przeprowadzono szybko, lód ma prawie równomierne zabarwienie w całej objętości.

Przemieszczanie się rozpuszczonych substancji w trakcie zamrażania do roztworu jest spowodowane zjawiskiem dyfuzji. Kiedy zaczyna się zamrażanie cieczy, w warstwie zewnętrznej krzepnie rozpuszczalnik i tworzy się lód. Wskutek tego warstwa cieczy, przylegająca bezpośrednio warstwy utworzonego lodu, wyróżnia się większym stężeniem rozpuszczonych substancji w porównaniu ze stężeniem ich w wewnętrznej części naczynia. Różnica stężeń wywołuje wymianę dyfuzyjną.

6.1.4. Rekrystalizacja

Jeszcze do niedawna uważano, że zamrożony produkt jest stabilny i nie ulega zmianom aż do momentu topnienia. Badania mikroskopowe zamrożonych preparatów wskazują na istnienie wielu różnych form przemian struktury krystalicznej, które określa się ogólnie mianem rekrystalizacji.

W czasie zamrażania ultraszybkiego roztwór zamrożony w formie przezroczystych kryształów kulistych po pewnym czasie matowieje. W czasie zamrażania żywności, przy stosowanych powszechnie parametrach zamrażania, powstają struktury nieregularnych dendrytów, które też są formą bardzo nietrwałą. W miarę podwyższania temperatury kryształy przyjmują strukturę gruboziarnistą, by w końcu połączyć się w monolityczne płyty lodu. Proces ten, powolny w niskich temperaturach, w miarę zbliżania się do punktu krioskopowego szybko narasta.

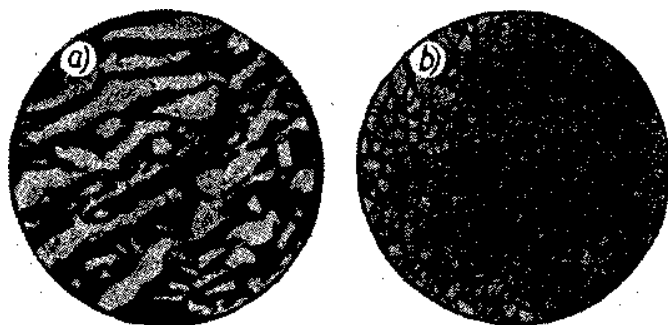
Rekrystalizację określa się jako proces stałego wzrostu kryształów w wyniku wędrówki cząsteczek wody od zanikających kryształów małych do dużych. Jako przyczynę tego zjawiska podaje się fakt istnienia wyższego ciśnienia pary wodnej nad powierzchnią małych kryształów w porównaniu do dużych kryształów. Stąd cząstki wody sublimują nad powierzchniami małych kryształów i resublimują na powierzchni dużych kryształów. Ponadto w czasie

składowania przyczyną tego zjawiska jest fakt wahań temperatury. W czasie wzrostu temperatury topnieją najpierw małe kryształy, które mają niższy punkt krioskopowy, przy ponownym zaś obniżeniu się temperatury powstała uprzednio woda zamraża już wokół kryształów dużych. Wprawdzie obniżenie temperatury składowania i ograniczenie jej wahań bardzo zmniejsza procesy rekryształizacji, to jednak całkowite ich zahamowanie jest możliwe jedynie w temperaturze poniżej eutektycznej, która dla roztworów biologicznych (żywności) wynosi ok. -56°C .

6.2. Zamrażanie produktów roślinnych i zwierzęcych

6.2.1. Szybkie zamrażanie

Badania rozmieszczenia kryształów lodu w zamrożonych produktach o różnej budowie wykazały określoną zależność między prędkością zamrażania z jednej strony, a rozmiarami i rozmieszczeniem lodu z drugiej. Przy powolnym zamrażaniu w przestrzeniach międzykomórkowych oraz między włóknami produktu tworzą się duże kryształy lodu w następstwie przechodzenia do tych przestrzeni soku komórkowego. Wskutek odwodnienia komórek następuje ścinanie się białka, a po rozmrożeniu produktu zamrażanego powoli obserwujemy duże wycieki soku komórkowego. Ma to szczególnie duże znaczenie w zamrażaniu produktów zwierzęcych. Podczas szybkiego zamrażania liczba kryształów jest znacznie większa, a ich rozmiary mniejsze (rys. 6-1). Kryształy mieszczą się więc wewnątrz komórek i nie niszczą dzięki temu ścianek tkanki.

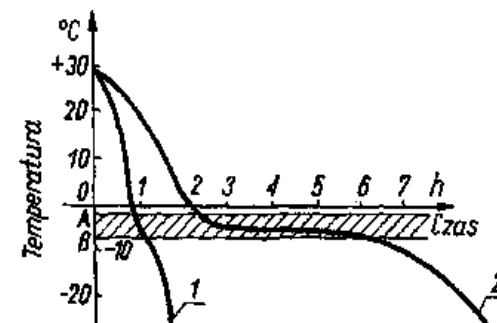


Rys. 6-1. Obraz mikroskopowy komórek przy wolnym i szybkim zamrażaniu; poprzeczny przekrój tkanki ryby zamrożonej w temperaturze: a) $\sim 5^{\circ}\text{C}$ (powiększenie 120-krotne), b) -25°C (powiększenie 50-krotne)

Szybkie zamrażanie ma poważną przewagę nad powolnym. Jego istotą jest możliwie szybkie przejście przez strefę maksymalnego wzrostu kryształów (rys. 6-2), tzn. przez zakres temperatury $-1 \div -5^{\circ}\text{C}$. Prędkość wzrostu kryształów osiąga maksimum tuż poniżej temperatury krioskopowej, po czym maleje do zera. Powodem tego zjawiska jest brak tzw. *homogenicznych zarodków krysz-talów*, powstających w samej cieczy.

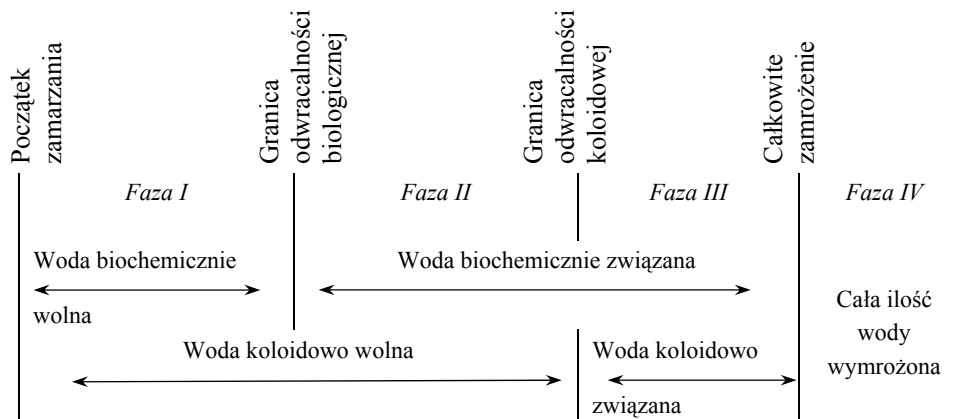
Tworzą się one dopiero w temperaturze poniżej -30°C . Wyjaśnia to m.in. zjawisko przechłodzenia czystych cieczy i roztworów. Gdy jednak do takiej przechłodzonej cieczy zostaną wprowadzone ciała obce, np. cząstki kurzu, następuje gwałtowna krystalizacja. Taka krystalizacja nosi nazwę *heterogenicznej*.

Przy szybkim zamrażaniu istnieje większa szansa odwracalności procesu zamrażania, tzn. powrotu produktu po rozmrożeniu do pierwotnego stanu.



Rys. 6-2. Przebieg wolnego i szybkiego zamrażania produktów spożywczych 2 — krzywa obniżania się temperatury podczas szybkiego zamrażania, 1 — krzywa obniżania się temperatury podczas wolnego zamrażania, A—B — strefa maksymalnego powstawania kryształów lodu

Odwracalność zależy również od ilości wymrożonej wody (głębokości zamrażania) i stężenia soli, wchodzących w skład komórek produktu. Przy dużym stężeniu soli może nastąpić wytrącenie się koloidalnych substancji białkowych w komórkach i wówczas proces zamrażania jest nieodwracalny. Ma to miejsce wtedy, gdy wymrożeniu ulega choćby część wody koloidowo związanej. Według danych doświadczalnych największe uszkodzenie koloidowej struktury białek występuje w temperaturze $-4^{\circ} \div -6^{\circ}\text{C}$ przy powolnym zamrażaniu. Pewne pojęcie o wpływie temperatury zamrażania na odwracalność procesu daje schemat przedstawiony na rys. 6-3. W schemacie tym, ukazującym fazy zamrażania, cały zakres temperatury zamrażania dzieli się umownie na 4 części. Im bardziej dana część jest oddalona od temperatury początkowej zamrażania, tym mniejsza jest odwracalność procesu



Rys. 6-3. Schemat kolejnych faz wymrażania wody w produktach spożywczych

Dla mięsa, wg schematu faz zamrażania, podaje się następujące przybliżone zależności między wartościami temperatury, do których zamrażany jest produkt, a ilością wymrożonej wody:

$t^{\circ}\text{C}$	-1	-2,5	-25	-60
% wymrożonej wody	0	60	90	100

Podane wartości mają charakter orientacyjny i stanowią próbę ilościowego podejścia do procesów, które jakościowo są przedstawione na schemacie faz zamrażania.

Wszystko to potwierdza celowość szybkiego zamrażania, jednak bez stosowania zbyt niskiej temperatury, która powoduje koloidową i biochemiczną nieodwracalność procesu zamrażania.

6.2.2. Temperatura krioskopowa

Wykres przedstawiony na rys. 6-2 różni się od podobnych wykresów zamrażania czystych roztworów fizycznych, proces zamrażania bowiem systemów biologicznych, jakie stanowi żywność, przebiega nieco odmiennie. Temperatura krioskopowa — stała dla roztworów fizycznych nie jest stałą dla

systemów biologicznych. Temperatura zamarzania soku komórkowego (krioskopowa) produktów roślinnych i zwierzęcych leży poniżej 0°C i zawiera się w granicach od $-0,5^{\circ}\text{C}$ do -4°C (a serów, np. sera roquefort, wynosi nawet $-15,7^{\circ}\text{C}$). (Temperatura krioskopowa zależy od ciśnienia osmotycznego panującego w komórkach roślinnych i zwierzęcych, a to z kolei zależy od ilości cząsteczek związków chemicznych i jonów w roztworze. Zgodnie z prawem Raoult'a obniżenie temperatury wynosi dla roztworów wodnych $1,853 \text{ K/mol}$. Oznacza to, że jeden mol związku rozpuszczony, w jednym litrze wody obniża temperaturę z 0°C do $-1,853^{\circ}\text{C}$. W roztworze takim przy 0°C i ciśnieniu zewnętrznym 100 kPa panuje ciśnienie osmotyczne $2,24 \text{ MPa}$. Warto zauważyć, że żywe tkanki charakteryzuje niższa początkowa temperatura krioskopowa niż tkanki martwe lub np. wyciśnięte soki.

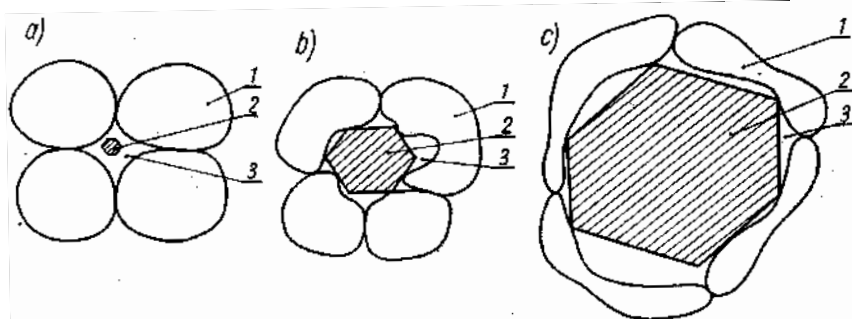
W miarę wymrażania coraz większej ilości wody i wzrostu stężenia pozostałego roztworu temperatura krioskopowa stopniowo obniża się i jednocześnie wydziela się utajone ciepło zamarzania wody wynoszące $335,2 \text{ kJ/kg}$. W czasie zamrażania żywności nie obserwujemy w zasadzie zjawiska przechłodzenia, tkankowa budowa bowiem produktów roślinnych i zwierzęcych, z rozbudowaną powierzchnią ścianek komórkowych i licznymi zawiesinami w treści komórek, stwarza wiele dogodnych zarodków krystalizacji. Osiadające na powierzchni produktów kryształy szronu stanowią również zarodki krystalizacji. Wyjątek stanowią jaja, które dzięki skorupie i błonie chroniącej białko przed przedostawaniem się do niego z zewnątrz kryształów-zarodków można przechowywać w stanie przechłodzonym.

6.2.3. Zmiany w tkankach

Zamrażanie tkanek roślinnych i zwierzęcych wywołuje zmiany właściwości błony komórkowej. Traci ona zdolność półprzepuszczalności, a po rozmrożeniu tkanka traci turgor, jest wiotka, sok wycieka, komórki tracą nieodwracalnie zdolność do kurczenia się lub pęcznienia pod wpływem roztworów hipertonicznych lub hipotecznych. Również dość często tkanka bywa uszkodzona mechanicznie przez kryształy lodu.

Zjawisko odwodnienia mrożonego roztworu komórkowego jest spowodowane właściwościami półprzepuszczalnymi błony komórkowej. Komórki zawierające roztwór hipertoniczny tracą swą wodę na rzecz kryształów lodu tworzących się w przestrzeniach międzykomórkowych. Następuje tzw. *kriooosmoza* lub *kriokoncentracja*. Przebieg i rozmiary tego procesu zależą

głównie od prędkości zamrażania. Jeżeli zamrażanie przeprowadza się powoli, to odwodnienie komórek prowadzi do utraty całej ilości wolnej wody i wewnątrz komórek pozostaje tylko woda związana. Powstają duże kryształy lodu, które przenikają nieraz przez dziesiątki komórek, niszcząc ich ścianki i strukturę wewnętrzną. W tak zamrożonej tkance cała ilość lodu znajduje się poza komórkami, a wewnątrz zwiędniętych (ale tych nie uszkodzonych) komórek znajduje się niezamarznięty roztwór (rys. 6-4). Zanik półprzepuszczalności błon komórkowych roślin i osłony plazmatycznej komórek zwierzęcych spowodowany denaturacją białek pod wpływem coraz bardziej stężonego soku komórkowego powoduje wspomniane wiotczenie tkanek i wyciekanie soku przy rozmrożeniu.



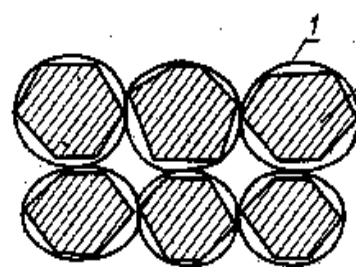
Rys. 6-4. Schemat krystalizacji lodu w przestrzeniach międzykomórkowych podczas mrożenia powolnego: a) początek krystalizacji, b) wzrost kryształu, c) zniszczenie struktury tkankowej
1 — komórka, 2 — kryształek lodu, 3 — przestrzeń międzykomórkowa

Liczne doświadczenia wykazują, że prędkość zamrażania w mniejszym stopniu wpływa na jakość owoców i warzyw po rozmrożeniu i obróbce cieplnej, niż na jakość mięsa, ryb czy drobiu, które są szczególnie podatne na odwodnienie (tzw. *kriodehydratacja*).

6.2.4. Wpływ stanu tkanki na krystalizację

Na proces tworzenia się kryształów lodu ma wpływ nie tylko tempo zamrażania, ale również:

- stan fizjologiczny tkanki, zależny od czasu, jaki upłynął od uboju (połowu) do rozpoczęcia procesu zamrażania,
- zawartość kwasu mlekowego i stopień dojrzałości mięśni, a w przypadku produktów roślinnych — stadium dojrzałości surowca.



Rys. 6-5. Schemat krystalizacji lodu w komórkach podczas szybkiego zamrażania
1 — komórka, 2 — kryształ lodu.

Natychmiast po uboju (połowiu), jak i roślinne, zamrażane natychmiast po zbiorze, mają kryształy lodu wewnątrz komórek (podobnie jak to ogólnie ma miejsce przy szybkim zamrażaniu — rys. 6-5). Fakt ten stwierdzono doświadczalnie na przykładzie dorszy zamrożonych w stanie żywym po złowieniu, wołowiny —• tuż po uboju oraz młodych kalafiorów i zielonego groszku.

Stare komórki roślinne mają duże wodniczki (wakuole), w których woda krystalizująca podczas zamrażania powoduje rozrywanie cienkiej błony cytoplazmatycznej otaczającej wodniczkę, a także błony komórkowej. Następuje to w wyniku 8% wzrostu objętości kryształów lodu w stosunku do pierwotnej objętości wody.

6.3. Ilość wymrożonej wody

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że tkanka mięsna zwierząt stałocieplnych oraz ryb zawiera wodę w ilości 0,35-r-0,39 kg na 1 kg suchej substancji. Woda ta nie zamarza w temperaturze — 40°C, a nawet w niższych temperaturach. W miarę obniżania temperatury produktu względna ilość wody wymrożonej a , wyrażona jako stosunek masy lodu m_l do ogólnej masy wody i lodu ($m+r_{rii}$) wzrasta od wartości $w = 0$ w początkowej temperaturze krioskopowej do wartości $co = 1$, czyli 100%, przy całkowitej zamianie wody w lód. Ilość wody wymrożonej w danej temperaturze można obliczyć wg prawa Raoult-Czizowa

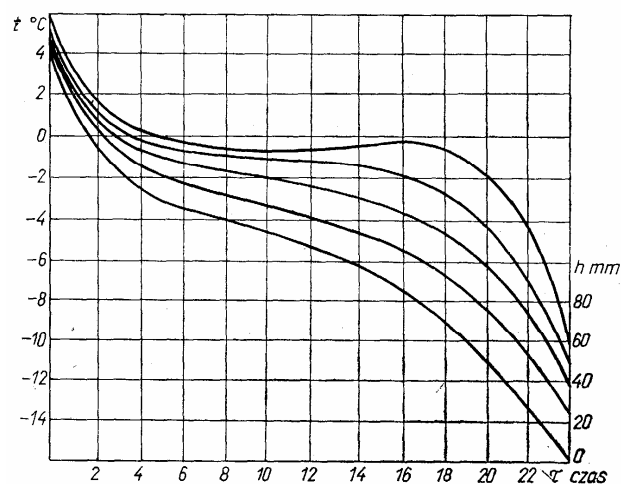
$$\omega_t = 1 - \frac{t_z}{t} \quad (6.2)$$

w którym: ω_t — względna ilość wody wymrożonej w temperaturze t ,
 t_z — temperatura krioskopowa (zamarzania) produktu w °C, t — średnia końcowa temperatura produktu w °C.

Efektym wymrożenia wody są znaczne zmiany własności fizycznych i mechanicznych produktów (patrz rozdz. 4.4). Ponadto na skutek wzrostu objętości wody podczas zamarzania objętość produktów rośnie o ok. 6% (zamiast 8%), co świadczy o tym, że w strukturze tkanek istnieją wolne przestrzenie, które wypełnia lód powstający z zamarzającej wody.

6.4. Wykresy temperaturowe procesu zamrażania

W zrozumieniu zjawisk zachodzących podczas zamrażania żywności pomocne są wykresy temperaturowe, określające zależność między czasem i temperaturą w wybranym punkcie zamrażanego produktu. Jako przykładem posłużymy się wzorcowymi wykresami zamrażania płyt żelu agarowego, zbliżonego swym składem chemicznym do żywności (rys. 6-6).



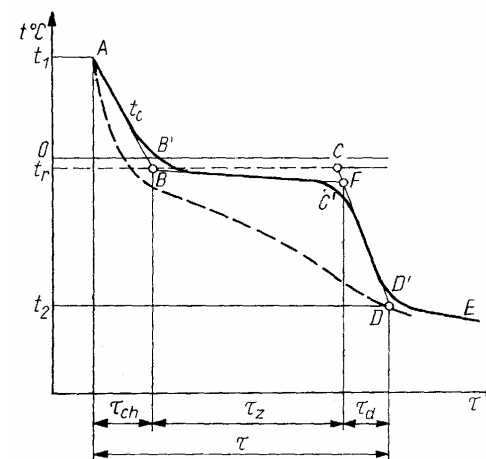
Rys. 6-6. Wykresy temperaturowe zamrażania płytek żelu agarowego grubości $h = 160$ mm, przedstawiające zmiany temperatury w różnych odległościach od powierzchni płytek

Pomiaru dokonano na powierzchni produktu ($h = 0$) oraz w odstępach co 20 mm od powierzchni w kierunku środka płytki (do $h = 80$ mm). W pierwszym okresie zamrażania temperatura obniża się we wszystkich warstwach produktu. Dalszy spadek temperatury jest powolniejszy, co najbardziej uwidacznia się w środkowej warstwie ($h = 80$ mm). W końcowym okresie zamrażania następuje powtórne przyspieszenie spadku temperatury.

Z wykresów wynika, że temperatura jest w każdej chwili najniższa na powierzchni produktu i coraz wyższa w miarę zbliżania się do jego środka termicznego. Można to wyjaśnić następująco: kiedy warstwa powierzchniowa produktu dostatecznie się ochłodzi i zaczyna się w niej wymarzać wody, wówczas dalsze obniżanie się temperatury tej części jest hamowane wydzielaniem się ciepła topnienia. Jednocześnie wewnątrz produktu zachodzi dalsze ochładzanie, a granica między warstwami, w których utworzył się już lód, a tymi, w których krzepnięcie jeszcze się nie zaczęło, przesuwa się w kierunku od powierzchni ku środkowi płytki i to tym szybciej, im bardziej intensywne jest odprowadzenie ciepła od produktu. Zamarzanie w głębszych warstwach może nastąpić dopiero wówczas, kiedy w warstwach zewnętrznych wymarzała już znaczna ilość wody i zmniejszyło się wydzielanie ciepła topnienia.

Podczas zamrażania temperatura produktu w różnych punktach i różnych warstwach pozostaje nierównomierna. Stan końcowy procesu określa **średnia końcowa temperatura produktu**. Ustala się ją po zakończeniu zamrażania. Po upływie pewnego czasu w produkcie dokonuje się wewnętrzna wymiana ciepła i wyrównanie temperatury. Wymiana ta zachodzi dość szybko dzięki wzrastającej przewodności cieplnej λ_i i dyfuzyjności cieplnej a_i .

Powyższe i liczne inne badania modelowe przebiegu zamrażania umożliwiają przedstawienie schematycznego przebiegu tego procesu, pokazanego na rys. 6-7. Krzywa ciągła przedstawia przebieg zmiany temperatury termicznego środka ciała t_c . Teoretycznie powinna ona zmieniać się zgodnie z linią przerywaną łamaną $A-B-C-D$ (jak dla czystej wody lub roztworów jednorodnych). W rzeczywistości jest to krzywa łagodnie zaokrąglona, a odcinek $B'-C'$ nie pokrywa się z linią



Rys. 6-7. Typowy wykres krzywych zamrażania produktów żywnościowych [13] t_c — krzywa temperatury środka termicznego, linia przerywana — krzywa temperatury powierzchni ciała

początkowej temperatury krioskopowej t_{kr} . W miarę postępowania zamrażania rośnie stężenie składników soku komórkowego i temperatura krioskopowa obniża się i dlatego odcinek B'—C' odchyła się od linii poziomej. Cały proces zamrażania można umownie podzielić na:

- schładzanie do temperatury t_{kr} , co odpowiada odcinkowi A—B',
- właściwe zamrażanie, co odpowiada odcinkowi B'—C',
- domrażanie do temperatury końcowej t_z (odcinek C'—D').

Jako koniec fazy właściwego zamrażania przyjmuje się (wg Rjutowa) temperaturę -4°C , co dla większości produktów odpowiada zamrożeniu ok. 73% wolnej wody (punkt F). Pozostałe 27% wolnej wody zamraża na odcinku C—D', głównie w jego początkowej części. Potem krzywa staje się bardziej stroma (coraz większe λ_t i mniejsze a_t) i zamrażają już tylko niewielkie ilości wody.

6.5. Prędkość zamrażania

Wielkość tę można określić jako prędkość przesuwania się granicy podziału między zamrożoną i nie zamrożoną w tkance wodą w kierunku od powierzchni do środka zamrażanego ciała. Prędkość zamrażania nie jest stała, lecz zmienia się wraz z odległością od powierzchni zewnętrznej. W warunkach stałej temperatury środowiska odbierającego ciepło i stałej przejmowalności energii cieplnej przez powierzchnię produktu prędkość zamrażania ma największą wartość na początku procesu na powierzchni i maleje w miarę przesuwania się granicy podziału do wnętrza produktu

W praktyce zamrażalniczej operuje się zwykle pojęciem średniej liniowej prędkości zamrażania:

$$\bar{w} = \frac{\delta}{\tau_z} \frac{\text{cm}}{\text{h}}$$

w którym: \bar{w} — średnia prędkość zamrażania, tj. stosunek grubości zamrożonej warstwy δ w cm do czasu jej zamrożenia τ_{zH}

Po zakończeniu zamrażania grubość d oznacza odległość termicznego środka produktu do oziębianej powierzchni. Termiczny środek produktu jest to punkt najpóźniej zamrażający, czyli o najmniejszej prędkości zamrażania. Dla ciał jednorodnych punkt ten pokrywa się ze środkiem geometrycznym.

W zależności od prędkości procesu zamrażania dzielimy na:

- *powolne*, gdy prędkość wynosi $0,1 \div 1$ cm/h,
- *intensywne*, gdy prędkość wynosi $1 \div 5$ cm/h,
- *szybkie*, gdy prędkość wynosi $5 \div 20$ cm/h.

Zgodnie z ustaleniami Międzynarodowego Instytutu Chłodziarstwa (MICH) wprowadzono ponadto następujące normatywne definicje związane z prędkością i czasem zamrażania:

Nominalny czas zamrażania jest to czas konieczny do obniżenia temperatury produktu o określonym kształcie od jednolitej początkowej temperatury 0°C do temperatury -15°C w jego środku termicznym. Czas ten oznacza się symbolem $T(0, -15^{\circ}\text{C})$.

Efektywny czas zamrażania jest to czas konieczny do obniżenia temperatury produktu o określonym kształcie od jednolitej średniej temperatury początkowej t_{sl} do określonej przez technologię temperatury efektywnej t_e w środku termicznym produktu.

Nominalna prędkość zamrażania jest to stosunek połowy grubości produktu, mierzonej przez środek termiczny ciała, do nominalnego czasu zamrażania.

Efektywna prędkość zamrażania jest to stosunek połowy grubości produktu, mierzonej przez środek termiczny ciała, do efektywnego, czasu zamrażania.

Czas zamrażania

W technologii chłodziarzej najczęściej stosuje się rozwiązanie problemu zamrażania opracowane przez R. Pianka w 1913 roku, a następnie rozwinięte przez wielu innych badaczy. Rozwiązanie to stało się klasyczne dla technologii chłodziarzej, a wynikające z niego wzory na czas zamrażania są znane powszechnie jako wzory Pianka. Międzynarodowy Instytut Chłodziarstwa w swoich zaleceniach uznaje ich stosowanie, gdyż odchylenia obliczonych czasów zamrażania od danych doświadczalnych wynoszą: $\pm 5\%$ dla płaskich płyt, $\pm 7\%$ dla form kulistych i walcowych, $\pm 10\%$ dla form prostopadłościennych, co jest wystarczającą dokładnością. W celu przybliżonego obliczenia całkowitego czasu zamrażania MICH zaleca stosowanie wzoru uproszczonego, który operuje wartościami entalpii

początkowej i końcowej produktu. Całkowity czas zamrażania wyraża się wtedy następująco:

$$\tau = \frac{\Delta i_s \cdot \rho_{sz}}{2 \cdot B \cdot \Delta T_{kr}} \cdot \left(\frac{l}{\alpha} + \frac{l^2}{4 \cdot \lambda_{sz}} \right)$$

gdzie: $\Delta i_s = i_{s1} - i_{s2}$ — różnica entalpii produktu między temperaturą początkową t_{s1} i końcową t_{s2} w kJ/kg,

$\Delta T_{kr} = (t_{kr} - t_m)$ — średnia różnica temperatury między temperaturą krioskopową produktu i temperaturą środowiska (medium) chłodzącego w °C,

l — grubość produktu w kształcie płyty lub grubość tuszy w biodrze (mierzona przez środek termiczny ciała) w m,

ρ_{sz} — gęstość właściwa produktu w stanie zamrożonym w kg/m³,

B — współczynnik zależny od kształtu ciała, który dla płyty wynosi 1, dla walca — 2 i dla kuli — 3,

α — przejmowalność energii cieplnej od powierzchni produktu do środowiska (medium) chłodzącego w W/(m² · K),

λ_{sz} — przewodność cieplna właściwa produktu w stanie zamrożonym w W/(m · K).

Cykle zamrażania nazywamy czas, który upływa od chwili rozpoczęcia załadunku zamrażalni świeżym produktem do chwili zakończenia wyładunku towaru już zamrożonego i ewentualnie oczyszczenia i odtajania pomieszczenia zamrażalni (komory, tunelu, aparatu zamrażalniczego), tj. do momentu, w którym można rozpocząć załadunek nowej partii produktu.

Wpływ różnych czynników na czas zamrażania - sposoby intensyfikacji procesu zamrażania

Z treści zawartych w rozdz. 6.2 wynika bezsporna wyższość szybkiego zamrażania nad zamrażaniem powolnym. Dlatego najprostszym rozwiązaniem byłoby obniżenie temperatury środowiska chłodzącego (medium) przez zastosowanie bardzo niskiej temperatury wrzenia czynnika chłodniczego. Takie rozwiązanie jest jednak bardzo kosztowne i energochłonne i dlatego z reguły nie jest zalecane. Współczesne metody szybkiego zamrażania opierają się na znajomości i racjonalnym wykorzystaniu zasad fizyki przy doborze parametrów procesu zamrażania oraz postępu techniki i technologii przy doborze odpowiedniej aparatury zamrażalniczej. Czas zamrażania (a więc i prędkość procesu) zależy od: czynnej różnicy temperatury, wymiarów i kształtu zamrożonego produktu,

przejmowalności energii cieplnej $\langle x \rangle$ od produktu do środowiska (medium) chłodzącego, przewodności właściwej produktu X i wreszcie od opakowania produktu.

Czynna różnica temperatury ΔT_{kr} między zamrażanym produktem i środowiskiem chłodzącym odgrywa szczególnie dużą rolę w klasycznych zamrażalniach owiewowych, w których przejmowalność a jest na ogół mała, zależna od prędkości przepływu powietrza. W zamrażalniach tych znaczne skrócenie czasu zamrażania uzyskuje się głównie przez obniżenie temperatury powietrza. We współczesnych zamrażalniach owiewowych wymaganą temperaturę powietrza -35÷-40°C uzyskuje się przy bardzo niskiej temperaturze wrzenia czynnika, wynoszącej -40÷-45°C, co wiąże się z dużym zapotrzebowaniem energii na jednostkę produktu i znacznym obniżeniem wydajności sprężarek. W pozostałych typach zamrażalni (kontaktowych, immersyjnych a nawet fluidyzacyjnych) charakteryzujących się dużymi wartościami przejmowalności a , zwiększenie różnicy temperatury nie wpływa w sposób istotny na skrócenie czasu zamrażania, stąd ze względu na oszczędności energetyczne są stosowane wyższe temperatury wrzenia czynnika chłodniczego i środowiska chłodzącego.

Wymiary i kształt zamrażanego produktu. Na czas zamrażania wpływa przede wszystkim grubość zamrażanego ciała l lub d . Pozostałe wymiary są mniej ważne. Szczególnie przy większych grubościach wpływ ten staje się dominujący, gdyż czas zamrażania rośnie proporcjonalnie do l^2 i d^2 . Bardzo istotny jest również kształt ciała. Jeżeli w tych samych warunkach zamrażania (oziębienie ze wszystkich stron) będzie się znajdować płyta o grubości l oraz walec i kula o średnicy d , to stosunek odpowiednich prędkości i czasów zamrażania wyniesie:

$$\omega_{\text{płyty}} : \omega_{\text{walca}} : \omega_{\text{kuli}} = \tau_{\text{płyty}} : \tau_{\text{walca}} : \tau_{\text{kuli}} = 1 : 2 : 3$$

Czas zamrażania płyty jest w tych samych warunkach 2-krotnie dłuższy niż walca i 3-krotnie dłuższy niż kuli. Dlatego gdy mamy do czynienia z drobnymi ciałami (jagody, porzeczki, groszek itp.), to bardziej celowe jest zamrażanie indywidualne — fluidyzacyjne (IQF), zapewniające chłodzenie na całej powierzchni każdego ziarna, niż np. zastosowanie aparatów płytowych (kontaktowych) lub klasycznych tuneli owiewowych z produktem na tacach lub sitach, w których ciepło jest odbierane tylko na niewielkiej powierzchni ziarn stykających się z płytami lub opływającym je powietrzem. W tym drugim przypadku nie można stosować wzoru dla kuli o średnicy d ,

lecz należy stosować wzór dla płyty o grubości l , gdzie l jest wielokrotnie większe od d .

Dzięki zastosowaniu zamrażania indywidualnego (aparaty fluidyzacyjne) uzyskuje się ponadto silny wzrost wartości α i w rezultacie 25÷100-krotne skrócenie czasu zamrażania oraz 8÷12-krotny wzrost wskaźnika wydajności aparatu. Ta forma zamrażania, najkorzystniejszą pod względem termodynamicznym, jest równocześnie najmniej pracochłonna i zapewnia prostą organizację i obsługę linii produkcyjnej. W przypadku innych produktów niż owoce i krojone warzywa w stanie sytkim, np. filetów rybnych, mięsa porcjowanego w blokach, dąży się obecnie do zamrażania w formie płyt w aparatach kontaktowych przy możliwie jak najmniejszej grubości Z . Filety rybne, na przykład, zamrażane dawniej w blokach o grubości 50 mm zamraża się obecnie w formie płyt o grubości 18÷25 mm, co skraca czas zamrażania ok. 5,5-krotnie. Czasem jednak odchodzi się od metod racjonalnego zamrażania w celu uzyskania ważnych korzyści w organizacji produkcji i obrotu. Przykładowo drób mrożono dawniej w tunelach owiewowych luźno, w pojemnikach z drutu, dzięki czemu strumień powietrza docierał swobodnie do każdej sztuki i czas zamrażania, np. kurcząt, wynosił zgodnie ze wzorem dla kuli ok. 2 h. Dziś świeży drób układa się ciasno w kartonach (po 11 kg) — tworzy on zwartą płytę grubości 100÷140 mm — i w tej formie zamraża się w tunelu owiewowym. Otwarty karton zapewnia intensywną wymianę ciepła jedynie z jednej strony płyt i w rezultacie nawet przy bardzo energochłonnym obniżeniu temperatury wrzenia czynnika do -50°C czas zamrażania kurcząt wzrasta 2-krotnie, a wydajność aparatu znacznie spada. Zyskiem takiej organizacji procesu zamrażania jest jednak daleko idące usprawnienie linii technologicznej i zwartość zamrożonego ładunku. W zakładach drobiarskich o dużej wydajności i zmechanizowanych przeladunkach są to wymagania podstawowe.

Przejmowalność energii cieplnej i przewodność cieplna właściwa. Prędkość zamrażania żywności zależy od wartości przejmowalności od środowiska zamrażanego do zamrażającego. Zależy ona również od przewodności właściwej produktu λ_{sz} i grubości ciała (l lub d).

Wartości przejmowalności α wahają się w bardzo szerokich granicach, zależnie od typu aparatu zamrażalniczego i zastosowanej metody mrożenia, co ilustruje poniższa tabela.

Metoda zamrażania	α [W/(m ² ·K)]
Komora gęsto załadowana, znikoma wentylacja	3÷4
Tunele owiewowe ze słabą wentylacją: $v = 1\div3$ m/s	8÷15
Tunele owiewowe z silną wentylacją: $v = 3\div8$ m/s; aparaty owiewowe specjalne z ukierunkowanym strumieniem powietrza (automatyczne zamrażalnie stelażowe, aparaty spiralne)	20÷40
Zamrażalnie fluidyzacyjne	100÷140
Aparaty kontaktowe	500÷1000
Zamrażalnie immersyjne, ruch roztworu:	
słaby	300÷400
silny	500÷700
Aparaty LNF i LFF (natrysk ciekłego azotu lub freonu)	1000÷2000

Mrożenie żywności w zamrażalni owiewowej (tunelowej) przy bardzo silnej wentylacji tusz mięsnych, produktów opakowanych w skrzynki, kartony itp. przebiega tym intensywniej, im większa jest prędkość przepływu powietrza w wolnym przekroju zamrażalni. Między przejmowalnością cieplną α a prędkością powietrza v w m/s istnieje następująca zależność

$$\alpha = 9,7 \cdot v^{0,69}$$

W zakresie prędkości przepływu powietrza 2÷9 m/s daje to wartości $\alpha = 16\div44$ W/(m²·K). Jednak należy pamiętać, że o ile $\alpha \approx v^2$, to zapotrzebowanie mocy do napędu wentylatorów rośnie proporcjonalnie do trzeciej potęgi prędkości ($N \approx v^3$) czyli zwiększenie przejmowalności α kosztem zwiększenia prędkości przepływu powietrza ma sens ekonomiczny tylko w pewnych określonych granicach (w tunelach maksymalnie do 8 m/s).

Przewodność cieplna właściwa λ_{sz} jest zależna od własności fizycznych produktu i jej wpływ na prędkość (czas) zamrażania można zwiększać jedynie przez zmniejszenie grubości zamrażanego produktu, co nie zawsze jest możliwe i wskazane. W praktyce technologicznej należy unikać zamrażania produktów drobnych, np. owoców i krajanek warzywnych, metodą kontaktową, np. w kartonikach lub na tacach. Na skutek bowiem porowatości takiej warstwy efektywna wartość λ_{sz} znacznie spada.

Na podstawie licznych badań procesu zamrażania sformułowane zostały następujące prawidłowości:

- Wpływ λ_{sz} na czas zamrażania rośnie ze wzrostem grubości ciała (l lub d), a wpływ α jest tym większy, im niższa jest jej wartość. Z energetycznego punktu widzenia zwiększenie wartości α jest celowe do takiej granicy, by zachowana została relacja $\alpha < 10 \cdot \lambda_{sz} / (l \text{ lub } d)$;

- Znaczne skrócenie czasu zamrażania uzyskuje się przede wszystkim przez właściwy dobór typu aparatu zamrażalniczego, a nie przez dążenie do uzyskania maksymalnej wartości α . I dlatego we współczesnej technologii i technice zamrażania dąży się do tego, aby produkty zamrażane były w aparatach dostosowanych do ich specyfiki.

Wpływ opakowania. Opakowanie, szczególnie wielowarstwowe, stosowane w zamrażalnictwie, znacznie obniża prędkość zamrażania. W związku z tym we wspomnianych wzorach należy zastąpić przejmowalność energii cieplnej α sumaryczną przenikalnością k , w której uwzględniony jest również dodatkowy opór cieplny opakowań δ/α przedstawiony w tabeli poniżej.

Opakowanie	Grubość lub gramatura	Opór cieplny δ/α [m ² •K/W]
Pergamin	64 g/m ²	0,00142
Półpergamin parafinowany	60 g/m ²	0,00359
Karton parafinowy — półpergamin	48÷60 g/m ²	0,00506
Karton parafinowany	0,625 mm	0,00826
Celofan lub polietylen	0,028 mm	0,00028
Celofan czterowarstwowy	4x0,028 mm	0,00112
Folia celofanowa	0,146 mm	0,00224
Pergamin podwójnie woskowany	0,212 mm	0,0030
Karton wyłożony folią aluminiową	0,568 mm	0,0069
Folia aluminiowa	0,1mm	0,0000005
Papier woskowany	—	0,0052
Papier woskowany + karton	—	0,0115
Warstewka powietrza	0,7÷0,9 mm	0,404
Forma z blachy aluminiowej	2,0 mm	0,0000098
Forma z blachy stalowej kwasoodpornej	1,0 mm	0,0000660
Folia PCV	0,25 mm	0,0025
Folia PE	0,004 mm	0,000138
Tektura falista	4,0 mm	0,022
Papier do pakowania	0,1 mm	0,00143

Z tabeli wynika, że szczególnie wysoki opór cieplny wykazuje nawet niewielka warstewka powietrza zamkniętego w opakowaniu. Warstewka powietrza o grubości 0,8 mm daje opór cieplny 100 razy większy niż karton

parafinowany o grubości 0,27 mm. Dlatego ścianki opakowania powinny, zawsze ściśle przylegać do produktu. Z tablicy tej wynika również, że jedynie opakowania metalowe nie stanowią czynnika opóźniającego przenikanie ciepła, gdyż ich wartości δ są większe niż produktów spożywczych.

Aby polepszyć przyleganie opakowań do produktu w zamrażalnicach kontaktowych wielopłytkowych, stosuje się nacisk płyt na mrożoną warstwę. Nacisk ten powoduje poprawę warunków wymiany ciepła przez obniżenie wartości sumy oporów termicznych.

W aparatach kontaktowych wielopłytkowych stosuje się na ogół nacisk płyt w zakresie 7÷10 kPa.

Innym sposobem zmniejszenia i redukcji oporu cieplnego warstewki powietrza jest stosowanie folii termokurczliwych, np. do opakowania produktów nieforemnych, jak drób, całe ryby itp.

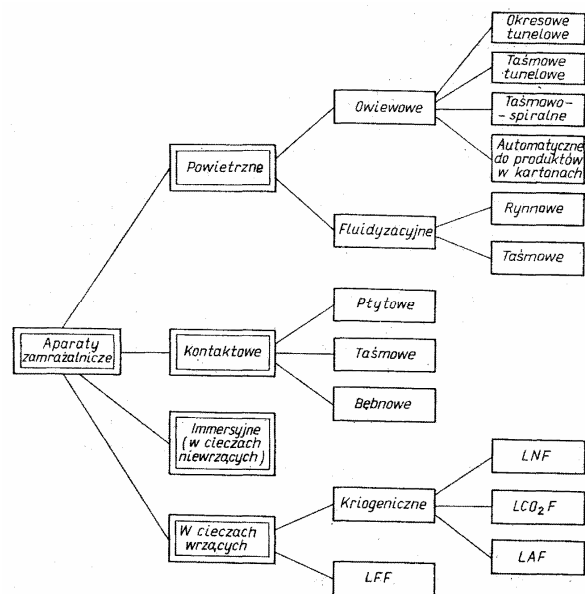
Na koniec należy pamiętać, że w warunkach stałej temperatury otoczenia odprowadzającego ciepło obciążenie cieplne urządzeń zamrażających gwałtownie spada w miarę przesuwania się granicy podziału w zamrażanym produkcie. W urządzeniach zamrażających nierównomierność obciążenia cieplnego prowadzi do podniesienia się temperatury środowiska odprowadzającego ciepło na początku zamrażania (co hamuje prędkość zamrażania) i następnie dopiero jej obniżenia. W związku z tym należy tak regulować pracę urządzeń chłodniczych oraz podawanie produktów do aparatów zamrażających, aby temperatura środowiska odprowadzającego ciepło pozostawała niezmienna w ciągu całego procesu zamrażania. Warunek ten można spełnić lepiej w aparatach mrozących o działaniu ciągłym niż w urządzeniach działających okresowo.

6.7. Metody zamrażania żywności

6.7.1. Klasyfikacja

W zamrażalnictwie od wielu lat czyni się stałe wysiłki w kierunku skrócenia czasu mrożenia żywności, dążąc do uzyskania produktów mrożonych o jakości równej produktom świeżym, a także w celu obniżenia kosztów ruchowych i zwiększenia przelotowości zainstalowanych urządzeń. Współczesne metody szybkiego zamrażania podzielić można na 4 grupy:

1. Zamrażanie w powietrzu przy zastosowaniu intensywnego obiegu ośrodka — owiewowe i fluidyzacyjne.
2. Zamrażanie kontaktowe w aparatach wielopłytkowych, taśmowych i bębnowych.
3. Zamrażanie immersyjne w cieczach nie wrzących przez zanurzenie lub natrysk.
4. Zamrażanie immersyjne w cieczach wrzących kriogenicznych (ciekłym azocie - LNF, ciekłym dwutlenku węgla – LCO₂F i ciekłym powietrzu - LAF), a także zamrażanie w ciekłym freonie - LFF.



6.7.2. Zamrażanie w powietrzu

Zasada zamrażania w powietrzu jest następująca: chłodzone w różnego typu chłodnicach powietrze krąży w zamkniętym pomieszczeniu (tunelu, rzadziej komorze), ogrzewa się i wzbogaca w wilgoć wskutek wymiany ciepła i masy z produktem, po czym — przechodząc przez chłodnicę — ochładza się i suszy (szronienie parowników — chłodnicy) i dalej za pomocą wentylatorów ewentualnie specjalnych kierownic lub dysz zawraca do produktu.

Najważniejszymi czynnikami wpływającymi na prędkość mrożenia są temperatura przepływającego strumienia powietrza i jego prędkość.

Temperatura powietrza zależy od temperatury odparowania czynnika chłodniczego; różnica pomiędzy nimi powinna być tak dobrana, aby — maksymalnie skracając czas procesu — nie powodowała zwiększenia uszki produktu. Czas zamrażania skraca się poważnie przy obniżeniu temperatury powietrza od -20 do -40°C, dalsze obniżanie temperatury nieznacznie wpływa na skrócenie czasu zamrażania, a znacznie zwiększa zużycie energii w maszynowni chłodniczej. W zamrażalniach owiewowych, zwłaszcza podczas mrożenia dużych sztuk mięsa, ryb lub dużych skrzynek, temperaturę parowania czynnika obniża się do -45°C. Ponieważ średnia różnica temperatury między czynnikiem a powietrzem wynosi 5÷7°C, to optymalna temperatura chłodzącego powietrza może osiągnąć wartość -40°C.

Od **prędkości przepływu powietrza** zależy wartość przejmowalności energii cieplnej α . W tunelach zamrażalniczych lepszą przejmowalność ciepła można uzyskać przede wszystkim przez zwiększenie prędkości powietrza stykającego się bezpośrednio z towarem. Wydajność wentylatorów w zamrażalniach jest uzależniona od ilości ciepła, jaką należy doprowadzić do parowników. Prędkość powietrza w takich warunkach można zwiększyć tylko przez zmniejszenie przekroju przepływu. W celu uzyskania dużej prędkości przepływu powietrza buduje się tunele zamrażalnicze o małym przekroju poprzecznym w stosunku do obiegu powietrza i o dość znacznej długości w kierunku przepływu powietrza. Zwiększenie prędkości powietrza wiąże się jednocześnie ze wzrostem poboru mocy przez silniki wentylatorów, a więc i z dodatkowymi kosztami. Dlatego racjonalna prędkość powietrza w załadowanym tunelu zamrażalniczym wynosi przeciętnie 3÷8 m/s. W takich warunkach ciepło wydzielone przez pracujące silniki wentylatorów stanowi 1/3 lub 1/2 ciepła odprowadzonego od produktu.

6.7.3. Podział i charakterystyka zamrażalni owiewowych: tunelowych i specjalnych

Zamrażalnie tunelowe dzieli się na typy i rodzaje w zależności od:

- sposobu załadowania (zamrażalnie przelotowo-taśmowe o załadunku ciągłym lub przelotowe o załadunku jednorazowym),
- charakteru wymiany ciepła (konwekcja, promieniowanie),
- kierunku i prędkości przepływu powietrza,
- położenia i rodzaju parowników,
- postaci, w jakiej jest zamrażany towar (półtusze, filety rybne w blokach, mięso w blokach itp.).

Zasadniczymi elementami konstrukcyjnymi zamrażalni tunelowych są:

- baterie wymienników ciepła (zwykle parowniki wykonane z rur żebrowych lub lamelowych),
- wentylatory wraz z silnikami elektrycznymi, przeznaczone do uzyskaniażądanego krążenia powietrza w zespole wymienników i przestrzeni załadunkowej tunelu,
- urządzenie do mechanicznego przesuwania taśmy lub wózków załadowanych produktami w tunelach zautomatyzowanych,
- dodatkowe wyposażenie zamrażalni tunelowej przeznaczonej do uniwersalnego wykorzystania.

W zamrażalniach tunelowych przeznaczonych do uniwersalnego wykorzystania stosuje się dodatkowe wyposażenie do mrożenia mięsa luzem w pół- i ćwierćtuszkach, elementów mięsnych, jak: szynki, bekony itp., towarów w skrzynkach, kartonach i jednostkowych opakowaniach oraz towarów luzem, jak owoce i warzywa.

Do mrożenia mięsa luzem w pół- i ćwierćtuszkach w zamrażalniach tunelowych stosuje się: konstrukcję z wiszącymi hakami do zawieszania mięsa, kolejkę mięsną, po której toczą się haki na rolkach lub stojaki z hakami stałymi lub przesuwanymi na rolkach. Pierwsze rozwiązanie nie jest wskazane, ponieważ mięso zawiesza się na hakach i z nich zdejmuje ręcznie w pomieszczeniach zamrażalni.

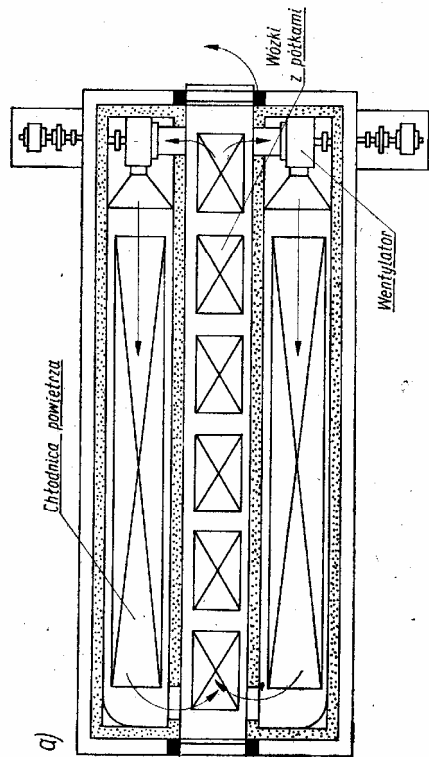
Do mrożenia towarów opakowanych w skrzynkach lub kartonach, takich jak drób, mięso lub podroby w blokach, stosuje się: regały zawieszane na hakach z rolkami lub stojaki z półkami/Regały wiszące na hakach z rolkami mogą być stosowane tylko w zamrażalniach wyposażonych w kolejkę wiszącą. Stojaki z półkami mogą stanowić wyposażenie każdej zamrażalni. Do transportu tych stojaków stosuje się wózki niskiego podnoszenia — ręczne lub akumulatorowe.

Wszystkie wymienione dodatkowe urządzenia służą do ułożenia towaru lub opakowań w zamrażalni w sposób zapewniający zetknięcie się z obiegowym powietrzem na jak największej zewnętrznej powierzchni. Część sprzętu umożliwi ponadto układanie towaru w bardzo nawet cienkich warstwach, co znacznie wpływa na skrócenie czasu zamrażania. Dodatkowe wyposażenie zamrażalni umożliwia zwiększenie jej przelotowości stosunkowo niewielkim kosztem oraz wpływa na polepszenie jakości zamrażanej żywności.

Przykładem tunelu o działaniu okresowym z podłużnym obiegiem powietrza jest tunel na rys. 6-14a. Właściwością tego tunelu jest bardzo duża prędkość przepływu powietrza, osiągana dzięki dwóm turbinowym wentylatorom umieszczonym po obu bokach podłużnych ścianek tunelu oraz dzięki zastosowaniu określonego kształtu tunelu i specjalnych wózków. Wadą tego typu tunelu jest dość znaczny wzrost temperatury powietrza w czasie jego przepływu przez tunel (o $6\div 10^{\circ}\text{C}$) oraz duże różnice prędkości przepływu powietrza w różnych punktach tunelu. Powoduje to nierównomierne mrożenie produktu i zwiększa ususzkę.

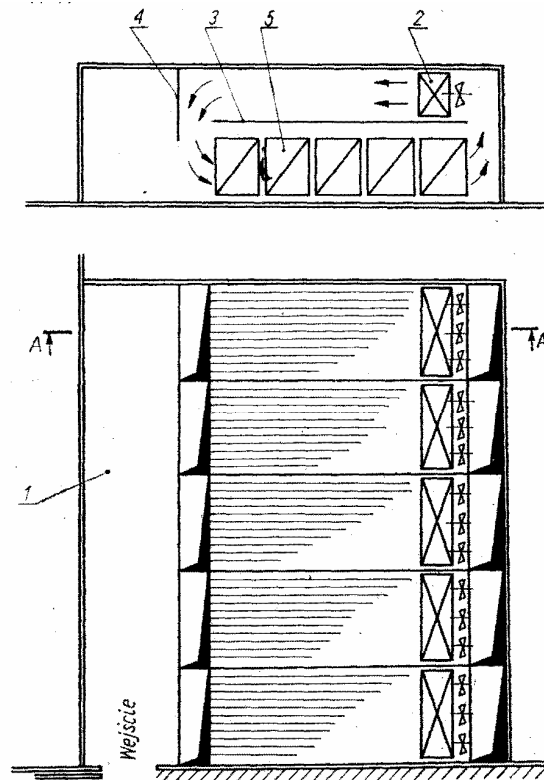
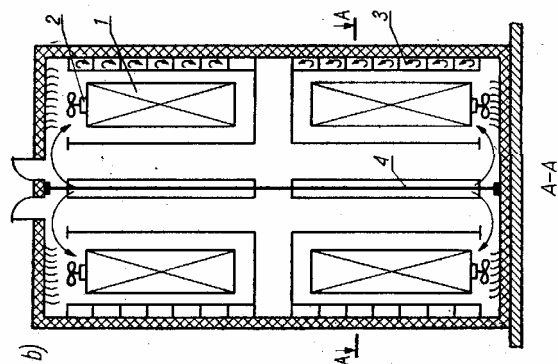
Przykładem tunelu o pionowo-poprzecznym ruchu powietrza i zmiennym kierunku przepływu (z góry w dół lub na odwrót) jest tunel zamrażalniczy w Chłodni Gdańskiej (rys. 6-145). W tunelu tym powietrze osiąga temperaturę — 30°C i prędkość 5 m/s, a czas mrożenia półtuszy wieprzowych do temperatury — 8°C wewnątrz szynki wynosi 16 h. Aparaty tego typu cechuje stosunkowo mały wzrost temperatury powietrza (o $1,5\div 2^{\circ}\text{C}$) i równomierny rozkład prędkości w całym tunelu. Dzięki temu straty wskutek ususzkę oraz rozchód energii elektrycznej na pokonanie oporów przepływu powietrza są stosunkowo niewielkie.

Nowym rozwiązaniem klasycznych tuneli owiewowych jest zespół 5 zamrażalni w chłodni Białystok II. Do całego zespołu prowadzą tylko jedne drzwi na zewnątrz budynku na rampę (rys. 6-15). Między korytarzem i tunelami nie ma żadnych przegród, a jedynie w górnej partii jest zainstalowana pionowa kurtyna czołowa, która kieruje strumień powietrza do przestrzeni towarowej zamrażalni. Dzięki zrezygnowaniu z drzwi między tunelami a korytarzem obniżył się znacznie koszt budowy zespołu tuneli i łatwiejsza stała się eksploatacja zamrażalni. Aparaty taśmowe tunelowe i spiralne. Obecnie istnieje olbrzymia różnorodność konstrukcji zamrażalni taśmowo-owiewowych. Przykładowo na rys. 6-16 przedstawiono rozwiązanie tunelu firmy Linde o wydajności 500kg/h.



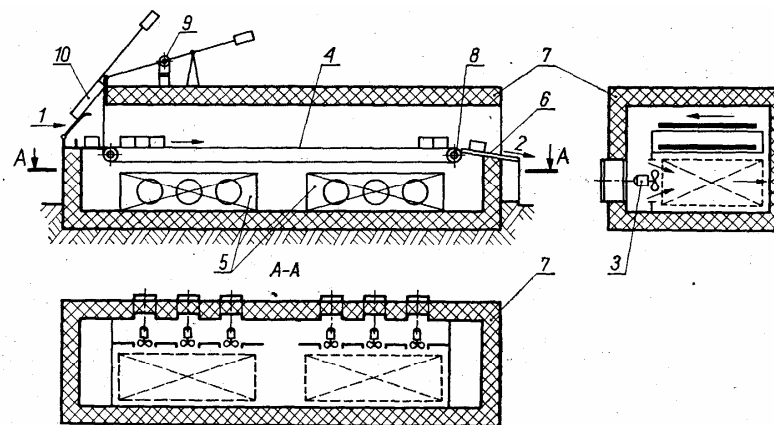
Rys. 6-14. Schemat zamrażalni o działaniu okresowym: a) z podłużnym obiegiem powietrza, b) z pionowo-popręcznym obiegiem powietrza i o zmiennym kierunku przepływu powietrza

1 — baterie parowników, 2 — wentylator, 3 i 4 — kanały powietrzne, 5 — sufit z podwieszoną kolejką oraz otworami do przepływu powietrza, 6 — odpływ skroplin z odzraniania



Rys. 6-15. Zestaw tuneli zamrażalniczych owiewowych o wydajności 50 t/24 h w chłodni Białystok II

1 — korytarz, 2 — chłodnica, 3 — strop pozorny, 4 — kurtyna czołowa, 5 — stojaki z produktem



Rys. 6-16. Przykład tunelu taśmowo-owiewowego firmy Linde

1 — wysp produktu, 2 — wysp zamrożonego produktu, 3 — wentylator, 4 — taśma siatkowa na rolkach nośnych, 5 — chłodnice powietrza, 6 — przenośnik rolkowy, 7 — płyta izolacyjna, 8 — bęben napędzający taśmę, 9 — podnośnik hydrauliczny, 10 — kłapa

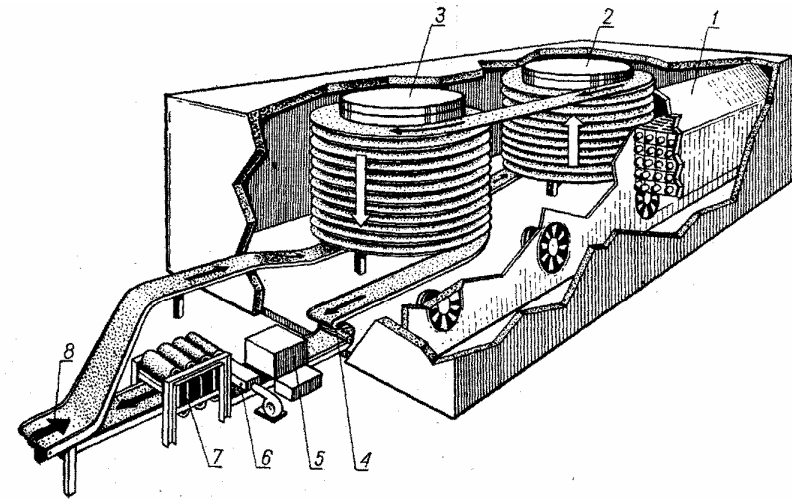
Przykładem zamrażalni ze spiralnymi taśmami są zamrażalnie typu Gyro-Freeze. Odnaczają się one małym zapotrzebowaniem powierzchni, które wynosi zaledwie 30% powierzchni tunelu taśmowego lub wózkowego o analogicznej wydajności.

Zasadniczą częścią aparatu takiej zamrażalni jest taśma specjalnej konstrukcji, która może się wyginać w łuk w płaszczyźnie poziomej (rys. 6-18). Taśma ta oplata w formie poziomej spirali dwa pionowe bębny, przy czym na pierwszy z nich nawija się z dołu do góry, a na drugi z góry na dół. Bębny, taśma oraz chłodnice powietrza z wentylatorami znajdują się w izolowanej obudowie. Ruch powietrza chłodzącego ma kierunek przeciwny do ruchu zamrażanego produktu, dzięki czemu najzimniejsze powietrze z chłodnicy działa na produkt prawie zamrożony i — przepływając przez poszczególne piętra spirali taśmowej — styka się z produktem coraz cieplejszym. Powietrze ogrzewa się tak, że różnica temperatury między produktem a powietrzem jest minimalna, dzięki czemu ususzka produktu jest bardzo mała.

Zamrażalnie taśmowo-spiralne najbardziej wydajnie mrożą luzem drobne produkty, dla których czas zamrażania nie przekracza 1 h. Są jednak używane w praktyce do zamrażania dań kulinarnych w większych opakowaniach (40÷1800 g/szt.) i wówczas cykl zamrażania wynosi odpowiednio 20÷310 min. Całkowita wydajność tych aparatów, np. Gyro-Freeze, wynosi 1,0÷2,4 t/h. Te ostatnie zapewniają bardzo higieniczną obróbkę chłodniczą oraz możliwość pakowania porcji w stanie zamrożonym przy zastosowaniu urządzenia paczkującego twarde produkty.

Tunele zautomatyzowane — stelażowe, ślizgowe i spiralne są przykładem postępu technicznego w chłodnictwie. Są to aparaty służące do zamrażania produktów w opakowaniach kartonowych (drobiu, mięsa bez kości i gotowych dań w opakowaniach). Cechuje je długi cykl zamrażania (3÷7 h), ale i bardzo duża wydajność (3÷7 t/h). Wszystkie tego typu aparaty mają skomplikowaną budowę i wymagają dużej precyzji w wykonaniu. Ruch urządzeń jest całkowicie zautomatyzowany i sterowany elektronicznie. Mimo wydłużonego czasu zamrażania aparaty te wypierają tunele drobiowe, np. typu Mostostal, gdyż drób zamrożony w koszykach, a następnie pakowany do kartonów tworzy luźny ładunek, utrudniający formowanie zestawów paletowych. Natomiast pakowane ciasno w kartonie świeże produkty po zamrożeniu tworzą zwarty blok, wygodny w przeładunkach i

transportcie.



Rys. 6-18. Przekrój zamrażalnika ciągłego działania typu Gyro-Freeze
1 — chłodnica powietrza, 2 — bęben wokół którego wznosi się układ przenośników, 3 — bęben wokół którego opada układ przenośników, 4 — punkt odbioru zamrożonego produktu, 5 — automatyczna myjnia taśmy, 6 — osuszacz taśmy, 7 — regulacja napięcia taśmy, 8 — linia za-

6.7.4. Zamrażanie fluidyzacyjne

Obecnie jedną z wydajniejszych metod zamrażania z zastosowaniem czołowego — pionowego strumienia powietrza jest metoda fluidyzacyjna.

Fluidyzacją nazywa się proces, w którym przez warstwę sypkich produktów, rozłożonych na poziomym sicie, przedmuchiwany jest od dołu pionowy strumień powietrza z taką prędkością, która wywołuje zjawisko „wrzenia” warstwy, a produkt wykazuje wiele cech charakterystycznych dla cieczy. Jeśli na przykład na taśmę siatkową z produktem w jednym końcu wsypie się dodatkową porcję produktu, to popłynie on samoczynnie w kierunku drugiego końca. Ciśnienie warstwy fluidalnej na dno siatki odpowiada tym samym prawom, co ciśnienie hydrostatyczne, czyli jest równe w przybliżeniu iloczynowi wysokości warstwy H_f przez jej gęstość ρ^f . Gęstość warstwy oraz jej lepkość maleją wraz ze wzrostem prędkości powietrza. (Podobnie jest w przypadku cieczy — ze wzrostem temperatury). Analogię do cieczy stwierdzono także w mieszanii dwu składników o różnej gęstości lub wielkości. Podobnie jak w cieczy, w warstwie fluidalnej cząstki

lekkie o mniejszej gęstości lub o mniejszych wymiarach, układają się w górnej warstwie, cięższe zaś lub większe — w dolnej.

W czasie zamrażania metodą fluidyzacyjną sporo trudności stwarzają następujące fakty: zamrażane produkty nie są jednolite pod względem wielkości, kształtu i konsystencji; powierzchnia produktu jest mokra, co powoduje wzajemne zlepianie się cząsteczek oraz ich przymarzanie do siatki (łoża); produkty (owoce) bardzo łatwo uszkodzić w toku procesu.

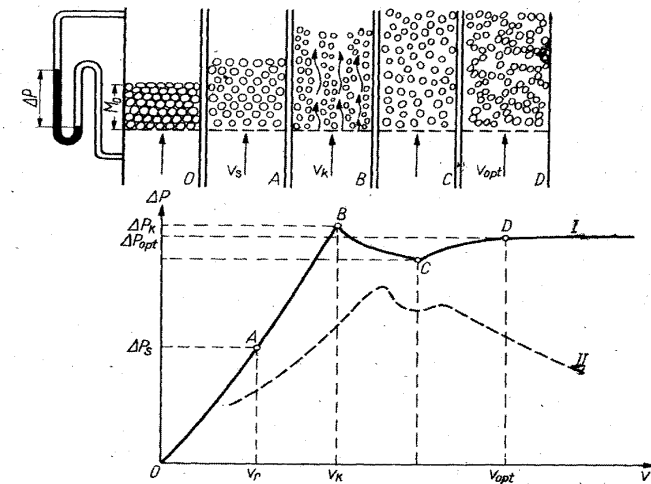
Pierwszy doświadczalny tunel fluidyzacyjny został uruchomiony w Hesingborgu (Szwecja) w 1962 r. Od tej pory datuje się wielki rozwój tej metody w zamrażalnictwie żywności.

W przypadku fluidyzacji w ruchu jest nie tylko powietrze, ale również zamrażana warstwa. Zmiany struktury fluidyzacyjnej pokazano na rys. 6-20. Faza O przedstawia warstwę nieruchomą, A — warstwę spulchnioną, B — początek fluidyzacji, C — pełną fluidyzację spokojną, D — fluidyzację burzliwą. Poszczególnym fazom procesu fluidyzacji towarzyszy zmiana ciśnienia w łożu. W miarę wzrostu prędkości przepływu powietrza v , Δp rośnie regularnie według krzywej O A, osiągając punkt A, który jest początkiem spulchniania warstwy. Wzrost prędkości v przepływu powietrza powoduje dalszy wzrost Δp aż do punktu B, któremu odpowiada maksymalne ciśnienie Δp_k , tzw. krytyczne, oraz prędkość krytyczna v_k . W tym momencie w warstwie powstają kanały, którymi ucieka część powietrza, a ciśnienie natychmiast spada do wartości punktu C, który określa pełną fluidyzację. Ponieważ proces tworzenia się kanałów i ciągłego ich zanikania jest zjawiskiem burzliwym, ciśnienie Δp stale przeskakuje od wartości punktu B do punktu C, a łoże ma tendencję do przejścia w stan, ilustrowany przez krzywą II, który cechuje nierównomierny, miejscowy i burzliwy przepływ powietrza przez pewne partie łoża, przy bardzo słabym ruchu lub bezruchu pozostałych partii.

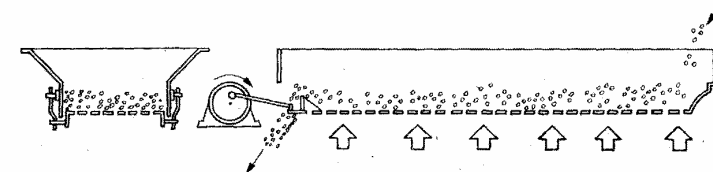
W praktyce dąży się do tego, aby łoże pracowało w warunkach krzywej Z w obszarze punktów C—D. Warunki te dla takich produktów, jak np. groszek, jagody, wiśnie, marchew krajana w kostkę, osiąga się dość łatwo. Są jednak produkty, które wykazują szczególną skłonność do przechodzenia w stan krzywej II. Są to: fasolka i frytki ze względu na ich podłużny kształt, który powoduje różny opór aerodynamiczny przy różnym ustawieniu w stosunku do kierunku przepływu powietrza.

W warstwie fluidalnej tych produktów powstają „puste” kanały

powietrza, spada ciśnienie oraz maleje intensywność mieszania i intensywność procesu zamrożenia. Zapobiega się temu, stosując sztuczny ruch poziomy warstwy. Najczęściej dno łoża jest zawieszane na wahaczach z mechanizmem mimośrodowym, wywołującym oscylacyjny ruch łoża (rys. 6-21). Zadaniem ruchu łoża jest poprawienie struktury warstwy fluidalnej. Natomiast warstwa produktu płynie sama na zasadzie fluidyzacji. Bardzo ważne w procesie fluidyzacji są: opór sita, opór warstwy i wzajemny stosunek tych oporów. Właściwie dobrany opór przepływu przez sito oraz wymiary i kształt oczek decydują o prawidłowości pracy łoża i odporności na zaburzenia procesu. Najlepsze warunki procesu fluidyzacji otrzymałoby się, gdyby opór sita był mniej więcej równy oporowi warstwy.



Rys. 6-20. Poszczególne fazy struktury fluidalnej i spadek ciśnienia Δp w warstwie fluidalnej w zależności od prędkości przepływu strumienia powietrza
O — warstwa nieruchoma, A — warstwa spulchniona, B — początek fluidyzacji, C — pełna fluidyzacja spokojna, D — fluidyzacja burzliwa



Rys. 6-21: Rynna fluidyzacyjna z oscylującym dnem [13]

Zarówno średnica oczek jak i odległość między nimi nie powinny przekraczać minimalnej średnicy zamrażanego produktu. Najlepsze warunki uzyskuje się na sicie o oczkach kwadratowych, gdyż wówczas żadne miejsce na sicie nie ma szczególnie dogodnych warunków do rozwoju kanałów powietrznych.

Proces fluidyzacyjnego zamrażania charakteryzuje się bardzo intensywną wymianą ciepła. W stosunku do tradycyjnych metod owiewowych intensywność ta rośnie 30÷40-krotnie. Powodem jest znaczny wzrost wartości α oraz czynnej powierzchni wymiany ciepła.

Wartości α w warstwie fluidyzacyjnej są 4÷5-krotnie wyższe niż w tunelach owiewowych. Dla przemysłowych urządzeń zamrażalniczych przyjmuje się następujące wartości przejmowalności w warstwie fluidalnej, w rzeczywistych warunkach pracy tuneli fluidyzacyjnych i fluidyzacyjno-taśmowych: w czasie schładzania $\alpha=115\div140$ W/(m²·K); w czasie zamrażania $\alpha=93\div105$ W/(m²·K); w czasie domrażania $\alpha = 68\div81$ W/(m²·K).

Niezależnie od wymiany ciepła przez konwekcję, część ciepła odplywa z produktu wskutek parowania wody z powierzchni cząsteczek. W początkowej fazie schładzania paruje powierzchnia mokra, a następnie zamrożona.

Całkowite ciepło oddawane przez warstwę jest równe sumie ciepła konwekcji i parowania. W początkowej fazie w okresie wstępnego schładzania surowca wymiana ciepła przez parowanie jest stosunkowo duża; wynosi około 50% wymiany przez konwekcję. Trwa to jednak bardzo krótko (kilkadziesiąt sekund), gdyż z chwilą zamarznięcia powierzchni parowanie zmniejsza się. W sumie drogą parowania zostaje odprowadzone 10-15% ogólnej ilości ciepła zamarzania produktu przy 1÷1,5% ususzki.

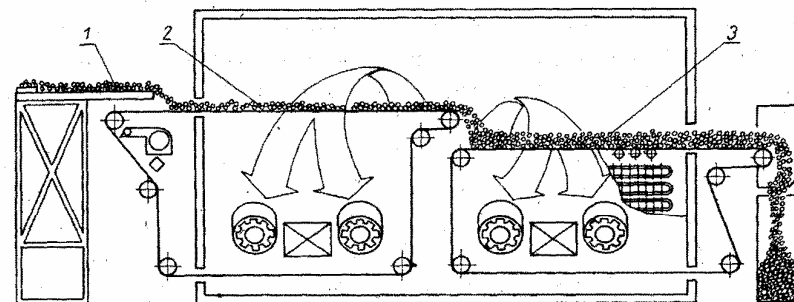
Drugim czynnikiem zwiększającym intensywność wymiany ciepła w warstwie fluidalnej jest znaczne rozwinięcie powierzchni czynnej zamrażanego produktu w porównaniu do tradycyjnego owiewowego zamrażania. W zamrażaniu owiewowym lub kontaktowym w wymianie ciepła bierze udział jedynie zewnętrzna powierzchnia warstwy produktu, dalsze zaś partie oddają ciepło przez przewodzenie lub bardzo słabą konwekcję. W warstwie fluidalnej liczy się suma powierzchni wszystkich cząsteczek zamrażanego produktu. Są to wartości bardzo duże. Dla ilustracji przy wysokości warstwy $H_0 = 140$ mm powierzchnia czynna niektórych produktów na 1m² powierzchni sita przedstawia się następująco: zielony groszek — 60÷70 m², truskawki o średnicy 25 mm — ok. 20 m², wiśnie o średnicy 17 mm — ok. 30 m².

Te same produkty zamrażane w tunelu owiewowym na tacach w warstwie grubości 50 mm mają powierzchnię czynną około 6 m², a więc 3,5÷10-krotnie

mniejszą.

6.7.5. Tunele fluidyzacyjne i fluidyzacyjno-taśmowe

Są to wszystkie te urządzenia zamrażalnicze, w których wykorzystuje się przedmuch warstwy produktu leżącej na sicie lub taśmie w kierunku z dołu do góry, bez względu na to, czy warstwa przy tym fluiduje, czy też jest nieruchoma. Definicję tę uzasadnia fakt, że zjawiska wnikanie ciepła są w obydwu wypadkach bardzo zbliżone.



Rys. 6-23. Schemat procesu zamrażania w tunelu fluidyzacyjno-taśmowym typu 700 firmy Levis Refrig. Co. wg prospektu firmowego [13]

Na taśmie wstępnej następuje początkowo ochłodzenie i powierzchniowe zamrożenie, a na taśmie głównej — domrożenie surowca; 1 — podajnik surowca, 2 — taśma wstępnego omrażania, 3 — taśma domrażania

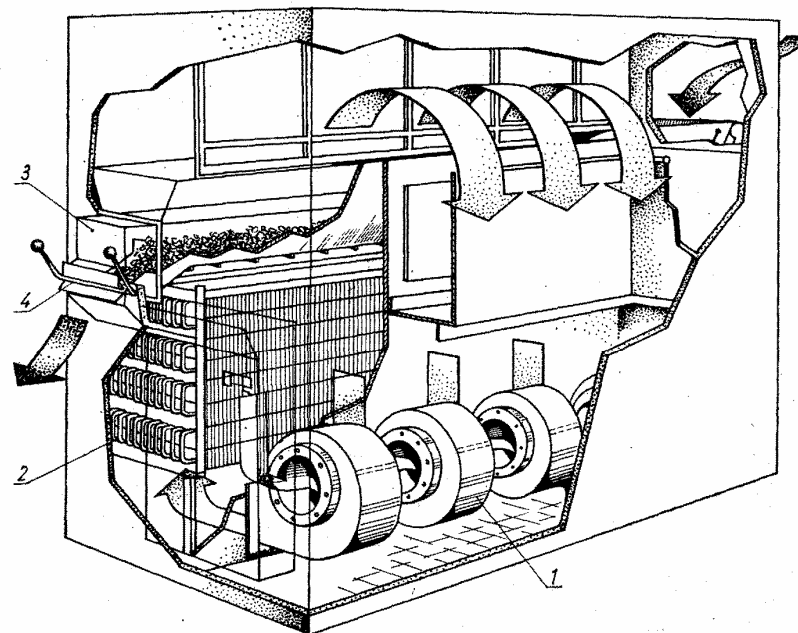
Wszystkie produkowane obecnie typy zamrażalni fluidyzacyjnych podzielić można na: 1) rynnowe, 2) jednotaśmowe, 3) dwutaśmowe w układzie kaskadowym 4) dwutaśmowe w układzie nawrotnym 5) rynnowo-taśmowe. Tunele rynnowe produkowane przez firmę Frigoskandia opierają się całkowicie na zasadzie łoża fluidyzacyjnego. Ich konstrukcja bardzo odbiega od konstrukcji tuneli taśmowo-fluidyzacyjnych (semifluidyzacyjnych). Odnznaczają się one znacznym zmniejszeniem wymiarów tuneli oraz wyeliminowaniem kłopotliwych urządzeń mechanicznych. Obecnie tunele Flo-Freeze są stosowane powszechnie na całym świecie do zamrażania groszku, rozdrobnionych warzyw oraz owoców jagodowych. Na rysunku 6-25 pokazano tunel fluidyzacyjny rynnowy typu Flo-Freeze. W tunelu tym system fluidyzacyjny tworzy jeden zwarty blok, łącznie z parownikami 2, skrzynią powietrzną i wentylatorami 1. Na tym bloku jest ustawione łożo fluidyzacyjne 3, a całość spoczywa na skanalizowanej tacy podłogowej obudowy tunelu.

Łoże fluidyzacyjne jest wykonane w formie wanny z perforowanym dnem. Trzy boki wanny mają wysokość 400 mm, czwarty przy wylocie — jest wykonany w formie pochylonego progu 4 o nastawianej wysokości 100÷300 mm. Wysokością tego progu reguluje się grubość warstwy w wannie, ponieważ nadmiar produktu „przelewa się”. Dno wanny stanowi podwójne sito. Sito górne — ruchome — ma stałą perforację na całej powierzchni, a dolne — nieruchome — ma perforację bardzo zróżnicowaną, dzięki czemu dla każdej strefy zamrażania uzyskuje się odpowiednią siłę podmuchu. Podmuch powietrza jest wywołany przez 4÷6 wentylatory odśrodkowe. Ilość powietrza w obiegu jest przeszło 4-krotnie mniejsza niż w tunelu fluidyzacyjno-taśmowym tej samej wydajności. Mała ilość powietrza w obiegu jest przyczyną znacznego spadku jego temperatury. Spadek ten zawiera się w granicach od 25°C przy wlocie surowca w łożu do 5°C przy jego wylocie, średnio ok. 15°C. Temperatura powietrza atakującego łożo jest stosunkowo wysoka (średnio ok. -25°C). Czynna różnica temperatury między środowiskiem chłodzącym i produktem jest więc stosunkowo mała, ale mimo to w tunelu osiąga się krótkie czasy zamrażania wskutek bardzo dobrych warunków wymiany ciepła (intensywne „wrzenie”). Tunele rynnowe nadają się przede wszystkim do zamrażania rozdrobnionych produktów, ponieważ rozwinięta powierzchnia i duża wartość α rekompensują małą różnicę temperatury. Efektywność pracy tych tuneli poważnie maleje wraz ze wzrostem wymiarów zamrażanego surowca.

Surowiec z linii technologicznej jest podawany do rynny wibracyjnej podajnika, który wprowadza go dalej do wnętrza tunelu nad wstępną część łoża fluidyzacyjnego. Następnie surowiec spada z podajnika w silny strumień podmuchu wstępnego, który wytwarza nad łożem poduszkę powietrzną, nie pozwalającą na przywarcie mokrego produktu do dna. Powierzchnia łoża w tym miejscu bardzo silnie „wrze”, wymiana ciepła jest intensywna, a powietrze wychodzące z tej warstwy ma temperaturę 0°C, czyli przyrost jego temperatury wynosi $\Delta t = 25^\circ\text{C}$.

Aby zapobiec tworzeniu się zlepieńców, w 1/3 długości łoża znajduje się ruchomy grzebień z metalowymi palcami o rozstawie ok. 150 miń. Grzebień ten ruchem wahadłowym rozbija zlepieńce na poszczególne elementy. Czas „przepłynięcia” produktu od wlotu do wylotu łoża określa cykl zamrażania. Ponieważ produkt przesuwają się samoczynnie, cykl ten reguluje się wysokością progu przesypowego w wannie. Gdy produkt nie osiąga założonej temperatury zamrażania, podnosi się wysokość progu lub obniża podaż surowca z linii. Każdy produkt ma swoją optymalną wysokość warstwy, przy której tunel

pracuje najbardziej ekonomicznie.



Rys. 6-25. Tunel fluidyzacyjny rynnowy typu Flo-Freeze firmy Frigoscandia wg projektu firmowego [13]

1 — wentylatory, 2 — parownik, 3 — rynna fluidyzacyjna, 4 — próg

Tunele fluidyzacyjno-taśmowe pracują według następującej ogólnej zasady: Surowiec bezpośrednio z linii produkcyjnej, na której odbywają się procesy płukania, ociekania i selekcji, jest podawany za pomocą różnego rodzaju podajników na taśmę pierwszą — omrażania: — w warstwie I grubości 50÷80 mm. Na taśmie tej następuje powierzchniowe omrożenie i produktu. Spadając na drugą taśmę — domrażania — jest on już suchy i sypki. Taśma druga biegnie 2÷3 razy wolniej od pierwszej i dlatego warstwa produktu na niej jest odpowiednio grubsza i wynosi 100÷200 mm. Na pierwszej taśmie warstwa powinna być w stanie fluidalnym, na drugiej — może być nieruchoma. W celu wywołania fluidyzacji na pierwszej taśmie są stosowane specjalne dysze wstępnego podmuchu, podłączone do wysokoprężnych wentylatorów, które mają zaraz na wstępie procesy oderwać mokry surowiec od taśmy. Liczne modernizacje tych tuneli mają na celu zapewnienie takiego podmuchu powietrza, by uzyskać pełną fluidyzację i pełne omrożenie surowca i

jednocześnie uchronić go od powstawania zlepieńców oraz rozerwania owoców o słabszej konsystencji. Aby uniknąć przymarzania owoców, górną taśmę pokrywa się tworzywem hydrofobowym, np. nylonem lub teflonem. Podmuch dolnej taśmy dostosowano do owoców cięższych, jak truskawki, śliwki itp., a w czasie mrożenia owoców lżejszych (jagody, maliny, groszek) jest zmniejszany przez wyłączenie ostatniego wentylatora. Tunele podłącza się bezpośrednio do linii produkcyjnej. Przed uruchomieniem linii tunele wychładza się do temperatury — 25°C, co trwa ok. 10÷15 min.

6.7.6. Zamrażanie immersyjne

Metoda zamrażania w cieczech może być realizowana jednym z trzech sposobów:

- przez zanurzenie w ciekłym ośrodku chłodzącym przy jednoczesnym ruchu produktu,
- przez zraszanie produktu cieczą chłodzącą,
- przez omywanie (czasem polewanie) produktu cieczą chłodzącą.

Solankowe zamrażanie immersyjne znane pod nazwą systemu Ottensona było stosowane najwcześniej w technice zamrażalniczej.

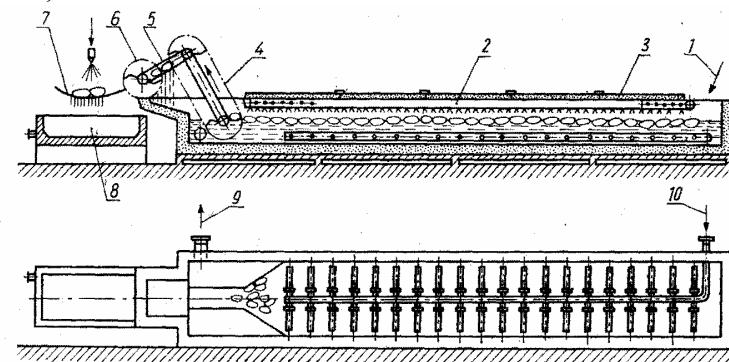
Umożliwia ono osiągnięcie dużej prędkości zamrażania dzięki pełnemu kontaktowi całej powierzchni produktu z ochładzającą solanką (NaCl) w temperaturze -18÷-20°C. Na skutek dużej pojemności cieplnej oraz dobrej przewodności, ciepło przejęte od produktu zostaje szybko wchłonięte przez dużą masę solanki. Przejmowalność energii cieplnej osiąga w zamrażalnicach solankowych wartość 100÷700 W/(m²·K). Do kontaktowego zamrażania są używane jedynie roztwory NaCl o stężeniu 21÷22%, tj. możliwie bliskim punktu eutektycznego, gdyż przenikanie soli do tkanek jest tym słabsze, im niższa jest temperatura roztworu. Zamrażanie za pomocą innych solanek, np. roztworu MgCl₂ lub CaCl₂, jest możliwe wyłącznie przy zastosowaniu bezkontaktowego zamrażania. Zamrażanie w solance ma wiele wad. Należy do nich duże stężenie roztworu solanki, konieczne do uzyskania dostatecznie niskiej temperatury i powodujące przenikanie solanki w głąb produktu (najczęściej mięśni ryb). Stosowanie solanek o stężeniu nieco poniżej punktu eutektycznego powoduje w niskich temperaturach wydzielanie się lodu który pokrywając chłodzące rury wymiennika zwiększa wprawdzie początkowo stężenie solanki do stanu nasycenia (obniżając jej temperaturę), ale pogarsza warunki wymiany ciepła między solanką a parownikiem z powodu niskiej wartości przewodności właściwej lodu. W tych warunkach prędkość

schładzania zmniejsza się, a temperatura solanki stopniowo wzrasta. Wady te można częściowo usunąć, stosując tzw. roztwory potrójne, z dodatkiem najczęściej gliceryny (lub alkoholu). (Dodanie do roztworu gliceryny w ilości 1‰ powoduje obniżenie temperatury zamarzania solanki o 0,2°C). Dodatki nie są jednak obojętne dla smaku i jakości mrożonych produktów (przeważnie ryb), dlatego w Polsce do bezpośredniego mrożenia używa się tylko roztworów soli kuchennej.

Metoda bezpośredniego zamrażania w solance lub w wodzie morskiej z dodatkiem soli znajduje jeszcze dziś dość powszechne zastosowanie w rybołówstwie. Solanka wskutek stykania się z rybą silnie się zanieczyszcza, często pieni, a przede wszystkim rozcieńcza. W związku z tym konieczne jest ciągłe filtrowanie i zateżnianie solanki. Ponadto solanki powodują silną korozję urządzeń zamrażalniczych.

Ostatnio metoda immersyjnego zamrażania w solankach znajduje ponownie zastosowanie w związku z rozwojem nowoczesnej techniki pakowania, zwłaszcza próżniowego. Absolutnie szczelne i przylegające ściśle do zamrażanego produktu opakowanie z cienkiej folii niewiele pogarsza warunki wymiany ciepła, a umożliwia stosowanie solanek o niższym punkcie eutektycznym (MgCl₂ i CaCl₂) oraz glikolu i metanolu.

Przykładem zamrażalni immersyjnej — solankowej jest aparat firmy Linde (rys. 6-28) wykonany w postaci izolowanej wanny długości ok. 10 m i szerokości 1,0 m.



Rys. 6-28. Zamrażalnia immersyjna — solankowa dla drobiu firmy Linde o wydajności 1 t/h

1 — wlot świeżych tuszek, 2 — urządzenie zraszające, 3 — izolowana pokrywa wanny, 4 i 5 — przenośniki: wyładowczy i ociekania, 6 — bęben rozładunkowy, 7 — ruszt ociekowy z natryskiem wodnym, 8 — wanna, 9 — powrót solanki do chłodnicy, 10 — dopływ zimnej solanki

Wanna ta jest przykryta izolowanymi elementami z wolnymi otworami wlotowymi 1 i wylotowymi na obydwu jej końcach. Pod pokrywą i nad dnem wanny są zamontowane dysze 2. Pompa zasysa roztwór z wanny, tłoczy go przez parownik płaszczowo-rurowy, umieszczony w maszynowni, i podaje oziębiony roztwór do obydwu rzędów dysz. Poziomy roztwór w wannie sięga połowy jej wysokości. Zamrażany produkt (tuszk drobiowe) spada z linii technologicznej do otworu wlotowego wanny i dostaje się w strefę działania dysz. Tuszki płyną swobodnie wraz z roztworem w kierunku wylotu, gdzie przez przenośnik wyładujący 4 i przenośnik ociekowy 5 spadają na ruszt ociekowy 7 pod natrysk wodny, który spłukuje z nich resztki roztworu solanki. Zamrażalnia pracuje w sposób ciągły z wydajnością około 1000 kg/h. Tuszki są zamrażane do głębokości ok. 2 cm, a dalsze domrażanie następuje w tunelu owiewowym.

6.7.6. Zamrażanie w cieczach wrzących

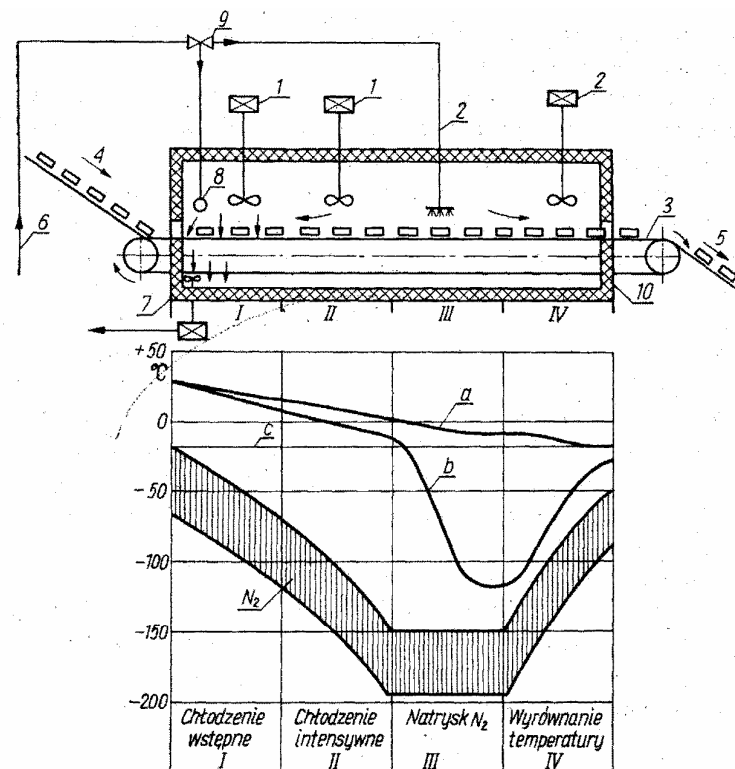
Metoda obejmuje głównie zamrażanie w ciekłym azocie (LNF), dwutlenku węgla (LCO₂F), freonie (LFF) i bardzo rzadko w ciekłym powietrzu (LAF).

Zamrażanie w ciekłym azocie odznacza się szczególnie doskonałymi warunkami wymiany ciepła i bardzo krótkim czasem trwania procesu (3÷10 min). W ciekłym azocie zamraża się prawie wszystkie rodzaje żywności. Obecnie stosuje się jedynie zamrażanie przez natrysk ciekłego azotu.

W metodzie zamrażania przez natrysk ciekłego N₂ wyróżniamy 4 etapy procesu (rys. 6-30). Produkt na przenośniku siatkowym przechodzi kolejno przez strefę schładzania wstępnego (I), właściwego zamrażania parami zimnego azotu (II), natrysku ciekłego azotu (III) i wreszcie strefę wyrównania temperatury do poziomu ustalonego dla składowania (IV). Ciekły azot, doprowadzany jedynie w strefie III, rozchodzi się już w postaci pary w dwóch kierunkach. Jego główny strumień, ok. 99% par N₂, kieruje się kolejno do stref II i I, przeciwnie do biegu taśmy z produktem, a niewielka ilość (ok. 1% N₂) — do strefy IV z biegiem taśmy, w kierunku wylotu produktu. Ten drugi strumień powstrzymuje przenikanie wilgotnego powietrza z otoczenia i chroni wnętrze przed zaszronieniem.

Wentylatory odśrodkowe w strefie II wywołują ruch par azotu równoległy do taśmy z prędkością $v = 15$ m/s, co przy bardzo dużej różnicy temperatury między produktem a ośrodkiem chłodzącym powoduje dużą prędkość zamrażania. W strefie I wentylatory osiowe tłoczą strumień par azotu w kierunku prostopadłym do taśmy. Azot w temperaturze około -20°C

wyciągany jest wentylatorem (tzw. ekshaustorem), którego dysza ssawna znajduje się pod taśmą w pobliżu wlotu produktu. Podział strumienia par azotu jest regulowany wydajnością tego wentylatora oraz specjalnymi przesłonami między poszczególnymi strefami tunelu. W strefie natrysku izolowana obudowa tworzy rodzaj wanny, na którą ścieka nadmiar rozpylanej cieczy, zawracanej po przefiltrowaniu do zbiornika azotu. Czujniki oporowe termometrów umieszczone w tunelu dają impuls do elementów regulujących dopływ ciekłego azotu.



Rys. 6-30. Zasada pracy i rozkład temperatury w natryskowej zamrażalni na ciekły azot

1 — wentylatory osiowe i osiowe, 2 — dysze natryskowe N₂, 3 — przenośnik taśmowy, 4 i 5 — wlot i wylot produktu, 6 — zasilanie ciekłym N₂, 7 — wentylator wyciągowy zużytego N₂, 8 — czujnik termostatu, 9 — zawór termoregulacyjny, 10 — izolowana wanna
a — temperatura środka produktu, b — temperatura powierzchni produktu, c — średnia końcowa temperatura produktu

Przebieg zamrażania jest następujący: produkt jest wprowadzany na taśmie do strefy I, gdzie parami azotu o temperaturze $-20\div-100^{\circ}\text{C}$ jest wstępnie schłodzony do temperatury zamrażania. W strefie II wskutek intensywnej wymiany ciepła z parami azotu o temperaturze $-100\div-190^{\circ}\text{C}$ produkt zostaje zamrożony, ale temperatura jego środka jest nadal bliska 0°C . W strefie III bezpośredni natrysk ciekłego azotu powoduje całkowite zamrożenie produktu. Temperatura na powierzchni produktu dochodzi do -100°C i niżej, w środku zaś $-5\div-10^{\circ}\text{C}$. Wyrównanie tych temperatur do pożądanego poziomu -20°C następuje w strefie IV. Rozkład temperatury w tunelu w czasie zamrażania pokazano na rys. 6-30.

Zamrażalnie LNF. (w ciekłym azocie) są budowane w kształcie tunelu z taśmą siatkową. Obudowa izolacyjna tunelu jest wykonana z poliuretanu z obustronną wykładziną z blachy kwasoodpornej. W strefie natrysków (III) obudowa tworzy wannę, na którą ścieka nadmiar rozpylanego, ciekłego N_2 . Ciekły N_2 spływa przez filtr do zbiornika azotu, skąd jest tłoczony pod ciśnieniem i 50 kPa ponownie do dysz.

Zamrażanie produktów w opakowaniach jest nieopłacalne, gdyż warstewka powietrza między produktem a ośrodkiem chłodzącym (N_2) obniża tak bardzo przejmowalność energii cieplnej, że proces przebiega w sposób zbliżony do procesu w tunelu owiewowym. Stosować można jedynie opakowania próżniowe w folii ściśle przylegającej do produktu i odpornej na działanie bardzo niskiej temperatury. Wielkość zamrażanych porcji wpływa także na wydajność urządzenia. Wzrost grubości produktu powoduje gwałtowne obniżanie prędkości zamrażania. Aparaty LNF odznaczają się lekką i prostą konstrukcją, małymi wymiarami, szybkim uruchomieniem oraz prostą obsługą. W okresie postoju nie wymagają konserwacji. Dzięki temu mogą być wykorzystywane np. do zamrażania okresowych nadwyżek produkcyjnych, niemożliwych do przerobienia za pomocą urządzeń stałych. Koszt inwestycyjny aparatów LNF stanowi $1/5$ nakładów na tunele fluidyzacyjno-taśmowe o podobnej wydajności. Sprawność zamrażalni na ciekły azot wynosi w praktyce $0,74\text{-}0,85$.

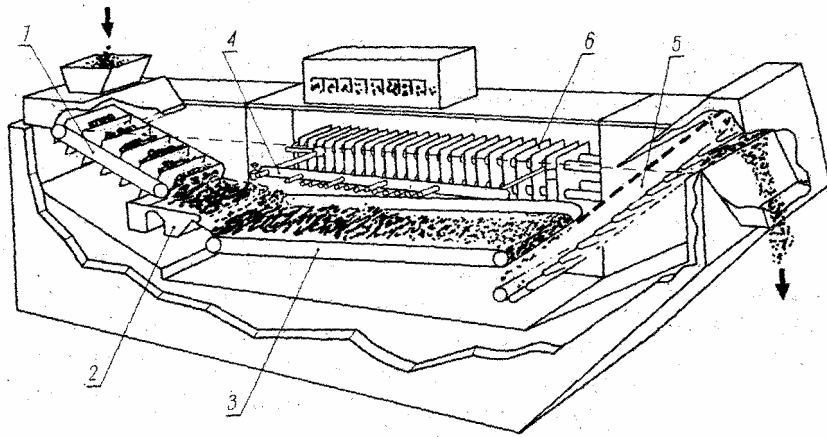
Zamrażanie w ciekłym CO_2 (LCO_2F). W warunkach ciśnienia atmosferycznego dwutlenek węgla może występować jedynie w stanie gazowym lub stałym (suchy lód). Używany do celów zamrażalniczych, ciekły CO_2 jest przechowywany w izolowanych zbiornikach w temperaturze $-20\div-30^{\circ}\text{C}$ i ciśnieniu $1,5\div2,0\text{ MPa}$. Podobnie jak w przypadku ciekłego azotu, ciepło użyteczne q_c ciekłego CO_2 zależy od temperatury odlotowej gazu i

wynosi: $353,3\text{ kJ/kg}$ w temperaturze 0°C , $329,5\text{ kJ/kg}$ w temperaturze -30°C i $305,9\text{ kJ/kg}$ w temperaturze -60°C . Metoda zamrażania za pomocą ciekłego CO_2 jest podobna do systemu LNF, a zużycie ciekłego CO_2 jest w przybliżeniu równe zużyciu ciekłego azotu.

Zamrażanie w ciekłym freonie umożliwia uzyskanie najmniejszych czasów zamrażania produktów. Zamrażanie groszku trwa $0,5\text{ min}$, frytek — 1 min , fasolki $1\div2\text{ min}$, truskawek $2\div3\text{ min}$, hamburgerów $2\div4\text{ min}$, elementów drobiu $8\div10\text{ min}$; Freon jest szczególnie przydatny do mrożenia produktów delikatnych, takich jak: truskawki lub maliny. Bardzo duże prędkości zamrażania dają bardzo dobre rezultaty technologiczne. Produkty wrażliwe na zamrażalnicze zmiany struktury zachowują po rozmrożeniu swoje walory smakowe i zapachowe, a zmiany kształtu i wyciek są minimalne. Koszt zamrażania metodą freonową jest nieco wyższy niż przy stosowaniu metod tradycyjnych, ale wielokrotnie niższy od zamrażania w ciekłym azocie.

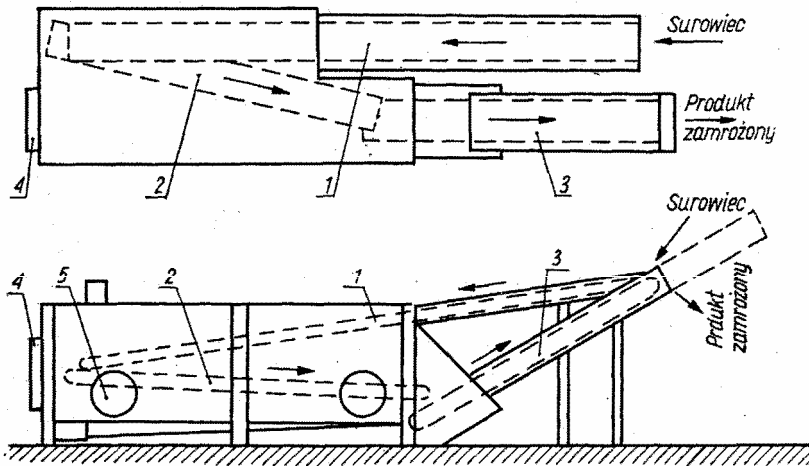
Przebieg zamrażania przedstawia rys. 6-32. Przenośnik 1 podaje produkt do pojemnika 2 z przepływającym ciekłym freonem. Dzięki bardzo dobrym warunkom ciepła powierzchnia produktu jest zamrażana natychmiast. Powstająca glazura lodu chroni produkt przed przymarzeniem do siatki przenośnika i wzajemnym zlepianiem się jego cząstek. Strumień ciekłego freonu porywa cząstki produktu i przenosi je na przenośnik poziomy 3, gdzie zachodzi główny proces zamrażania. Zamontowane nad tym przenośnikiem dysze 4 rozpylają ciekły freon, kierując go na przesuwający się produkt, dzięki czemu następuje jego pełne zamrożenie.

Zamrożony produkt spada na ukośny przenośnik wyładowczy 5, który wyprowadza go na zewnątrz izolowanego tunelu. Tutaj następuje końcowa faza procesu — odparowanie resztek czynnika z powierzchni produktu, dzięki czemu jego temperatura obniża się do -20°C , a nawet niżej. Jednocześnie otrzymuje się produkt czysty, bez domieszek freonu. Podczas kontaktu freonu z produktem następuje jego silne parowanie. Intensywne odbieranie ciepła od produktu polega na wykorzystaniu ciepła parowania czynnika. Mokre pary freonu skraplają się na powierzchni wymiennika ciepła 6 (parownika normalnej instalacji chłodniczej o wymaganej temperaturze wrzenia czynnika $-43\div-45^{\circ}\text{C}$). Wymiennik znajduje się wewnątrz tunelu. Powstały ciekły freon zawracany jest ponownie do obiegu. Straty eksploatacyjne wynoszą ok. $20\div30\text{ kg}$ czynnika na 1 t zamrożonego produktu.



Rys. 6-32. Zasada pracy immersyjnej zamrażalni freonowej

Zamrażalnia LFF (Liquid Freon Freezant — w ciekłym freonie) jest pokazana schematycznie na rys. 6-33. Zamrażalnie te cechuje duża oszczędność miejsca (ok. 50% w stosunku do tuneli fluidyzacyjnych), na powierzchni produktu, zatem wartość parametru a zbliżona jest do ciągłych



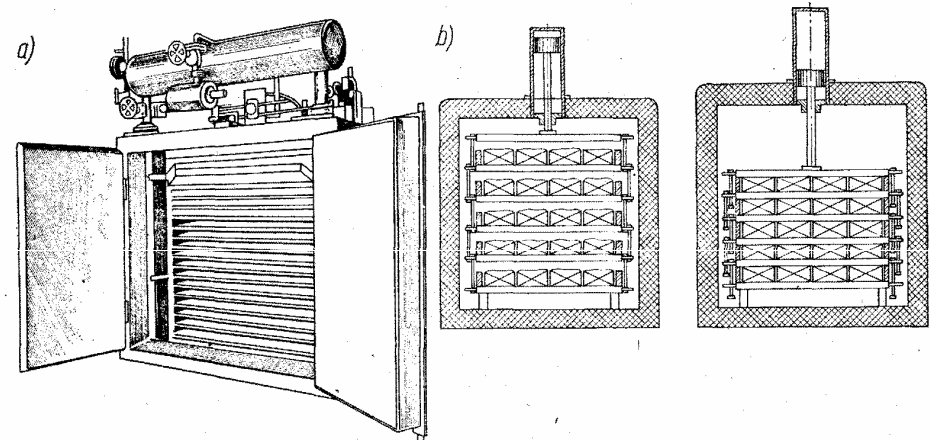
Rys. 6-33. Zamrażalnia freonowa LFF systemu Du Ponta o wydajności 1,4 t/h
1 — przenośnik zasilaający, 2 — taśma natryskowa, 3 — przenośnik wylotowy, 4 — tablica kontrolna, 5 — otwór kontrolny

linii technologicznych o różnych wydajnościach i szerokim wyborze produktów.

Zamrażanie w ciekłym powietrzu ma przebieg podobny do zamrażania w ciekłym azocie. Tunel ma również 4 strefy z tym, że ciekłe powietrze nie jest wtryskiwane bezpośrednio na powierzchnię produktu, ze względu na niekorzystne działanie tlenu, lecz w strumień powietrza z wentylatora. Dawki ciekłego powietrza wtryskiwanego do obiegu są regulowane zaworem termostatycznym nastawionym na odpowiednią temperaturę wnętrza tunelu. W metodzie tej nie ma bezpośredniego parowania cieczy na powierzchni produktu, zatem wartość parametru a zbliżona jest do wartości dla tuneli owiewowych z bardzo silną wentylacją i wynosi $30\div 40$ W/(m²·K). Czas zamrażania jest trzykrotnie krótszy niż w metodzie owiewowej dzięki bardzo dużej różnicy temperatury między strefami.

6.7.7. Zamrażanie kontaktowe

Zamrażanie kontaktowe, oprócz zamrażania w powietrzu, należy do najstarszych technik zamrażania żywności. Produkt, zwykle opakowany w regularne, płaskie porcje bądź płaskie bloki, ustawia się na metalowych (najczęściej aluminiowych) tacach, pomiędzy płyty, które są następnie dociskane hydraulicznie (rys. 6-34), aby stworzyć dobry kontakt z produktem



Rys. 6-34. Zasada zamrażania kontaktowego: a) widok zamrażarki kontaktowej, b) położenie płyt przed dociśnięciem i po dociśnięciu zamrażanego produktu

W starych urządzeniach kontaktowych ośrodkiem chłodzącym płyty była

solanka. Obecnie płyty chłodzi się drogą bezpośredniego odparowania czynnika chłodniczego. Brak pośredniego ośrodka chłodzącego, jakim jest — np. w zamrażalniach owiewowych — powietrze, umożliwia podwyższenie temperatury parowania czynnika chłodniczego od -25°C do -40°C . Warunki wymiany ciepła w zamrażalniach kontaktowych są bardzo dobre, a przejmowalność energii cieplnej osiąga wartość $\alpha = 500\div 1000 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$, dzięki czemu proces zamrażania trwa bardzo krótko.

Przy odpowiednim docisku płyt (w granicach $5\div 70 \text{ kPa}$) wymiana ciepła jest zależna właściwie jedynie od grubości zamrażanej warstwy. I tak np. przy temperaturze płyt — 35°C czas zamrażania bloków grubości 50 mm wynosi około 1 h, cienkich filetów zaś grubości 25 mm — $12\div 15 \text{ min}$. Warstwa produktu zamrażanego kontaktowo powinna mieć jednakową grubość. Różnice w grubości powodują pogorszenie kontaktu płyt z produktem i przedłużają czas zamrażania. Urządzenia kontaktowe — płytowe nie nadają się do zamrażania produktów o nieregularnych kształtach, np. drobiu w tuszkach, większych ryb.

Ogromną zaletą urządzeń płytowych jest duża zwartość konstrukcji, wpływająca na wysoką produktywność. Wynosi ona $80\div 120 \text{ kg}$ produktu na 1m^2 płyt. Zaletą jest również prostota obsługi. Wydajność zamrażalni kontaktowej zależy w dużym stopniu od stopnia wypełnienia opakowania. Czas zamrażania różnych produktów tej samej grubości jest w przybliżeniu ten sam; produkty nie wypełniające szczelnie opakowania muszą być zamrażane dłużej. Dla niektórych produktów wyznaczono współczynniki zmniejszające nominalną wydajność urządzenia kontaktowego. Wynoszą one np. dla: groszku w kartonach $0,55\div 0,7$; szpinaku w kartonikach $0,85$; szpinaku puree $0,95$; truskawek luzem w kartonikach $0,55$.

Wydajność zamrażalni zależy ponadto od temperatury parowania czynnika oraz rodzaju opakowania produktu.

Urządzenia kontaktowe należą do najbardziej ekonomicznych pod względem zużycia energii i zajmowanej przestrzeni. Brak wentylatorów i stosunkowo wysoka temperatura parowania powodują, że zużycie energii w tych aparatach jest o $40\div 50\%$ niższe niż w tunelach owiewowych. Aparat wydajności $600\div 800 \text{ kg/h}$ zajmuje przestrzeń zaledwie około 10m^3 i powierzchnię 4 m^2 .

Wadą aparatów kontaktowych jest stosunkowo pracochłonna i trudna do zmechanizowania obsługa i okresowy charakter pracy. Ostatnio wprowadza się zamrażalnie płytowe o pracy ciągłej, umożliwiając włączenie procesu zamrażania do potokowej linii produkcyjnej.

Zamrażalnie kontaktowe są skonstruowane jako samodzielne urządzenia o poziomym lub pionowym układzie płyt z agregatem chłodniczym lub jako urządzenia, do których „zimno” dostarcza się z centralnej maszynowni chłodniczej. Wyróżniają się one małymi wymiarami oraz łatwością montażu i nie mają wad zamrażalni tunelowych. Zasadniczą ich wadą jest konieczność stosowania form metalowych i stosunkowo mała zdolność przerobowa ($18 \text{ t}/24 \text{ h}$).

Każdy produkt powinien być zamrożony taką metodą, przy której warunki wymiany ciepła i efekt technologiczny procesu są najlepsze. Półtusze i ćwierćtusze należy zamrażać w tunelach owiewowych, na hakach lub stojakach; ryby, mięso w blokach — w aparatach kontaktowych lub na tacach żebrowych; owoce jagodowe, rozdrobnione warzywa, groszek, fasolkę, frytki itp. — metodą fluidyzacyjną; drób i całe ryby oraz niektóre produkty szczelnie opakowane — metodą immersyjną.

Błędny wybór metody daje nie tylko pogorszenie jakości produktu, ale straty ekonomiczne i energetyczne. Błędem byłoby, na przykład, zamrażanie groszku czy całych owoców jagodowych w aparacie kontaktowym lub w tunelu owiewowym na tacach. Wymiana ciepła, która się tutaj odbywa, polega głównie na przewodnictwie ciepła i jest poważnie utrudniona wskutek niejednorodności warstwy. Ponadto stosowanie docisku płyt pod pewnym nadciśnieniem powodowałoby uszkodzenia mechaniczne produktów i tym samym ich gorszą jakość. Podobnie niewłaściwe byłoby zamrażanie drobiu w aparatach kontaktowych — płytowych, gdyż ze względu na jego nieregularny kształt nie zapewniłoby się wykorzystania pełnej powierzchni przylegania.

Produkty paczkowane powinno się również zamrażać metodą kontaktową (bądź immersyjną). Aby zmniejszyć izolacyjne działanie opakowania, konieczne jest zastosowanie docisku (aparaty kontaktowe, tace dociskane).

Niewłaściwa metoda zamrażania przedłuża czas trwania procesu, zwiększa ususzkę, zużycie energii wskutek dłuższego czasu pracy silników oraz zmniejsza przelotowość urządzenia.

Dobór właściwej metody zamrażania ma zatem istotny wpływ na jakość zamrożonego produktu oraz ekonomię procesu zamrażania. Każda grupa produktów, a nawet poszczególne produkty, mają sobie właściwą i optymalną metodę zamrażania, co zestawiono w tabeli.

Zestawienie zalecanych metod i czasów zamrażania w odniesieniu do różnych produktów spożywczych

Produkt	Metoda zamrażania	Czas zamrażania w h	Ocena metody
Mięso w półtuszach i ćwierćtuszach	tunele owiewowe, na hakach, stelażach	10÷20	++
Mięso w porcjach jednostkowych	aparaty kontaktowe	0,5÷1,0	+++
Ryby całe luzem lub w skrzyniach	tunele owiewowe, sztapel ażurowy, stelaże	15÷25	++
Ryby całe lub częściowo obrobione	tunele owiewowe, specjalne, tace dociskowe	3÷4	+++
Filety rybne	tunele ślizgowe, tace dociskowe, żebrowane	2	+++
Filety, porcje jednostkowe	aparaty kontaktowe	0,5÷1,0	+++
Paluszki rybne luzem	tunele semifluidyzacyjne spiralne Gyro-Freeze	0,2÷0,3	+++
Krewetki smażone	LNF, LFF	0,1÷0,2	+++
Drób w skrzynkach i kartonach litych	tunele owiewowe, sztapel ażurowy	36÷48	+
Drób w skrzynkach i kartonach ażurowych	tunel owiewowy, stelaże	16÷24	++
Drób w opakowaniu próżniowym, luzem	tunel specjalny do drobiu, kosze z drutu	1,5÷3,0	+++
Drób opakowany jak wyżej	kombinacja: zamrażalnia immersyjna + tunel owiewowy	1,5÷3,0	+++
Masło w beczkach lub kartonach	tunel owiewowy, sztapel ażurowy	36÷52	+
Masło w porcjach jednostkowych	aparaty kontaktowe	0,5÷1,0	+++
Dania gotowe, porcje jednostkowe	tunele owiewowe, stelaże	2,0÷5,0	++
Dania gotowe jak wyżej	aparaty kontaktowe	1,0÷1,5	+++
Masa jajowa w puszkach	tunele owiewowe, stelaże	16÷24	+++
Truskawki, maliny luzem	tunele owiewowe, sita	2÷4	++
Truskawki, maliny	tunele fluidyzacyjno-taśmowe	0,2÷0,3	+++
Truskawki, maliny	LNF, LFF	0,1	+++
Porzeczki, agrest, wiśnie, śliwki, groszek, fasolka, frytki itp.	tunele fluidyzacyjne lub fluidyzacyjno-taśmowe	0,1÷0,2	+++
Owoce w zalewie, przeciery, porcje jednostkowe lub bloki	tunele owiewowe, stelaże	3,0÷5,0	+
Sałatka jak wyżej luzem	LFN, LFF	0,1	+++
Szparagi luzem	LFN, LFF	0,1	+++
Pieczczywo i ciasta	tunel owiewowy, stelaże	8÷12	++
Pieczczywo jak wyżej	LFN	2,0÷3,0	+++

Ocena: + — dopuszczalne, ++ — dobre, +++ — bardzo dobre.

6.8. Zmiany zamrażalnicze żywności

Zmiany własności produktu zależą od składu chemicznego i właściwości surowców wyjściowych oraz techniki i technologii zamrażania, a później przechowywania i rozmrażania. Jakość mrożonych produktów zależy zatem od pierwotnych zmian poprzedzających zamrażanie oraz wtórnych zmian zachodzących w poszczególnych fazach obróbki chłodniczej. Procesy te trudno jest oddzielić i dlatego rozpatruje się je na ogół łącznie, jako kompleksowy efekt obróbki- zamrażalniczej. Przemiany zapoczątkowane w fazie obróbki wstępnej, i w czasie zamrażania zostają pogłębione w czasie przechowywania, a ujawniają się dopiero w pełni po rozmrożeniu. Zmiany w produktach żywnościowych w wyniku obróbki chłodniczej dzielimy na fizyczne, chemiczne, biochemiczne i mikrobiologiczne. Zmiany fizyczne są związane z przemianą fazową wody w lód, stanowiącą istotę zamrażania, oraz z ubytkami masy produktów, czyli tzw. ususzką, a w skrajnych wypadkach z tzw. oparzeliną mrozową. Na uszuskę najbardziej istotny wpływ ma zastosowana metoda zamrażania. Utrata wody (ususzka) podczas zamrażania zawiera się w granicach 0,2÷3%, w zależności od prędkości, a przede wszystkim metody zamrażania, a także od cech charakterystycznych zamrożonej żywności. Szkodliwość ususzki wynika nie tylko ze strat masy produktu, ale również — i przede wszystkim — z poważnego obniżenia jakości produktu. Zamrażanie żywności w opakowaniach paroszczelnych nie powoduje wydzielania wody na zewnątrz opakowania, ale jeśli nie przylega ono ściśle do produktu i występują wolne przestrzenie powietrza, to można zaobserwować wówczas szronienie wewnętrznej powierzchni opakowań. Jest to tzw. ususzka wewnętrzna (bez zmiany masy brutto opakowanego produktu). Największe ubytki masy mają miejsce podczas zamrażania owiewowego (2÷3%).

Zmiany chemiczne, biochemiczne i mikrobiologiczne, a także histologiczne (rekrystalizacja) żywności w czasie zamrażania i przechowywania omówione zostaną łącznie w rozdz. 9

8.3. Temperatury przechowywania produktów schłodzonych i zamrożonych

Temperatura jest podstawowym parametrem klimatycznym decydującym o zmianie jakości produktów. Trwałość produktów, to znaczy czas, w którym zmiany jakościowe nie wykraczają poza założony, dopuszczalny zakres, jest — wprawdzie nie wyłącznie, ale przede wszystkim — funkcją temperatury. Dodatkowe środki techniczne, jak np. przechowywanie w atmosferze gazów obojętnych, stosowanie opakowań próżniowych, stosowanie przeciwutleniaczy, działają jedynie na powierzchnię składowanych produktów). nie mają wpływu na procesy biochemiczne zachodzące nieprzerwanie wewnątrz produktów. Dlatego we współcześnie budowanych chłodniach dąży się do obniżenia temperatury składowania mrożonej żywności poniżej -18°C , przechowując ją w temperaturze -30°C . Obniżenie temperatury składowania mrożonej żywności z -18°C do -30°C pozwala na przedłużenie dopuszczalnych czasów przechowywania, np. wieprzowiny o 50%, a masła nawet o 128%. Obniżenie temperatury przechowywania skutecznie zmniejsza również nieodwracalne zmiany jakościowe żywności wywołane ususzką. Dotyczy to głównie produktów składowanych luzem, np. półtusze wołowe przechowywane w temperaturze -30°C wykazują ususzkę do 1,2% wobec 5,2% w tym samym czasie przechowywania w temperaturze -18°C . Za obniżeniem temperatury przemawia również istniejąca tendencja systematycznego wzrostu objętości budowanych chłodni i komór, w których przechowywane są różne asortymenty mrożonej żywności. Aby więc ograniczyć absorpcję zapachów i tym samym rozszerzyć zakres wspólnego składowania różnych produktów, należy istotnie obniżyć temperaturę.

Orientacyjne okresy przechowywania przykładowych produktów mrożonych w chłodniach wg PN-83/A-07005 „Towary żywnościowe. Warunki klimatyczne i okresy przechowywania w chłodniach”

Lp.	Grupa produktów	Zakres temperatur komór w $^{\circ}\text{C}$			
		14-18	18,1-22	22,1-30	>30
okresy przechowywania, m-ce					
1	Wieprzowina w tuszach pełnych i zdekompletowanych	8	10	12	—
2	Części zasadnicze wieprzowiny w opakowaniu	—	12	14	—
3	Ślonina w opakowaniu	8	12	14	—
4	Wołowina z jałowic i wołców	6	12	15	—
5	Części zasadnicze wołowiny w opakowaniu	9	12	15	—
6	Cielęcina i baranina w tuszach lub elementach	4	6	9	—
7	Podroby w opakowaniu	4	6	8	—
8	Tuszki drobiu i elementy tuszek w osłonkach termokurczliwych	5	12	12	—
9	Elementy tuszek drobiu w woreczkach PE zamkniętych	2	4	7	—
10	Tuszki drobiu bez osłonek	2	3	5	—
11	Mięso z dziczyzny w blokach	8	10	12	—
12	Ryby chude i filety z tych ryb w opakowaniach zamkniętych	—	6	8	—
13	Filety porcjowane, panierowane, cięte z mrożonych bloków w opakow. jednostkowych.	—	3	5	10
14	Masło z okresu maj-wrzesień	4	6	8	6
15	Przetwory jajowe, pasteryzowane, bez dodatków	6	12	12	—
16	Owoce sypkie bez dodatków, owoce z cukrem (z wyjątkiem wiśni)	—	15	18	—
17	Warzywa do obrotu krajowego	—	15	18	—
18	Przeciery owocowe, koncentrat pomidorowy, zagęszczone soki z owoców cytrusowych	—	12	12	—
19	Lody śmietankowe i wyborowe, aromatyzowane	—	8	10	—
20	Lody deserowe, kremowe, torty lodowe	—	6	8	—
21	Produkty mięsne mielone, surowe	—	6	8	—
22	Produkty gotowe	—	10	12	—
23	Wyroby ziemniaczane	—	10	12	—
24	Wyroby mączno-ziemniaczane z nadzieniem	—	8	10	—
25	Ciastka półkruche i kruche z nadzieniami	—	6	8	—
26	Sosy	—	4÷6	6÷8	—