

Оптимизация технологических процессов холодильной обработки мяса

ЧУМАК И.Г., ШАХНЕВИЧ В.И., ОНИЩЕНКО В.П.

Одесский технологический институт холодильной промышленности, Одесса, СССР

В последние годы особое внимание уделяется мероприятиям, способствующим максимальному сохранению качества мяса и мясopодуkтов, сокращению естественных потерь при его холодильной обработке, переходу на выпуск продукции в виде полуфабрикатов либо блоков, автоматизации и механизации процессов холодильной обработки, унификации теплообменного оборудования, минимизации расходов энергоресурсов.

При всей разноплановости перечисленных требований они тесно взаимосвязаны и легко обнаружить ту основу, на базе которой они могут быть удовлетворены, а именно, создание единой технологии процесса интенсивной холодильной обработки, совмещенной во времени с транспортными операциями мясopодуkтов в камере и с ликвидацией последствий "пост-мортем" методом электростимулирования или другими. Интенсификация процессов сопряжена с необходимостью устранения нежелательных явлений в кинетике образования кристаллов льда при холодильной обработке, уменьшением естественных потерь влаги мясopодуkтом, которые в свою очередь определяют его качество.

Если рассматривать в этой связи, например, процесс охлаждения мяса в воздухе, то все реализуемые и возможные технологические режимы можно описать единой математической моделью вида :

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} &= a \frac{\partial^2 T(x, \tau)}{\partial x^2}, \quad x \in [0, R], \tau > 0, \\ T(x, 0) &= f(x), \quad \frac{\partial T(0, \tau)}{\partial x} = 0, \\ -\lambda \frac{\partial T(R, \tau)}{\partial x} + \alpha(\tau) [T_c(\tau) - T(R, \tau)] &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (I)$$

При этом мясopодуkт моделируется бесконечной полуограниченной пластиной толщиной $\delta = 2R$, что в дальнейшем влечет к необходимости введения в расчетное температурное поле $T(x, \tau)$ коэффициента гомохронности, определяемого экспериментальным путем (для говяжьих полутуш с $\delta = 0,2$ м коэффициент гомохронности равен 0,56). Начальное температурное поле мяса - продукта $f(x)$, λ - коэффициент теплопроводности, a - коэффициент температуропроводности мясopодуkта, $\alpha(\tau)$ - переменный во времени коэффициент теплоотдачи, $T_c(\tau)$ - температура охлаждающего воздуха.

Поиск оптимального режима охлаждения осуществляется путем определения значения T_c и зависимости $\alpha(\tau)$, обеспечивающих выполнение сформулированных выше требований, которые в рамках математической модели могут быть записаны в виде :

$$abs(T(R, \tau) + 1.5^\circ C) \leq \varepsilon, \quad \varepsilon > 0, \quad (2)$$

$$abs(T_v(\tau) - 4^\circ C) \leq \varepsilon, \quad (3)$$

$$T_{np} = F_1(T_c(\tau), \alpha(\tau)) = \min, \quad (4)$$

$$\Delta G = F_2(T_c(\tau), \alpha(\tau)) = \min. \quad (5)$$

Условие (2) налагает ограничение на достижение поверхностью продукта $T(R, \tau)$ температуры замораживания, условие (3) определяет длительность процесса T_{np} , как время достижения заданной среднеобъемной температуры $T_v(\tau) = \frac{1}{R} \int_0^R T(x, \tau) dx$. Условия (3,4) минимизируют время

τ_{np} и величину естественных потерь влаги ΔG за весь процесс. Минимум ΔG достигается при минимальных среднеинтегральных во времени значениях температуры поверхности, а минимальное время процесса τ_{np} при технически реализуемых скоростях движения воздуха отвечающих максимальным значениям критерия $Bi = \frac{d(\tau) \cdot R}{\lambda}$ и значениях T_c , которые, с одной стороны, приводят к быстрому достижению поверхностью температуры замерзания $-1,5^\circ\text{C}$, и с другой стороны, за это же время достаточно понизить среднеобъемную температуру продукта. Это диктует необходимость проведения двухстадийного процесса охлаждения с постоянными значениями температур воздуха T_{c1} и T_{c2} в каждой стадии.

Тогда

$$\left. \begin{aligned} \tau_{np} &= F_1(T_{c1}, Bi_1, T_{c2}, Bi_2(\tau)), \\ \Delta G &= F_2(T_{c1}, Bi_1, T_{c2}, Bi_2(\tau)). \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Считая начальное температурное поле в первой стадии равномерным $T(x_0) = T_0 = 38^\circ\text{C}$ получим для температурного поля в конце первой стадии ($\tau = \tau_1$):

$$T(x, \tau_1) = T_{c1} - (T_{c1} - T_0) \sum_{k=1}^{\infty} B_k \cdot \cos \mu_k \frac{x}{R} \cdot \exp\left(-\frac{a \mu_k^2}{R^2} \tau_1\right),$$

которое является начальным распределением температуры $f(x)$ для второй стадии.

Нахождение температурного поля во второй стадии легко получить, если полное время процесса τ_{np} разбить на конечное число равных промежутков, т.е. положить $\tau = kh$, где h - шаг по времени, $k = 0, 1, 2, 3, \dots$

Тогда $\frac{\partial T(x, \tau_k)}{\partial \tau} \equiv \frac{\partial T_k(x)}{\partial \tau} \approx \frac{1}{h} [T_k(x) - T_{k-1}(x)]$, а решение задачи (I) имеет вид:

$$T_k(x) = A \operatorname{ch} \beta x + \beta \int_0^x T_{k-1}(y) \cdot \operatorname{sh} \beta(y-x) dy, \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (7)$$

где

$$\beta^2 = \frac{1}{ah}, \quad A = \frac{Bi_k \cdot T_{c2} + \beta \int_0^R T_{k-1}(y) [\beta R \cdot \operatorname{ch} \beta(y-R) - Bi_k \cdot \operatorname{sh} \beta(y-R)] dy}{\beta R \cdot \operatorname{sh} \beta R + Bi_k \cdot \operatorname{ch} \beta R}$$

Пользуясь (7) находим $T_v(\tau_k)$, $T(R, \tau_k)$ и соответственно τ_{np} и ΔG с последующим поиском минимума этих величин для различных значений T_{c1} , Bi_1 , T_{c2} , $Bi_2(\tau)$. Реализация этих вычислений на ЭВМ для говяжьих полутуш с $\delta = 0,2$ м привела к результатам:

$$T_{c1} = -20^\circ\text{C}; \quad Bi_1 = 10; \quad \tau_1 = 0,48 \text{ ч.}; \quad T_{c2} = -6^\circ\text{C};$$

$$Bi_2(\tau) = \begin{cases} 10, & \forall \tau \leq 5,0 \text{ ч.} \\ 9,973 - 1,3331(\tau-5) + 0,102(\tau-5)^2 - 0,0004(\tau-5)^3, & 10 < \tau \leq 15,5 \text{ ч.} \end{cases}$$

При этом в конце первой стадии среднеобъемная температура понижается до 32°C , а температура поверхности приближается до $-1,5^\circ\text{C}$. Этот режим получил название предварительного охлаждения и играет существенную роль в минимизации ΔG и τ_{np} . Во второй стадии температура поверхности поддерживается близкой к температуре замерзания, а естественные потери ΔG составляют $\sim 1,1\%$. Такой режим назван программным охлаждением и является оптимальным с точки зрения удовлетворения перечисленных выше требований. С учетом коэффициента гомотехности суммарное время охлаждения составляет ~ 9 ч.

Аналогичный подход применен при поиске наиболее интенсивных режимов замораживания с оптимизацией функционала, описывающего качество мясopодукта, полученного после его дефростации в конце срока хранения. Однако, каким бы ни был выбранный режим холодильной обработки мясopодукта важными являются технические решения, как можно реализующие этот режим для дискретного потока продукта. Поточный метод, т.е. совмещение транспортных операций с технологическими, определяет камеры холодильной обработки как систему протяженных туннелей вдоль которых перемещаются единицы продукта. Проектирование таких камер требует знания тепловых нагрузок и соответствующего размещения теплообменного оборудования вдоль туннеля, определение геометрических размеров туннеля и характеристик конвейера, обеспечивающего транспортные операции в нем. Дискретность поступления продукции определяет пошаговое движение конвейера как экономически целесообразное.

При определении тепловой нагрузки от потока продукта будем считать известными следующие величины: τ_{np} - длительность процесса холодильной обработки одной единицы продукта; N - число позиций на одной нитке конвейера; $\Delta\tau$ - период времени пошагового движения конвейера ($\Delta\tau = \frac{\tau_{np}}{N}$); $q(\tau) = -\lambda \frac{\partial T(R, \tau)}{\partial x}$ - плотность теплового потока с поверхности продукта; l - число загрузок туннеля за произвольный период времени, для которого определяется тепловая нагрузка; $\tau_0, \tau_1, \tau_2, \dots, \tau_e$ - длительность соответствующих загрузок ($\tau_0 = 0$); $\theta_0, \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_e$ - длительность перерывов между загрузками. Имеет смысл $\theta_i \gg \Delta\tau$, при условии $\theta_i < \tau_{np}$ ($\theta_0 = \theta_e = 0$);

Введем в рассмотрение следующие величины: количество поступлений m_j , загружающих туннель на 100%; номер поступления n_{jt} в момент времени τ ; число позиций K_j , занятых единицами продукции в $(m_j + 1)$ поступлении в период j -ой загрузки. При этом

$$m_j = \text{ENTIER} \left(\frac{\tau_j}{\tau_{np}} \right), n_{jt} = 1 + \text{ENTIER} \left(\frac{\tau - \sum_{i=1}^j (\tau_{i-1} + \theta_{i-1})}{\tau_{np}} \right), K_j = \text{ENTIER} \left(\frac{\tau_j - m_j \tau_{np}}{\Delta\tau} \right).$$

Отметим, что в любой рассматриваемый момент времени $\tau \geq \sum_{i=1}^j (\tau_{i-1} + \theta_{i-1})$ в туннеле могут находиться единицы продукции максимум двух поступлений ($f = 1, 2$) периода j -ой загрузки. Время R_{jt} начала n_{jt} -го поступления определяется соотношением

$$R_{jt} = \sum_{i=1}^j (\tau_{i-1} + \theta_{i-1}) + (n_{jt} - 1) \tau_{np}, R_{j2} = R_{j1} - \tau_{np}.$$

Если F - поверхность единицы продукции, то суммарный тепловой поток от продукции j -ой загрузки будет равен

$$Q_j(\tau) = F \cdot \sum_{f=1}^2 \sum_{z_f=1}^{S_f} q(\tau - R_{jf} - (z_f - 1) \Delta\tau),$$

где суммирование по f означает сложение тепловых потоков от единиц продукции двух различных поступлений, находящихся в камере в момент времени τ , а суммирование по z_f - суммирование по единицам продукции в каждом из этих поступлений. Определение S_f легко осуществить анализируя значения $m_j, n_{jt}, K_j, R_{jt}, \tau$ и соотношения между ними. В целом необходимость вычисления $Q_j(\tau)$ в произвольный момент времени τ определяется условиями

$$Q_j(\tau) \neq 0, \text{ если } \sum_{i=1}^j (\tau_{i-1} + \theta_{i-1}) \leq \tau < \tau_{np} + \sum_{i=1}^j (\tau_i + \theta_{i-1}),$$

$$Q_j(\tau) = 0, \text{ если } \tau \geq \tau_{np} + \sum_{i=1}^j (\tau_i + \theta_{i-1}),$$

поскольку $\tau_{np} + \sum_{i=1}^j (\tau_i + \theta_{i-1})$ является временем выгрузки из туннеля последней единицы продукции j -ой загрузки. Общая тепловая нагрузка на туннель в любой момент времени очевидно равна

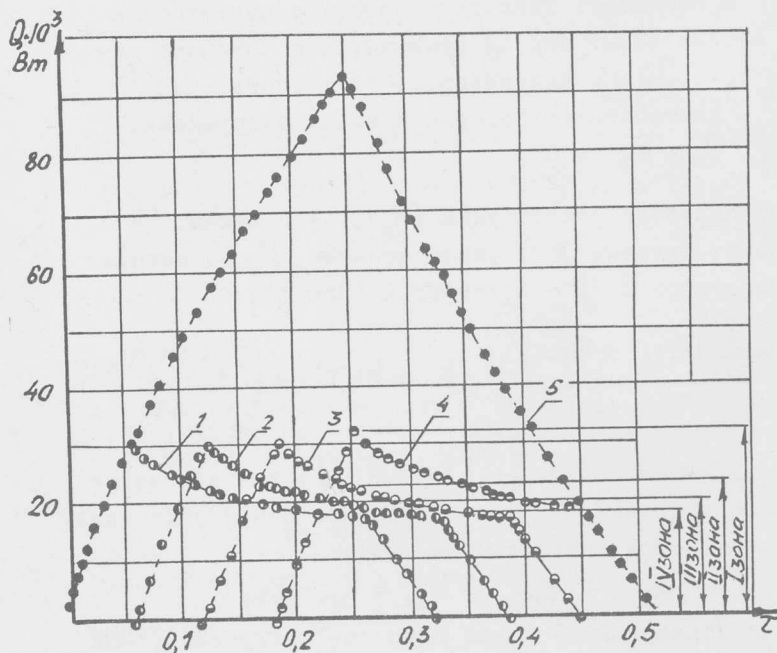
$$Q(\tau) = \sum_{j=1}^l Q_j(\tau)$$

На рисунке представлено изменение тепловой нагрузки во времени туннеля предварительного охлаждения с числом позиций на нитке конвейера $N = 64$. Режим поступления говяжьих полутуш задан величинами:

$$l = 4; \tau_1 = \tau_2 = \tau_3 = 5,862 \cdot 10^{-2} \text{ ч.}, \tau_4 = 6,281 \cdot 10^{-2} \text{ ч.}, \theta_1 = \theta_2 = \theta_3 = 4,188 \cdot 10^{-3} \text{ ч.}$$

Каждый перерыв θ_i в этом случае приводит к одной незаполненной позиции на нитке конвейера. В момент времени $\tau = 0,254$ в туннеле находится 61 полутуша и оценка $Q_j(\tau)$, $j = 1, 2, 3, 4$ (на рис. соответственно кривые 1, 2, 3, 4) дает величины тепловых потоков от 15-16 полутуш, находящихся на различных этапах процесса их охлаждения (в различных зонах туннеля). Кривая 5 соответствует суммарной тепловой нагрузке $Q(\tau)$ туннеля. Из рисунка видно, что тепловые нагрузки на приборы охлаждения, расположенные в различных зонах туннеля по его длине при $\tau = 0,254$ ч., соответствующему максимальному заполнению туннеля полутушами, существенно отличаются - тепловая нагрузка от первой зоны почти в два раза превышает нагрузку четвертой зоны туннеля. Этот результат указывает на необходимость неравномерного размещения поверхностей приборов охлаждения вдоль туннеля в

соответствии с зависимостями $q(\tau)$ и $Q(\tau)$, а также делает несостоятельным проектирование с учетом средних значений тепловой нагрузки за весь процесс холодильной обработки.



Длина туннеля L также непосредственно связана с технологическими характеристиками процесса, в частности, если B - расстояние между соседними единицами продукции на конвейере, то

$$L = N \cdot B = \frac{\tau_{np}}{\Delta\tau} B.$$

Ширина камеры или число туннелей M в ней определяется условием согласования мощностей P цеха-поставщика единиц продукта и самой камеры

$$P \leq \frac{N \cdot g}{\tau_{np} - \Delta\tau} \cdot M,$$

где g - средняя масса единицы продукта. В итоге произведение NM выступает в роли "площади" камеры холодильной обработки. Например, реализация процесса охлаждения мясopодуKтов с применением режимов предварительного с последующим программным его охлаждением в

двух камерах требует следующих значений геометрических характеристик этих камер L_1 , L_2 , M_1 , M_2 :

$$L_1 = N_1 \cdot B; N_1 = \frac{\tau_1}{\Delta\tau_1}; L_2 = N_2 \cdot B; N_2 = \frac{\tau_2}{\Delta\tau_2}; \Delta\tau_2 = M_2 \cdot \Delta\tau_1; P \leq \frac{M_2 N_2 \cdot g}{\tau_1 - \Delta\tau_1} \cdot M_1; M_2 N_2 \geq \frac{\tau_2}{\Delta\tau_1},$$

где P - максимальная часовая производительность цеха первичной переработки скота, и τ_1, τ_2 - времена процесса, а $\Delta\tau_1$ и $\Delta\tau_2$ - периоды времени пошагового движения конвейера в соответствующих камерах. С точки зрения удовлетворения последних соотношением варьированием величин $\Delta\tau_1$ и $\Delta\tau_2$ можно обеспечить принятую технологию холодильной обработки в туннелях произвольной длины. С другой стороны гибкость выбора значений L_1 , L_2 , M_1 , M_2 позволяет обеспечить надежность системы в целом, удовлетворить строительным нормам и т.п. Реальный расброс единиц продукции по массе, категориям предопределяет количество необходимых туннелей в камере.

Таким образом, холодильная обработка в потоке позволяет увязать в единое целое технологические, технические и проектные решения, а предложенные алгоритмы являются основой оптимального проектирования предприятий с автоматическим управлением технологическим производственным процессом.