

Выбор толщины продуктов при их замораживании в виде блоков

Д-р техн. наук В.Н. ЭРЛИХМАН, д-р техн. наук Ю.А. ФАТЫХОВ, канд. техн. наук А.С. БЕСТУЖЕВ
Калининградский государственный технический университет (КГТУ)

The analysis of influencing refrigeration plant efficiency which takes into account their interrelation with the technological line for preparation of the product for refrigeration has been presented. The technique for determining optimal thickness of product which provides maximum efficiency of the refrigeration plant has been defined. The example of determining optimal product thickness has been given.

В производстве замороженных пищевых продуктов в форме блоков, в коробках и пакетах применяют, главным образом, воздушные и плиточные морозильные аппараты с периодической и пульсирующей загрузкой (выгрузкой). При этом толщины продукта в форме лежат в широких пределах и составляют от 15 до 100 мм. Так, в Англии одна из фирм выпускает плиточные и воздушные морозильные аппараты для замораживания мяса толщиной 15 мм, рыбы и яично-го меланжа – 50 мм, сосисок – 25 мм, гороха – 30 мм, мороженого – 40...45 мм. В России и других странах рыбу замораживают блоками толщиной 60...65 мм, мясо – 50 и 100 мм.

При выборе толщины замораживаемого продукта следует исходить, с одной стороны, из его размера, определяющего возможность его замораживания с заданной толщиной и, с другой стороны, из условия достижения максимальной производительности при обеспечении заданной конечной температуры за время замораживания τ .

Производительность морозильных установок обычно определяют по формуле

$$P = M/\tau, \quad (1)$$

где $M = \kappa \rho F \delta N$ – емкость морозильной установки;

κ – количество одновременно загружаемых порций продукта в рабочий орган морозильной установки (тележку, межплиточное пространство, блокформу и др.);

ρ , F , δ – плотность, поверхность и толщина блока соответственно;

N – количество рабочих органов для замораживания продукта в морозильной установке.

Формула (1) не учитывает взаимосвязи морозильной установки с работой технологической линии по подготовке и загрузке продукта, а также цикловые и внецикловые потери времени. Цикловые потери обусловлены наличием холостых ходов и простоев

рабочих органов, затратами времени на вспомогательные операции по подготовке продукта к замораживанию, его загрузке (выгрузке). Внецикловые потери связаны с периодической остановкой морозильных установок для снятия снежной шубы, проведения ремонтных работ, вхождения их в режим после остановки и др. В конечном итоге эти потери времени приводят к уменьшению производительности морозильных установок.

В морозильных установках с учетом цикловых и внецикловых потерь, а также взаимосвязи с работой технологической линии продолжительность цикла τ_0 – время между двумя последовательными загрузками (выгрузками) рабочего органа для замораживания продукта (блокформы, межплиточного пространства, этажерки для установок с пульсирующей загрузкой или всей установки с периодической загрузкой) – должна быть, с одной стороны, не меньше, чем сумма времени замораживания продукта τ и времени z на его загрузку и выгрузку. С другой стороны, τ_0 должна быть не меньше времени, затрачиваемого на подготовку продукта к загрузке всей установки, т.е.

$$\tau_0 \geq \tau + z e^{10} \text{ и } \tau_0 \geq N \tau_0, \quad (2)$$

где τ_0 – время, затрачиваемое в технологической линии на подготовку продукта к загрузке рабочего органа морозильной установки (фасование, упаковывание, укладка).

При $N \tau_0 > \tau + z$ требуемая продолжительность замораживания до заданной конечной температуры продукта и время на загрузку и выгрузку рабочего органа меньше времени на подготовку продукта к загрузке установки. В этом случае при заданной продолжительности замораживания τ технологическая линия и обслуживающий ее персонал не успевают подготовить продукт к замораживанию.

При $N \tau_0 < \tau + z$ технологическая линия и обслуживающий персонал успевают подготовить продукт, но

если сразу после подготовки продукта поместить его в морозильную установку, не будет выдержано заданное время замораживания и продукт будет недоморожен.

С учетом условий (2) формулы для производительности морозильной установки можно записать в развернутом виде:

$$P = \begin{cases} \kappa p F \delta N \left(\frac{1}{N\tau_0} - \frac{1}{T} \right) & \text{при } N\tau_0 \geq \tau + z; \\ \kappa p F \delta N \left(\frac{1}{\tau + z} - \frac{1}{T} \right) & \text{при } N\tau_0 < \tau + z. \end{cases} \quad (3)$$

$$(4)$$

В формулах (3) и (4) второй член в скобках $1/T$ отражает уменьшение производительности морозильной установки за цикл непрерывной работы T из-за ее первоначальной загрузки после остановки для оттаивания, ремонта, когда не происходит выпуск замороженной продукции.

Из уравнения (3) следует, что при $N\tau_0 > \tau + z$ производительность морозильной установки прямо пропорциональна толщине замораживаемых блоков и графически в координатах P , δ изображается прямыми линиями, исходящими из начала координат, угол наклона которых при прочих равных условиях определяется количеством рабочих органов для замораживания N и временем, затрачиваемым на подготовку продукта к замораживанию τ_0 .

Производительность морозильной установки возрастает с увеличением толщины замораживаемых блоков и уменьшением времени, затрачиваемого на подготовку продукта, и числа рабочих органов, что видно из преобразованного путем внесения в скобки величины N уравнения (3):

$$P = \kappa p F \delta \left(\frac{1}{\tau_0} - \frac{N}{T} \right). \quad (5)$$

При $N\tau_0 < \tau + z$ зависимость производительности морозильной установки от толщины замораживаемого блока имеет сложный характер, так как в выражении (4) продолжительность замораживания является, в свою очередь, функцией толщины. Исходя из теоретических зависимостей Р. Планка, Д.Г. Рютова и др., ее можно представить в виде формулы

$$\tau = A\delta^2 + B\delta, \quad (6)$$

где A и B – коэффициенты, зависящие от теплофизических свойств замораживаемого продукта и технологических условий проведения процесса замораживания.

После подстановки последнего выражения в уравнение (4) получим

$$P = \kappa p F N \left(\frac{\delta}{A\delta^2 + B\delta + z} - \frac{\delta}{T} \right). \quad (7)$$

График зависимости (7) в координатах P , δ представляет собой кривую третьего порядка, которая проходит через начало координат, имеет асимптоту (ось δ) и максимум при толщине блока δ_1 , определяемой корнем уравнения

$$\frac{dP}{d\delta} = \frac{d}{d\delta} \left[\kappa p F N \left(\frac{\delta}{A\delta^2 + B\delta + z} - \frac{\delta}{T} \right) \right]. \quad (8)$$

Однако не всегда целесообразно замораживать продукт в виде блоков толщиной δ_1 .

На рис. 1 представлены варианты совмещенных графиков функций $P = P(\delta)$ технологической линии подготовки продукта к замораживанию и морозильной установки, построенных по уравнениям (3) и (4).

Для совмещенных характеристик толщина блока δ_2 , соответствующая равенству производительности технологической линии производительности морозильной установки и абсциссе точки пересечения a , является положительным корнем уравнения, получаемого из совместного решения зависимостей (3) и (4):

$$A\delta^2 + B\delta + z - N\tau_0 = 0. \quad (9)$$

Если замораживать продукт в виде блоков толщиной $\delta_1 < \delta_2$ при $N\tau_0 > \tau + z$ (рис. 1, а), то максимальная производительность морозильной установки P_{\max} достигнута не будет, так как на подготовку продукта к загрузке всей морозильной установки затрачивается времени больше, чем сумма времени на замораживание и на выгрузку и загрузку продукта. Производительность морозильной установки составит P_1 , и продукт будет иметь конечную температуру ниже заданной. Сокращение производительности морозильной установки в этом случае вызвано уменьшением ее единовременной вместимости, и увеличение толщины блока от δ_1 до δ_2 приведет к повышению ее производительности до P_{\max} .

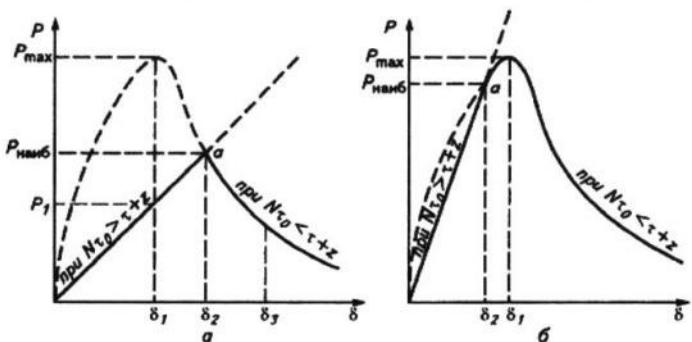


Рис. 1. Варианты совмещенных характеристик производительностей морозильной установки и технологической линии:
а – $\delta_1 < \delta_2$; б – $\delta_1 > \delta_2$

При толщине замораживаемого блока $\delta_3 > \delta_2$ также имеет место уменьшение производительности морозильной установки, так как возрастание продолжительности замораживания с увеличением толщины блока оказывает более сильное влияние, чем увеличение единовременной вместимости.

Для варианта, представленного на рис. 1, б, увеличение толщины блока от δ_2 до δ_1 приводит к повышению производительности морозильной установки до максимально возможного значения. В этом случае рост производительности морозильной установки достигается за счет увеличения ее емкости. При дальнейшем увеличении толщины блока производительность установки уменьшается вследствие более сильного возрастания продолжительности замораживания по сравнению с увеличением емкости установки.

Таким образом, для любого варианта совмещения графиков $P = P(\delta)$ существует оптимальная толщина блока, при которой достигается максимально возможная производительность P_{\max}^v морозильной установки.

Для варианта, представленного на рис. 1, а, $P_{\max}^v = P_{\text{найб}} < P_{\max}$ и достигается при δ_2 , а для варианта на рис. 1, б $P_{\max}^v = P_{\max}$ и соответствует толщине блока δ_1 .

Если δ_1 – корень уравнения (8), а δ_2 – положительный корень уравнения (9), то уравнение

$$dP/d\delta (A\delta^2 + B\delta + z - Nt_0) = 0 \quad (10)$$

содержит корни обоих уравнений и, как видно из рис. 1, максимально возможная производительность P_{\max}^v достигается при толщине блока δ , равной большему из чисел δ_1 или δ_2 .

Представленные теоретические положения по производительности морозильных установок позволяют определять оптимальную толщину блоков и соответствующую ей максимально возможную производительность в зависимости от характеристик морозильной установки, а также теплофизических свойств продукта и технологических параметров процесса замораживания.

Пример определения максимально возможной производительности и оптимальной толщины блока фарша из мяса трески при замораживании в роторной плиточной морозильной установке с числом секций $N = 23$ при начальной и конечной температурах продукта $t_h = +10^\circ\text{C}$ и $t_{kц} = -25^\circ\text{C}$ для различных температур охлаждающей среды t_0 , коэффициентов теплоотдачи α и τ_0 представлен на рис. 2.

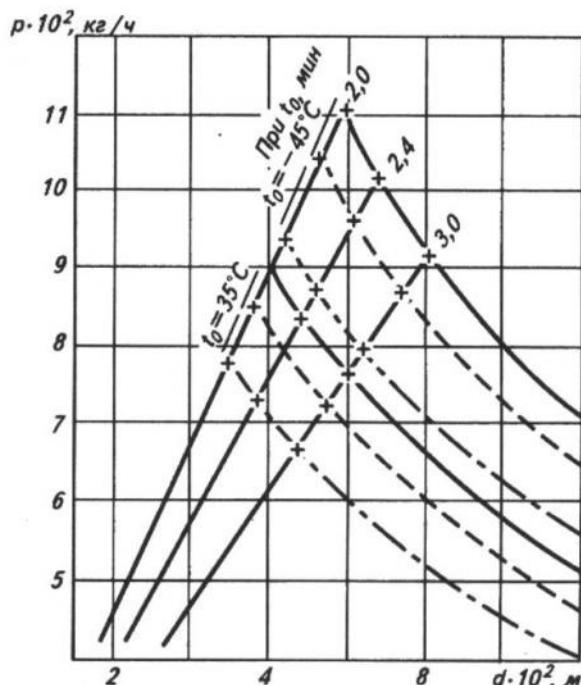


Рис. 2. Зависимость производительности роторной плиточной морозильной установки от толщины блока для различных значений t_0 , α , τ_0 при замораживании фарша из мяса трески ($N = 23$; $T = 48$ ч; $t_h = +10^\circ\text{C}$; $t_{kц} = -25^\circ\text{C}$)

— · —	$\alpha = 186 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$
— · —	$\alpha = 377 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$
—	$\alpha = 688 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$

С увеличением коэффициента теплоотдачи и понижением температуры охлаждающей среды оптимальная толщина блока и максимально возможная производительность морозильной установки увеличиваются, что объясняется сокращением продолжительности замораживания в связи с интенсификацией процесса его проведения и возможностью увеличения единовременной вместимости морозильной установки за счет увеличения массы блока.

Для практических условий эксплуатации роторных плиточных морозильных установок [$t_{kц} = -25^\circ\text{C}$, $\alpha = 300...400 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$] ($\tau_0 = 2,0...2,4$ мин, $t_0 = -40^\circ\text{C}$) можно рекомендовать оптимальную толщину блоков фарша из мяса трески 43...47 мм, ставриды 34...37 мм, трески и скумбрии 38...41 мм.

Замораживание указанных рыбных продуктов с оптимальной толщиной позволяет увеличить производительность морозильных установок в 1,5 раза по сравнению с их производительностью при общеустановленной толщине 60...65 мм.