

Снижение энергозатрат в процессах производства и хранения замороженных продуктов

Д-р техн. наук В. Н. ЭРЛИХМАН

Калининградский государственный технический университет
236000, Калининград, Советский пр., 1

The method for defining refrigeration medium temperature at producing and storing frozen products has been demonstrated by means of example. The method allows to get temperature values allowing minimum expenses securing sufficient quality of product.

Key words: product, temperature, quality, power, inputs, costs.

Ключевые слова: продукт, температура, качество, энергия, затраты, стоимость.

При производстве и хранении продуктов во многих случаях применяют ничем не обоснованные низкие температуры, что приводит к повышенным затратам энергии на производство холода. Известно, что понижение температуры охлаждающей среды и, соответственно, температуры кипения хладагента на один градус вызывает повышение расхода энергии на $\sim 4\%$ [1]. Поэтому определение рациональных режимов холодильной обработки и хранения при условии обеспечения необходимого качества продукта представляет задачу государственной важности.

Схема связи «качество продукции — энергия» в системе производства и хранения замороженной продукции представлена на рисунке.

Качество замороженного продукта, находящегося на хранении, непосредственно связано с температурой и продолжительностью хранения.

Рекомендациями Международного института холода эта связь определяется возможной длительностью хранения t_x в зависимости от температуры t_x , которая представлена в виде графиков в работе [2].

В результате их математической обработки установлена зависимость для определения возможной длительности хранения (в месяцах) от температуры:

$$\tau_x = A_x (t_{\text{н.з}} - t_x)^{B_x}, \quad (1)$$

где $t_{\text{н.з}}$ — температура начала замерзания, $^{\circ}\text{C}$;

A_x и B_x — коэффициенты. Так, для жирной рыбы $A_x = 0,055$ и $B_x = 1,500$; для тощей рыбы $A_x = 0,063$ и $B_x = 1,636$.

Зависимость (1) действительна для области температур от минус 10 до минус 40 $^{\circ}\text{C}$, и погрешность расчетов по ней не превышает 5 %.

Таким образом, для обеспечения потребителя качественной продукцией при известной из практики или маркетинговых исследований продолжительности хранения температура хранения, как следует из уравнения (1), должна быть

$$t_x = t_{\text{н.з}} - \left(\frac{t_x}{A_x} \right)^{1/B_x}. \quad (2)$$

В результате холодильной обработки продукта (охлаждение, замораживание) его конечная среднеобъемная температура t_v в идеальном случае во избежание изменения температуры в камере хранения должна быть равна температуре хранения, т. е. $t_v = t_x$.

С учетом возможного отепления продукта в процессе его перемещения от устройства холодильной обработки до камеры хранения целесообразно принимать t_v на 3–5 $^{\circ}\text{C}$ ниже температуры хранения.

Одна и та же конечная среднеобъемная температура продукта t_v может быть получена при различных сочетаниях температуры охлаждающей среды t_{ox} и продолжительности холодильной обработки τ . При пониженной температуре охлаждающей среды, что требует повышенных затрат энергии на производство холода, продолжительность замораживания τ сокращается. Это, в свою очередь, при заданной производительности устройства холодильной обработки P определяет уменьшение его потребной единовременной вместимости E , так как

$$E = P\tau. \quad (3)$$

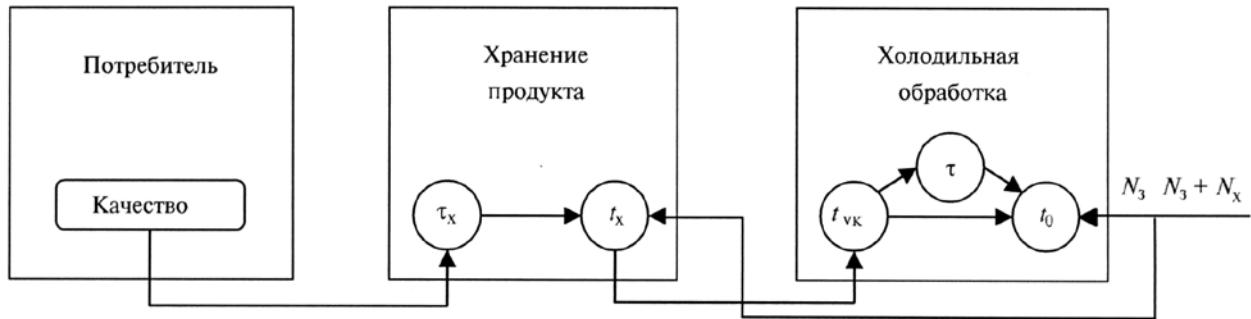


Схема связи «качество продукта — энергия»

Соответственно, уменьшение единовременной вместимости приводит к сокращению материальных затрат на приобретение устройств холодильной обработки, а также затрат на их эксплуатацию. При повышенной температуре охлаждающей среды, наоборот, затраты на производство холода сокращаются, но в связи с ростом продолжительности холодильной обработки увеличиваются потребная емкость устройств холодильной обработки и, следовательно, материальные и эксплуатационные затраты.

Таким образом, определение температуры охлаждающей среды в устройствах холодильной обработки в отличие от выбора температуры хранения, которая определяется только продолжительностью хранения, не имеет однозначного ответа. Он может быть получен решением задачи по определению оптимального варианта технико-экономическим расчетом с учетом вида продукта, типа морозильного аппарата и оборудования холодильной установки, тарифов на электроэнергию и содержание помещений и других факторов.

Покажем на примере определение рационального температурного режима производства и хранения замороженного продукта, обеспечивающего экономию энергии, с применением метода нахождения оптимальной температуры охлаждающей среды в морозильном аппарате, представленного в работе [3].

Продукт — тощая рыба, замораживаемая в виде блоков толщиной $\delta = 6 \cdot 10^{-2}$ м, $t_{n,3} = -1$ °C. Плотность и коэффициент теплопроводности замороженного блока $\rho = 1000$ кг/м³ и $\lambda = 1,0$ Вт/(м·К). Начальная температура рыбы $t_n = +10$ °C. Морозильный аппарат — воздушный, паспортная температура охлаждающей среды $t_{ox} = -32$ °C, коэффициент теплоотдачи от продукта $\alpha = 50$ Вт/(м²·К), производительность $P = 300$ кг/ч. Рассматриваемый диапазон температуры охлаждающей среды $t_{ox} = -25\dots -50$ °C, температура кипения и конденсации хладагента $t_o = t_{ox} - 10$ °C и $t = +30$ °C. Продолжительность хранения замороженной рыбы $\tau_x = 4$ мес.

Необходимая температура хранения мороженой тощей рыбы по формуле (2)

$$t_x = t_{n,3} - \left(\frac{\tau_x}{A_x} \right)^{1/B_x} = \\ = -1 - \left(\frac{4}{0,063} \right)^{1/1,636} = -14 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Конечная среднеобъемная температура блоков рыбы

$$t_v = -14 - 4 = -18 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Тепло, отводимое от рыбы при замораживании, определяемое как разность энталпий при $t_n = +10$ °C и $t_v = -18$ °C согласно [4]

$$q = h(+10 \text{ } ^\circ\text{C}) - h(-18 \text{ } ^\circ\text{C}) = 296,3 \text{ кДж/кг.}$$

В дальнейших расчетах используем зависимости, представленные в работе [3].

Годовые затраты на электроэнергию для каждого принятого значения t_{ox} рассчитываем по формуле (13) [3]

$$Z_3 = C_3 \tau_r (N_k + N_a \eta + \Delta N_{ka}) = \\ = C_3 \tau_r \left\{ \left[E q (T_{n,3} - T_0) \frac{T - T_0}{AT_0 \eta} \right] K_1 + \right. \\ \left. + N_a \eta_a + N_a \frac{T - T_0}{T_0 \eta} \right\}, \quad (4)$$

где C_3 — тариф на электроэнергию, руб./кВт·ч;

τ_r — число часов работы морозильного аппарата в год, ч/год;

N_k — мощность, потребляемая электродвигателями компрессоров, кВт;

N_a — мощность электродвигателей морозильного аппарата, кВт;

η_a — КПД электродвигателя;

ΔN_{ka} — дополнительная мощность, потребляемая компрессорами холодильной установки на компенсацию тепла, эквивалентного мощности электродвигателей морозильного аппарата, кВт;

E — единовременная вместимость морозильного аппарата, кг, определяемая для каждого принятого значения t_{ox} по выражению (5) [3]

$$E = APK_{\tau}(T_{\text{н.з}} - T_{\text{ox}}), \quad (5)$$

K_{τ} — корректирующий коэффициент, учитывающий отличие реальных условий процесса замораживания от теоретических, положенных в вывод формулы продолжительности замораживания;

A — составляющая формулы Р. Планка для определения продолжительности замораживания плоскопараллельной пластины, с·К:

$$A = \frac{q\rho\delta}{2} \left[\frac{\delta}{4\lambda} + \frac{1}{\alpha} \right] = \\ = \frac{296,3 \cdot 10^3 \cdot 6 \cdot 10^{-2}}{2} \left[\frac{6 \cdot 10^{-2}}{4 \cdot 1} + \frac{1}{50} \right] = 308,7 \cdot 10^3,$$

η — коэффициент обратимости цикла холодильной машины, обеспечивающей работу морозильного аппарата;

K_1 — коэффициент.

Годовые материальные затраты на морозильный аппарат и холодильное оборудование определяли по выражению

$$Z_m = \frac{C_a E K_2}{\tau_a} + \frac{C_F F K_3}{\tau_a} + \frac{C_{x0} N K_4}{\tau_{x0}}, \quad (6)$$

где C_a , C_F и C_{x0} — стоимость единицы единовременной вместимости аппарата, руб./кг; единицы площади помещения, руб./м², и холодильного оборудования, приходящегося на единицу потребляемой компрессорами мощности, руб./кВт;

K_2 , K_3 и K_4 — коэффициенты, учитывающие затраты на техническое обслуживание и ремонт;

τ_a , τ_F и τ_{x0} — срок эксплуатации аппарата, помещения и холодильного оборудования, лет;

$N = N_k + \Delta N_{ka}$ — мощность, потребляемая компрессорами, кВт.

Определение величин C_a и C_F выполнено по формулам, приведенным в работе [3].

Величина C_{x0} установлена по стоимости оборудования в базовом по температуре охлаждающей среды $t_{ox} = -32$ °С варианте и принята равной $C_{x0} = 22,6$ тыс. руб./кВт.

Более точно стоимость холодильного оборудования может быть определена по результатам теплового ремонта холодильной машины.

Результаты расчетов для величин $C_s = 3$ руб./кВт·ч; $C_F = 35 \cdot 10^3$ руб./м²; $\tau_r = 4000$ ч; $\eta_s = 0,9$; $K_r = 1,3$; $\eta = 0,7$; $K_1 = 1,1$; $K_2 = K_3 = K_4 = 1,2$ представлены в таблице.

Годовые затраты на замораживание в воздушном аппарате производительностью $P = 300$ кг/ч (0,083 кг/с)

Показатель	Температура охлаждающей среды T_{ox} , К (°С)					
	223 (-50)	228 (-45)	235 (-38)	241 (-32)	245 (-28)	248 (-25)
Температура кипения хладагента, T_0 , К (°С)	213 (-60)	218 (-55)	225 (-48)	231 (-42)	235 (-28)	238 (-35)
Единовременная вместимость аппарата $E \cdot 10^{-3}$, кг	0,680	0,757	0,900	1,074	1,233	1,238
Стоимость единицы емкости аппарата C_a , руб./кг	321,2	320,4	318,9	317,1	315,4	313,8
Площадь, занимаемая аппаратом F , м ²	9,9	10,1	10,6	11,1	11,6	12,1
Мощность, потребляемая компрессорами N_k , кВт	21,07	19,44	17,28	15,54	14,41	13,62
Мощность электродвигателей аппарата N_n , кВт	1,69	1,99	2,54	3,21	3,82	4,42
Дополнительная мощность ΔN_{ka} , кВт	1,02	1,11	1,26	1,43	1,58	1,73
Годовые затраты на электроэнергию Z_s , тыс. руб.	238,4	268,1	249,9	238,2	233,1	231,9
Годовые материальные затраты Z_m , тыс. руб.	139,9	138,4	138,9	142,9	148,2	154,6
Суммарные годовые затраты $Z = Z_s + Z_m$, тыс. руб.	423,3	406,5	388,8	381,1	381,3	386,5

Результаты расчетов показывают, что в рассмотренном примере оптимальная температура охлаждающей среды для замораживания продуктов, соответствующая минимальным годовым затратам 381,1 тыс. руб., составляет минус 32 °С и не отличается от паспортного значения для принятого типа морозильного аппарата.

Применение обычных температур хранения мороженых продуктов от минус 18 до минус 25 °С приведет в данном случае к перерасходу энергии на работу холодильной установки на 20–30 %.

Представленная методика определения температуры охлаждающей среды для процессов производства и хранения замороженных продуктов может быть применена в случаях, когда требуется решать проблему оптимизации материальных и эксплуатационных затрат.

Список литературы

1. Курьлев Е. С., Герасимов Н. А. Холодильные установки: Учеб. 3-е изд., перераб. и доп. — Л.: Машиностроение, 1980.
2. Чижков Г. Б. Теплофизические процессы в холодильной технологии пищевых продуктов. 2-е изд., перераб. — М.: Пищ. пром-сть, 1979.
3. Эрлихман В. Н., Фатыхов Ю. А. Выбор температурного режима работы морозильных аппаратов // Вестник МАХ. 2009. № 1.
4. Проектирование холодильных сооружений: Справ. / Под ред. А. В. Быкова. — М.: Пищ. пром-сть, 1978.