

Выбор температурного режима работы морозильных аппаратов

Д-р техн. наук В.Н. ЭРЛИХМАН, д-р техн. наук Ю.А. ФАТЫХОВ
Калининградский государственный технический университет

The calculation method for optimal temperature of cooling medium for freezing apparatus, taking into account annual performance costs is given. An example of calculation of annual performance costs for «Mirital» air freezing apparatus has been presented

Существенную долю в себестоимости производства пищевой продукции занимают затраты на ее холодильную обработку. При существующем росте цен на энергоносители выпуск конкурентоспособной продукции возможен при применении энергосберегающих технологий, процессов, оборудования и режимов его работы, обеспечивающих минимальные эксплуатационные затраты с достижением необходимого качества продукции.

В производственной практике замораживания пищевых продуктов применяют различные морозильные аппараты, отличающиеся производительностью, единовременной вместимостью (емкостью), видом охлаждающей среды, ее температурой, видом продукта и толщиной его слоя, периодичностью загрузки, степенью механизации и другими характеристиками.

Наиболее распространено замораживание в воздушных морозильных аппаратах при температурах воздуха $-30\ldots-38^{\circ}\text{C}$ и плиточных аппаратах при температурах хладагента $-40\ldots-45^{\circ}\text{C}$. Применение таких температур позволяет достичь требуемой конечной температуры продукта. Однако численные значения температур охлаждающей среды экономически не обосновывались.

Применение именно этих температур обусловлено рядом факторов, к которым относятся: возможность поддержания давления в испарительной системе хладагента, близкого к атмосферному (во избежание подсоса воздуха через неплотности в системе); относительно невысокие энергозатраты на получение низких температур охлаждающей среды; отсутствие необходимости применения специальных материалов (металлов, смазки и др.), работающих в низкотемпературных условиях.

При организации выпуска замороженных продуктов заданная производительность P может быть достигнута при использовании морозильных аппаратов с различными единовременными вместимостями E при соответствующих продолжительностях замораживания τ :

$$\tau = E/t. \quad (1)$$

Для упрощения формула (1) приведена без учета циклических потерь, имеющих место в процессе работы морозильного аппарата.

Продолжительность замораживания τ , исходя из теоретических зависимостей для ее определения, в обобщенной форме имеет вид

$$\tau = A\kappa/(T_{n,3} - T_{ox}), \quad (2)$$

где A – величина, зависящая от формы продукта, его толщины δ , теплофизических характеристик (плотности

ρ , коэффициента теплопроводности λ , энталпии h) и коэффициента теплоотдачи α ;

k – корректирующий коэффициент;

$T_{n,3}$ – температура начала замерзания продукта, К;

T_{ox} – температура охлаждающей среды, К.

Для плоскопараллельной неограниченной пластины из классического решения Р. Планка следует:

$$A = (\varphi\delta/2)[\delta/(4\lambda) + 1/\alpha], \quad (3)$$

где q – теплота, отводимая от единицы массы продукта при замораживании от начальной T_n до конечной среднеобъемной температуры T_v , Дж/кг,

$$q = h(T_n) - h(T_v). \quad (4)$$

Корректирующий коэффициент k введен с целью приближения результатов расчетного и практического определения продолжительности замораживания. Для воздушных морозильных аппаратов при использовании формулы Р. Планка $k=1,3$.

Из формул (1) и (2) следует, что для заданной производительности при принятой температуре охлаждающей среды T_{ox} единовременная вместимость морозильного аппарата должна составлять:

$$E = APk/(T_{n,3} - T_{ox}). \quad (5)$$

Из зависимости (5) видно, что с понижением температуры охлаждающей среды T_{ox} потребная емкость аппарата уменьшается и соответственно сокращаются капитальные и эксплуатационные затраты на него.

С другой стороны, понижение температуры охлаждающей среды T_{ox} и соответственно температуры кипения хладагента приводит к росту расхода на электроэнергию для производства холода, а также капитальных и эксплуатационных затрат на холодильное оборудование.

Таким образом, варьирование температурой охлаждающей среды T_{ox} при условии обеспечения заданной производительности морозильного аппарата приводит к увеличению одних и уменьшению других затрат, что указывает на существование оптимального варианта. Его можно установить, рассчитав годовые эксплуатационные затраты на эксплуатацию морозильного аппарата, холодильного оборудования и электроэнергию, потребляемую для производства холода при различных температурах охлаждающей среды.

Годовые эксплуатационные затраты на морозильный аппарат и холодильное оборудование определяются выражением

$$Z_1 = c_a E k_1 / \tau_a + c_F F k_2 / \tau_F + c_x E k_3 / \tau_x, \quad (6)$$

где c_a , c_F и c_x – соответственно стоимость единицы единовременной вместимости аппарата, руб/кг; единицы площади помещения, руб/м², холодильного оборудо-

вания, приходящегося на единицу емкости, руб/кг; F – площадь, занимаемая аппаратом, м²; κ_1, κ_2 и κ_3 – коэффициенты, учитывающие затраты на техническое обслуживание и ремонт; τ_a, τ_F и τ_x – соответственно срок эксплуатации аппарата, помещения и холодильного оборудования, лет.

Стоимость холодильного оборудования (компрессоров, конденсаторов и др.) определяют после его подбора, выполненного на основании расчета цикла холодильной машины по известной температуре конденсации T_k и температуре кипения хладагента T_0 , которую принимают в зависимости от температуры охлаждающей среды T_{ox} :

• для воздушных морозильных аппаратов $T_0 = T_{ox} - (7...10)$ К;

• для плиточных морозильных аппаратов $T_0 = T_{ox}$.

Годовые затраты на электроэнергию, потребляемую компрессорами, электродвигателями морозильного аппарата и другого вспомогательного оборудования, можно определить по зависимости

$$Z_2 = c_s \tau_f (N_k + N_a \eta_3 + \Delta N_{ka} \eta_3 + N_b \eta_3), \quad (7)$$

где c_s – тариф на электроэнергию, руб/(кВт·ч);

τ_f – продолжительность работы аппарата за год, ч;

N_k – мощность, потребляемая электродвигателем компрессора, кВт;

N_a – мощность электродвигателей морозильного аппарата, кВт;

η_3 – КПД электродвигателя;

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

N_b – мощность электродвигателей вспомогательного оборудования холодильной установки, кВт.

Мощность, потребляемая компрессорами холодильной установки на замораживание продукта, равна:

$$N_k = (Q_3/\varepsilon) \kappa_4 = (Pq/\varepsilon) \kappa_4, \quad (8)$$

где Q_3 – теплоприток от замораживаемого продукта, кВт;

ε – холодильный коэффициент цикла холодильной машины;

κ_4 – коэффициент, учитывающий дополнительное поступление тепла в морозильный аппарат из-за разности температур в помещении и аппарате, инфильтрации воздуха в аппарат, от металлических блок-форм, вводимых в аппарат, и др.;

q – удельная теплота, отводимая от единицы массы замораживаемого продукта, Дж/кг.

Холодильный коэффициент, определяемый для каждой температуры охлаждающей среды из расчета цикла холодильной машины, приближенно может быть рассчитан по формуле

$$\varepsilon = \eta \varepsilon_k, \quad (9)$$

где η – коэффициент обратимости, для расчетов принимаемый 0,6...0,8;

$$\varepsilon_k = T_0 / (T - T_0). \quad (10)$$

Тогда с учетом выражений (1), (2), (9) и (10) формула (8) принимает вид [1]:

$$N = |Eq(T_{ox} - T_0)(T - T_0)/(AT_0\eta)| \kappa_4. \quad (11)$$

Дополнительная мощность, потребляемая компрессорами холодильной установки на компенсацию тепла, эквивалентного мощности электродвигателей морозильного аппарата

N_a , с учетом формул (9) и (10) определяется выражением:

$$\Delta N_{ka} = N_a / \varepsilon = N_a [(T - T_0) / (T_0\eta)]. \quad (12)$$

После подстановки выражений (11) и (12) в формулу (7) зависимость для расчета годовых затрат на электроэнергию будет иметь вид:

$$Z_2 = c_s \tau_f \{ |Eq(T_{ox} - T_0)(T - T_0)/(AT_0\eta)| \kappa_4 + N_a \eta_3 + N_a [(T - T_0) / (T_0\eta)] + N_b \eta_3 \}. \quad (13)$$

Для иллюстрации представленного метода определим оптимальную температуру охлаждающей среды и соответствующую ей единовременную вместимость воздушного морозильного аппарата производительностью 600 кг/ч (0,17 кг/с) при замораживании рыбы в блоках толщиной $\delta = 6 \cdot 10^{-2}$ м от начальной температуры $T_h = 293$ К до конечной среднекубической температуры $T_v = 248$ К. Плотность продукта $\rho = 1000$ кг/м³, коэффициент теплопроводности $\lambda = 1$ Вт/(м·К), коэффициент теплоотдачи $\alpha = 50$ Вт/(м²·К), удельное количество тепла, отводимое от единицы массы продукта, $q = 336 \cdot 10^3$ Дж/кг.

Коэффициент $A = (qp\delta/2)[\delta/(4\lambda) + 1/\alpha] = 336 \cdot 10^3 \cdot 10^3 \times (6 \cdot 10^{-2}/2)[6 \cdot 10^{-2}/(4 \cdot 1) + 1/50] = 352,8 \cdot 10^3$ с·К.

В качестве прототипа принят ряд воздушных морозильных аппаратов, выпускаемых фирмой «Мириталь», для которых на основании обработки данных установлены следующие характеристики.

Стоимость единицы емкости

аппарата c_a , руб/кг $-10,41 \cdot 10^{-3} E + 328,34$

Площадь, занимаемая

аппаратом F , м² $3,07 \cdot 10^{-3} E + 7,85$

Стоимость холодильного

оборудования, приходящегося

на единицу емкости

аппарата c_x , руб/кг $-17 \cdot 10^{-3} E + 375,8$

Мощность электродвигателей

аппарата N_a , кВт $3,856 \cdot 10^{-3} E - 0,931$

Для расчетов принято

Температура конденсации

хладагента T_k , К 310

Значения коэффициентов $\kappa_1 = \kappa_2 = \kappa_3 = 1,2$; $\kappa_4 = 1,1$

Срок эксплуатации аппарата

и холодильного оборудования

$\tau_a = \tau_x$, лет 7

Срок эксплуатации помещения

τ_c , лет 25

Время работы аппарата τ_f , ч/год 4000

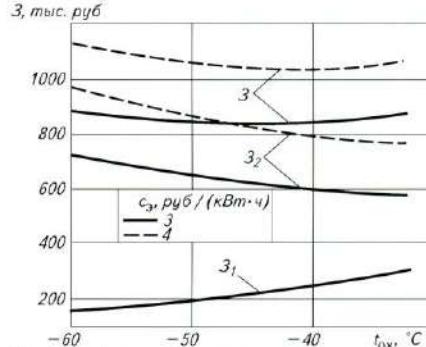


Рис. 1. Годовые эксплуатационные затраты на замораживание ($P = 600$ кг/ч)

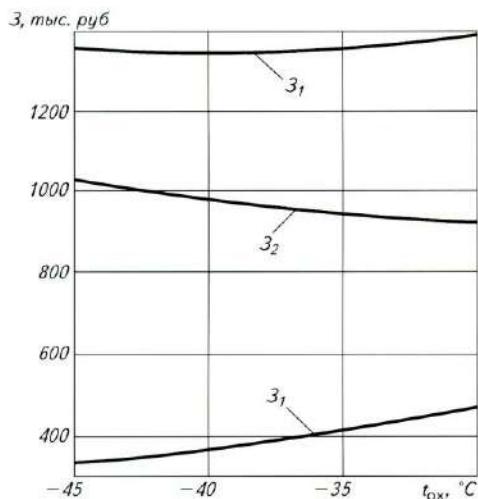


Рис. 2. Годовые эксплуатационные затраты на замораживание ($P = 1000 \text{ кг/ч}$)

Тариф на электроэнергию

$c_s, \text{руб}/(\text{kВт}\cdot\text{ч})$

выполнены при тарифе на электроэнергию $c_s = 4 \text{ руб}/(\text{kВт}\cdot\text{ч})$ (см. рис. 1), а также для производительности $P = 1000 \text{ кг/ч}$ ($0,28 \text{ кг/с}$) (рис. 2).

Полученные данные показывают, что в общих финансовых затратах на замораживание продуктов превалируют затраты на электроэнергию. Повышение тарифа на электроэнергию на 1 руб. за 1 $\text{kВт}\cdot\text{ч}$ приводит к росту общих годовых затрат на ~200 тыс. руб., что увеличивает себестоимость 1 кг продукции всего на 8...10 коп.

Оптимальная величина температуры охлаждающей среды не зависит от производительности и для воздушных морозильных аппаратов составляет $-39...-41^\circ\text{C}$, что ниже используемой в практике. Однако применение повышенной до $-30...-35^\circ\text{C}$ температуры охлаждающей среды не приводит к существенному росту финансовых затрат, увеличение которых составляет 10...30 тыс. руб. в год. При этом улучшаются условия эксплуатации холодильной установки из-за более высоких температур и давления кипения хладагента.

Соответствующие оптимальным температурам охлаждающей среды емкости морозильных аппаратов должны составлять $E = 2000 \text{ кг}$ для $P = 600 \text{ кг/ч}$ и $E = 3300 \text{ кг}$ для $P = 1000 \text{ кг/ч}$.

Приведенная методика определения оптимальной температуры охлаждающей среды может быть также применена для сравнительного анализа различных типов морозильных аппаратов по экономической эффективности с целью их выбора.

3

Результаты расчетов годовых эксплуатационных затрат для различных температур охлаждающей среды представлены в таблице и на рис. 1.

Аналогичные расчеты для принятых исходных данных

Годовые эксплуатационные затраты на замораживание в воздушном морозильном аппарате производительностью $P = 600 \text{ кг/ч}$ ($0,17 \text{ кг/с}$)

Показатели	Температура охлаждающей среды $T_{ox}, \text{K} \quad (^\circ\text{C})$				
	213 (-60)	223 (-50)	228 (-45)	225 (-38)	241 (-32)
Температура кипения хладагента $T_0, \text{K} \quad (^\circ\text{C})$	203 (-70)	213 (-60)	218 (-55)	225 (-48)	231 (-42)
Единовременная вместимость аппарата $E, \text{кг}$	1322	1591	1772	2107	2515
Стоимость единицы емкости аппарата $c_e, \text{руб}/\text{кг}$	314,6	311,8	309,9	306,4	302,2
Площадь, занимаемая аппаратом $F, \text{м}^2$	11,9	12,7	13,3	14,3	15,6
Стоимость холодильного оборудования, приходящаяся на единицу емкости $c_x, \text{руб}/\text{кг}$	353,3	348,8	345,7	340	330,3
Годовые затраты на эксплуатацию аппарата и холодильного оборудования $Z_1, \text{тыс. руб.}$	165,6	195,4	215,1	250,6	292,6
Мощность, потребляемая компрессорами $N_k, \text{kВт}$	53,9	46,5	43,1	38,6	34,8
Мощность, электродвигателей аппарата $N_d, \text{kВт}$	4,17	5,2	5,9	7,19	9,7
Годовые затраты на электроэнергию $Z_2, \text{тыс. руб.}$	724,8	649,7	618,5	581,4	572,4
Суммарные годовые эксплуатационные затраты $Z = Z_1 + Z_2, \text{тыс. руб.}$	890,4	845,1	833,6	832	865