

РАССУЖДЕНИЯ ОБ ИЗМЕНЕНИИ И РЕГУЛИРОВАНИИ СОСТОЯНИЯ ВОЗДУХА ОХЛАЖДЕННЫХ ПОМЕЩЕНИЙ ХРАНЕНИЯ

Л. ЛАНГ

(Поступило в печать 30 июля 1969 г.)

Предлагал профессор др. Д. Бродски

1. Введение

Охлажденное хранение свежих продуктов (овощи, фрукты, мясо и т. д.) — один из распространенных способов консервирования. Общеизвестны и международными соглашениями зафиксированы те диапазоны температуры и влажности воздуха, при которых качество продукта долгое время сохраняется.

В зависимости от вида хранимого продукта обеспечиваемая температура $+6 \div -1^\circ\text{C}$, а относительная влажность находится в пределах $80 \div 95\%$.

Продукты, подлежащие хранению, вообще можно разделить на две характерные группы: одна группа в ходе хранения развивает тепло и выделяет влагу, вторая группа только выделяет влагу. К первой группе относятся овощи и фрукты, характерный член второй группы — например, свежее мясо.

2. Изменение состояния воздуха в помещении холодильника

Изменение состояния воздуха помещения определяется нагрузкой помещения по теплу и влаге и количеством циркулирующего воздуха (число обмена воздуха). Их изменение во время хранения приводит к изменению состояния воздуха. По общей практике на основе результирующего изменения определяют степень нужных операций.

Тепловая и влажностная нагрузка складывается из членов, зависящих и не зависящих от продукта. К первой группе можно отнести тепло и влагоотдачу продукта $\left(q_{\text{пр}} \text{ ккал/кг.час}; g_{\text{пр}} \frac{\text{кг H}_2\text{O}}{\text{кг, ч}} \right)$ и необходимое количество свежего воздуха $(g_{\text{св}} \text{ кг/кг,ч})$, которое в зависимости от состояния наружного воздуха означает переменную нагрузки тепла и влаги $\left(q_{\text{св}} \frac{\text{ккал}}{\text{кг, ч}}; g_{\text{св}} \frac{\text{кг H}_2\text{O}}{\text{кг, ч}} \right)$. Все величины отнесены к единицам продукта и времени. Ко второй группе можно отнести поступающие из окружающей среды через ограничивающие стены количества тепла и влаги $\left(q \frac{\text{ккал}}{\text{M}^2 \text{ч}}, g \frac{\text{кг H}_2\text{O}}{\text{M}^2 \text{ч}} \right)$, те-

пло- и влагоотдачу людей, машин и устройств, работающих в помещении, регулярно $\left(Q \frac{\text{ккал}}{\text{ч}} ; G \frac{\text{кг H}_2\text{O}}{\text{ч}} \right)$ и мощность вентиляторов принудительной циркуляции (N kW). Эта группировка конечно, не жесткая, так как на члены второй группы оказывает известное влияние и вид хранимого продукта.

Значит результирующая тепловая нагрузка помещения холодильника:

$$Q_p = G_{\text{пр}}(q_{\text{пр}} + q_{\text{св}}) + Fq + Q + 860N \frac{\text{ккал}}{\text{ч}}$$

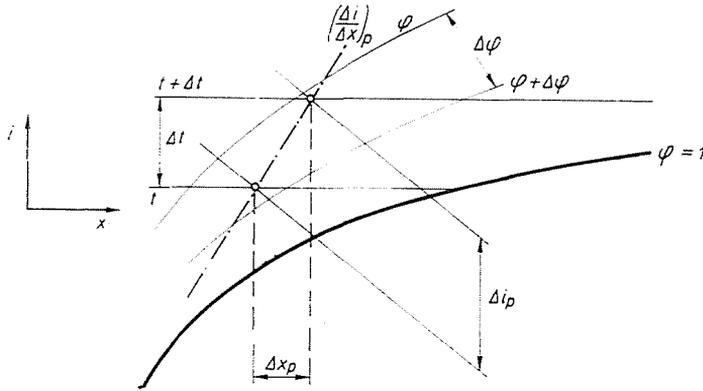


Рис. 1

нагрузка влаги

$$G_{\text{вл}} = G_{\text{пр}}(g_{\text{пр}} + g_{\text{св}}) + F \cdot g + G \frac{\text{кг H}_2\text{O}}{\text{ч}}$$

в случае количества хранимого продукта $G_{\text{пр}}$.

Результирующее направление изменения состояния воздуха на основе изложенного:

$$\left(\frac{\Delta i}{\Delta x} \right)_p = \frac{Q_p}{G_{\text{вл}}} \quad \text{ккал/кг}$$

Зная эту величину на основе допустимых изменений температуры Δt и содержания относительной влажности $\Delta \varphi$ можно определить количество циркулирующего воздуха.

$$G_1 = \frac{Q_p}{\Delta i_p} \quad \text{кг/ч}$$

где Δi_p изменение энталпии согласно рис. 1. и

$$G_1 = \frac{G_{\text{вл}}}{\Delta x_p} \quad \text{кг/ч}$$

из двух значений действительно большее значение.

Хранимый в помещениях продукт требует соответственное направление воздушного потока так, что во всех частях пучка продукта было бы обеспечено требуемое состояние воздуха. (напр. рис. 2).

Зная оформление помещения и путь течения воздуха результирующее изменение воздуха можно разделить на составляющие.

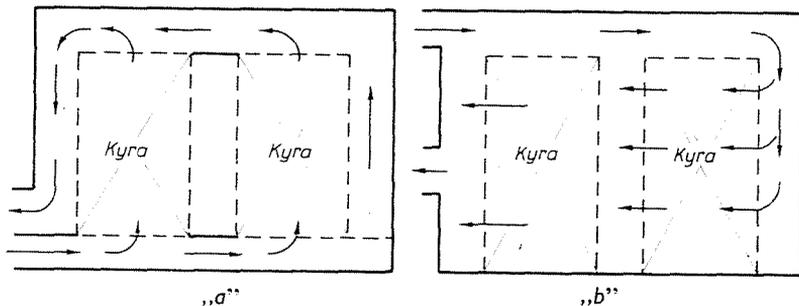


Рис. 2

Направление изменения состояния элемента помещения dV_i записывается в виде

$$\frac{di}{dx} = \frac{\rho k_p (t_{окр} - t) + \delta(a + bt + ct^2) + \delta q_{сб} + q_u + q_{вент}}{\frac{B}{B+1} \cdot \frac{\delta}{r} \left[a + bt + ct^2 + \alpha \omega (1 - \varphi) \left(t + \frac{u}{v} \right) \right] + \delta g_{сб} + g_u}$$

где: ρ — удельная ограничивающая поверхность, отнесенная к единице объема ($\text{м}^2/\text{м}^3$)

δ — удельная нагрузка продуктом, отнесенная к единице объема ($\text{кг}/\text{м}^3$)

ω — удельная поверхность соприкосновения продукта с воздухом ($\text{м}^2/\text{кг}$)

k_p — результирующий коэффициент теплопередачи помещения (ккал/м²час град.)

$q_{сб}$ — удельная тепловая нагрузка от свежего воздуха, отнесенная к единице количества продукта (ккал/кг час)

q_u — удельная тепловая нагрузка от посторонних источников, отнесенная к единице объема (ккал/м³час)

$q_{вент}$ — удельная мощность вентиляции, отнесенная к единице объема (ккал/м³ час)

α — коэффициент теплопередачи между продуктом и воздухом (ккал/м²ч °С)

$$B = \frac{62,28 \cdot r \cdot v \cdot \beta}{z}$$

β — коэффициент массоотдачи продукта (1/час)

r — теплота парообразования воды (ккал/кг).

a, b, c — постоянные величины, характерные для среднего тепловыделения продукта, зависящие от его сорта.

u, v — постоянные, зависящие от диапазона температур (см. примечание).

g_{cb} — нагрузка влаги от свежего воздуха, отнесенная к единице продукта (кгH₂O/кг ч)

g_u — удельная нагрузка влаги из посторонних источников, отнесенная к единице объема (кгH₂O/кг ч)

$t_{окр}$ — эквивалентная температура окружающей среды (°C)

t — температура воздуха элемента объема

φ — относительная влажность воздуха в элементе объема.

Полное изменение состояния воздуха элемента объема на основе $i-x$ диаграммы Молье мокрого воздуха изображено на рис. 3. Диаграмма 3/а соответствует ходу воздуха на рис. 2/а. Согласно этой диаграмме воздух состояния 1 покидает вентилятор, не изображенный на рисунке, при состоянии 2, потом, пройдя мимо пола состоянием 3, поступает к кучам. Воздух покидающий кучи в состоянии 4, смешиваясь с меньшим количеством воздуха, проходящим вдоль боковой стены в состоянии 5, уходит вдоль потолка и боковой стены после изменения состояния 6-7. При этом предполагали продукт, отдающий и тепло и влагу, а для помещения по рис. 2/б предполагалось только влаговыделение, на этот случай диаграмма 3/б дает изменение состояния воздуха.

Исходя из этого качественного анализа, можем определить следующее: Диаграмма для обоих случаев показывает максимальную и минимальную внешнюю тепловую нагрузку; результирующее направление состояния воздуха во время хранения (предполагая постоянную нагрузку продуктом) меняется. Между пределами

$$\left(\frac{\Delta i}{\Delta x}\right)' \geq \left(\frac{\Delta i}{\Delta x}\right)_{np} \geq \left(\frac{\Delta i}{\Delta x}\right)''$$

Вопреки такому сильному изменению направления состояния, для воздуха, непосредственно соприкасающегося с продуктом, оно остается

Примечание:

t °C	u	v
$-5 \div 0$	1.000	0.06854
$0 \div +5$	1.000	0.08558
$5 \div +10$	0.8434	0.11684

почти постоянным $\left(\frac{\Delta i}{\Delta x}\right)_{\text{пр}} \cong \text{const}$. Для выбора расхода циркулирующего воздуха, поскольку при правильном направлении воздуха отдельные частичные изменения состояния хорошо отделимы, определяющим должно быть изменение состояния воздуха вблизи продукта $\left(\left(\frac{\Delta i}{\Delta x}\right)_{\text{пр}}\right)$.

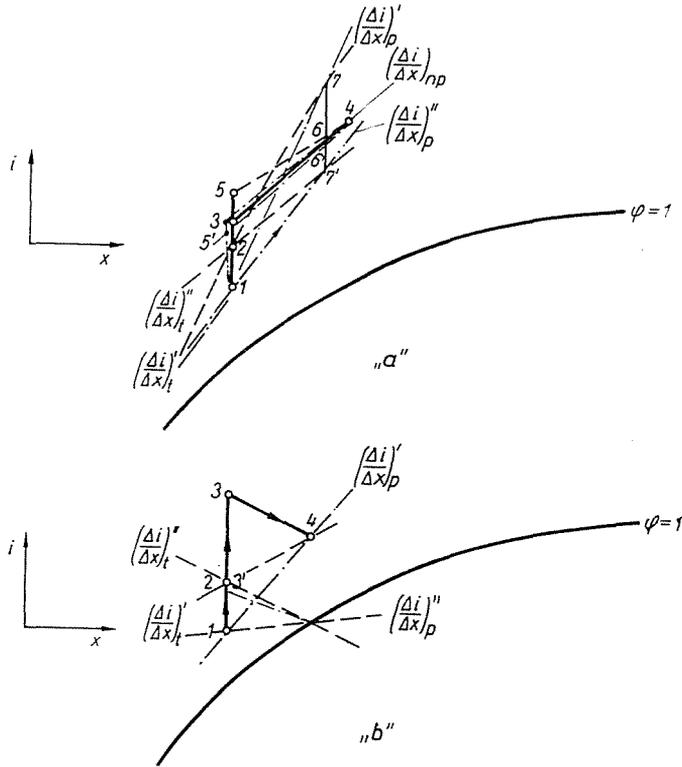


Рис. 3

Вентилятор в основном является непосредственной принадлежностью охладителя воздуха, свежий воздух целесообразно подают в помещение через охладитель воздуха, поэтому изменение его состояния в помещении лучше характеризует направление $\left(\frac{\Delta i}{\Delta x}\right)_p$, чем результирующее направление $\left(\frac{\Delta i}{\Delta x}\right)_t$, так как первое принимает во внимание члены, непосредственно относящиеся к помещению.

Предполагая средние состояния, среди составляющих тепловой нагрузки главную роль играет тепло, поступающее из окружающей среды через стены, которое в зависимости от местных условий составляет 40—75%

от результирующего, остальное тепло примерно одинаково распределяется между теплоотдачей продукта, вентиляцией, свежим воздухом и прочими теплоисточниками. В отношении влаги при хранении свежего мяса важное значение имеет влагоотдача продукта, которая с протеканием времени достигает 99—50%, в случае овощей и фруктов составляет 20—60%, остальная часть исходит от свежего воздуха и из прочих источников.

Согласно выше изложенному в случае правильного направления воздуха и постоянного состояния воздуха на входе можно обеспечить нужное для продукта состояние воздуха.

3. Связь между изменениями состояния воздуха, происходящего в помещении и охладителе

В виду того, что во время хранения (для помещения, нагруженного продуктом) надо заботиться об удалении тепла и влаги, нужно выяснить условия соотношения изменения состояния воздуха в помещении и охладителе.

Изменение состояния воздуха в охладителе можно представить как процесс смешивания насыщенного воздуха при температуре стенки охладителя и поступающего к охладителю воздуха. Отсюда следует, что при заданном состоянии перед охладителем воздуха осуществимое направление изменения находится между двумя крайними величинами. Один крайний случай, когда поверхностная температура равна или выше температуры точки росы для состояния входа, при этом направление изменения состояния $\left(\frac{\Delta i}{\Delta x}\right)_{h_{\max}} = \infty$. Другой крайний случай, когда поверхностная температура соответствует касательной большего тангенса, проведенной из точки состояния поступающего воздуха в диаграмме Мольте $i-x$ к линии насыщения $\varphi = 1$. Аппроксимируя линию насыщения полиномом вида

$$x = a_0 + a_1 t + a_2 t^2$$

(константы приведены в примечании).

Примечание: Константы уравнения линии насыщения в интервале температур:

	— 10 °C ÷ 0 °C	0 °C ÷ + 10 °C
a_0	$3,78 \cdot 10^{-3}$	$2,78 \cdot 10^{-3}$
a_1	$2,63 \cdot 10^{-4}$	$3,06 \cdot 10^{-4}$
a_2	$1,22 \cdot 10^{-5}$	$0,88 \cdot 10^{-5}$

получаем на минимальное направление изменения состояния воздуха при температуре t_e и абсолютной влажности x_e на входе:

$$\left(\frac{\Delta i}{\Delta x}\right)_{h \min} = C_{pвл} \frac{(2a_1 + 4a_2 t_e) + \sqrt{(2a_1 + 4a_2 t_e)^2 - 4(a_1^2 + 4a_2 x_e - 4a_2 a_0)}}{2(a_1^2 + 4a_2 x_e - 4a_2 a_0)} + r$$

Без особой операции (отопление, увлажнение) можно обеспечить требуемое состояние воздуха в помещении, если результирующее направление изменения состояния $\left(\frac{\Delta i}{\Delta x}\right)_p$ лежит в пределах, определенных охладителем воздуха

$$\left(\frac{\Delta i}{\Delta x}\right)_{h \min} \leq \left(\frac{\Delta i}{\Delta x}\right)_p \leq \left(\frac{\Delta i}{\Delta x}\right)_{h \max}$$

4. Переменный режим

Изменение условий хранения, вызывающее изменение $\left(\frac{\Delta i}{\Delta x}\right)_p$, требует операцию, обеспечивающую равенство $\left(\left(\frac{\Delta i}{\Delta x}\right)_p, \left(\frac{\Delta i}{\Delta x}\right)_h\right)$. Возможные операции для изменения $\left(\frac{\Delta i}{\Delta x}\right)_p$ нагрев и увлажнение, и коррекция $\left(\frac{\Delta i}{\Delta x}\right)_h$.

Регулирование направления изменения состояния воздуха в охладителе возможно через состояние воздуха на входе, температуру охлаждающей среды, влияющую на поверхностную температуру среды, изменение условий теплообмена. В рамках данной статьи рассмотрим возможность, полученную путем изменения поверхностной температуры.

Для описания поведения поверхностного охладителя воздуха при переменных условиях удобно применить фактор контакта (ФК)

$$\text{ФК} = \frac{t_{bх} - t_{вых}}{t_{bх} - t_F}$$

или

$$\text{ФК} = 1 - e^{-\frac{\alpha F}{G_b C_{pвл}}}$$

где $t_{bх}$ — температура воздуха, поступающего в охладитель °С
 $t_{вых}$ — температура воздуха на выходе из охладителя °С
 t_F — средняя поверхностная температура °С
 F — поверхность охладителя со стороны воздуха м².

$C_{pвл}$ — удельная теплоемкость влажного воздуха при постоянном давлении ккал/кг °С

G_b — расход воздуха через охладитель кг/час

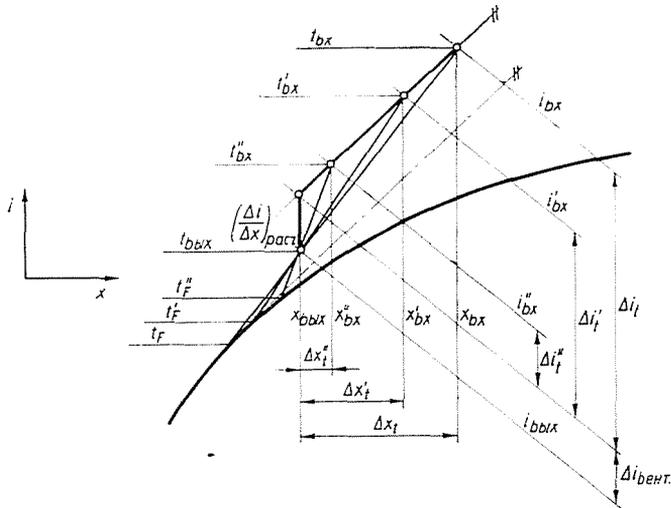


Рис. 4

При неизменных поверхности охладителя и расхода воздуха величина ΦK постоянна. Если насыщенные при поверхностной температуры состояния воздуха, поступающего к охладителю, перемещаются вдоль параллельных линий (рис. 4), тогда состояние воздуха за охладителем остается неизменным.

Линия насыщения $\varphi = 1$ в интервале температур $-10^\circ\text{C} \div +10^\circ\text{C}$ заменяется касательной, проведенной к определенной точке с точностью $\pm 2,5^\circ\text{C}$.

В расчетных условиях поверхностную температуру, определяющую размеры охладителя, можно найти при помощи касательной к линии насыщения, параллельной направлению изменения состояния. $\left(\frac{\Delta i}{\Delta x}\right)_{расч}$.

С учетом переменных условий, поверхностную температуру примерно на 2°C целесообразно принять ниже, чем температуру, определенную этим путем.

С учетом уже упомянутых приближений поверхностная температура определяется следующим выражением:

$$t_F = \frac{C_{pвл}}{2a_2 \left[\left(\frac{\Delta i}{\Delta x}\right)_{расч} - r \right]} - \frac{a_1}{2a_2} - 2^\circ\text{C}$$

При переменных условиях (например, убывающая тепловая и влажностная нагрузки) обеспечение нужного состояния воздуха для продукта в интервале допуска потребует две операции. Одна из них — это изменение поверхностной температуры охладителя воздуха, другая — удержание состояния воздуха перед охладителем на линии направлением изменения состояния $\left(\frac{\Delta i}{\Delta x}\right)_{\text{расч}}$ (рис. 4.). Этими операциями можно достичь практически одинаковое состояние воздуха на входе в помещение (за вентилятором).

Управление поверхностной температуры охладителя по потребности можно решить регулированием температуры охлаждающей среды, принимая регулируемым параметром температуру воздуха, уходящего из охладителя. Удержание состояния воздуха перед охладителем на прямой, направлением $\left(\frac{\Delta i}{\Delta x}\right)_{\text{расч}}$ требует нагрева, если направление без операции $\left(\frac{\Delta i}{\Delta x}\right)_t$ меньше, чем расчетное $\left(\frac{\Delta i}{\Delta x}\right)_{\text{расч}}$, возникает требование увлажнения если $\left(\frac{\Delta i}{\Delta x}\right)_t > \left(\frac{\Delta i}{\Delta x}\right)_{\text{расч}}$. Регулируемым параметром является относительная влажность воздуха на входе в помещении.

При знании ожидаемых изменений во время хранения можно обеспечить требуемое постоянное состояние воздуха кроме охлаждения или только нагревом или только увлажнением. В том случае, если холодильник должен употребляться для хранения двух упомянутых видов продуктов, тогда надо обеспечить два типа операций.

Резюме

В помещениях хранения охлажденных продуктов, где кроме температуры воздуха надо обеспечить и постоянство относительной влажности, определенное направление течения циркулирующего воздуха помогает обеспечению равномерного состояния воздуха, нужного для продукта. Кроме того из-за требуемого меньшего числа обмена воздуха уменьшается весовые потери. Действительное изменение состояния воздуха в помещении и рассчитанный на этой основе поверхностный охладитель дает возможность простого регулирования путем обеспечения постоянного состояния поступающего к продукту воздуха.

Лайош ЛАНГ Budapest, XI., Műegyetem rkp. 9—11. Венгрия.