

Вакуумная технология послойного намораживания водного льда.

Математическое описание процесса

Маринюк Б.Т., Ермолаев А.Е.

Московский государственный университет инженерной экологии

Потребность охлаждения различных объектов до околонулевых температур существовала всегда, так как она связана с хранением скоропортящихся и высокоценных продуктов. В последние годы во всем мире возникла тенденция увеличения потребления охлажденных продуктов вместо замороженных, поскольку охлажденные до околонулевых температур продукты при быстрой доставке их потребителю сохраняют ценные вкусовые и потребительские свойства, что менее характерно для замороженных продуктов.

Водный лед с давних пор успешно применяют как хладоемкую массу в пищевой промышленности, сельском хозяйстве, медицине, научных исследованиях и системах кондиционирования воздуха.

Стремление к экономии энергии на охлаждении различных объектов с применением льдоаккумуляции является важной причиной развития технологии водного льда, в период таяния лед отдает запасенную в виде теплоты заморозки энергию (которая составляет 334 кДж/кг). Его уникальные свойства, связанные с высокой теплотой заморозки, позволяют создавать ледяные холодоаккумуляторы, обеспечивающие выравнивание нагрузки холодильных машин, испытывающих ее циклические изменения в течение суток, и подбирать холодильное оборудование не по максимальной холодопроизводительности, а по среднесуточной, что позволяет снизить капитальные затраты, как минимум, на 30 %.

Традиционные методы получения водного льда предполагают задействование парокомпрессионных холодильных машин, использующих различные виды холодильных агентов от хладонов и аммиака до углеводородов и CO₂. Многие из предложенных в последние годы хладонов, имея нулевое воздействие на озоновый слой земли, в то же время отепляет окружающую среду (R404a, R410a).

В сельском хозяйстве лед, прежде всего, необходим при первичной обработке молока. Скорость охлаждения молока оказывает большое влияние на содержание бактерий в сыром (непастеризованном) молоке. После дойки молоко следует как можно скорее охладить до температуры 4—7 °С. При более высокой температуре количество бактерий быстро возрастает. Охлаждение — самый важный фактор поддержания качества молока после дойки.

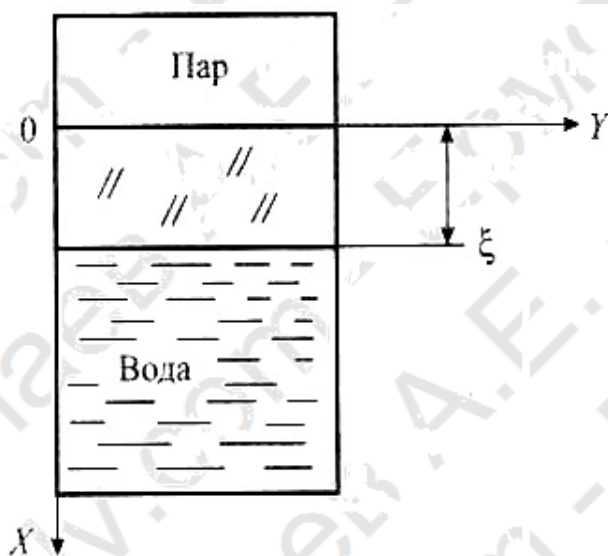
Рыба относится к скоропортящимся продуктам, поэтому с момента вылова до окончательной обработки она должна находиться в условиях, тормозящих развитие бактериальных процессов. Быстрота их протекания зависит от температуры окружающей среды, а также от вида рыбы. При медленном охлаждении рыбы темп развития микробиологических и биохимических процессов оказывается выше темпа охлаждения, и нежелательные изменения в рыбе могут произойти раньше, чем она успеет охладиться.

Наиболее крупными потребителями льда в пищевой промышленности являются мясокомбинаты и колбасные заводы. Он является неотъемлемой частью технологического процесса. Измельченный лед добавляется непосредственно в мясной фарш и поглощает теплоту, выделяющуюся при его перемешивании.

Анализируя современную ситуацию спроса на водный лед, можно указать на тенденцию увеличения потребности в льдогенераторных установках весьма большой производительности (более 20 т/сут) и

миниьдогенераторов с выходом льда от 100 до 500 кг/сут. Первое связано с тем, что в местах традиционной заготовки природного водного льда в последние годы такая заготовка не представляется возможной из-за прекращения замерзания природных водоемов (район Астрахани, Ставрополье, Краснодарский край). Второе объясняется появлением большого числа мелкомасштабных мясоперерабатывающих предприятий, фактически колбасных цехов, где по условиям технологии требуется добавка измельченного льда в фаршевые смеси. К сожалению, отечественная промышленность в настоящее время не производит льдогенераторы такой производительности и существующая потребность преимущественно удовлетворяется за счет поставок из-за рубежа.

Для анализа вакуумного замораживания жидкостей в спокойном состоянии рассмотрим замкнутую герметичную полость, внутри которой находится жидкость (вода) в спокойном состоянии при температуре, близкой к $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Можно предположить, что при подаче воды в вакуумируемую полость, расход воды был принят таким, чтобы при подлете капель к подложке они охлаждались до околонулевого состояния. Вакуумирование полости осуществляется с эффективной скоростью S , и эта скорость остается постоянной в том диапазоне давления, при котором



образуется ледяной массив. Данное предположение вполне соответствует реальному положению дел при специальном подборе средств вакуумной откачки для конкретного вида замораживаемой жидкости.

Теплофизические свойства жидкости должны быть известны — это молекулярная масса,

теплоты испарения r и замерзания L , температура замерзания T_ϕ , плотность льда жидкости ρ_λ , коэффициент теплопроводности льда λ в состоянии таяния X .

При принятых обозначениях на рисунке ξ — глубина промерзания льда по координате x . На границе раздела «лед—паровая полость» можно записать условие

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial X} \Big|_{x=0} = S^* \rho_\lambda \rho'' \quad (1)$$

где S^* — эффективная скорость откачки на единицу площади сечения вакуумной полости;

ρ'' — упругость насыщенных паров воды.

На границе раздела «лед—вода» условие теплового взаимодействия определяется как

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial X} \Big|_{x=\xi} = L \frac{d\xi}{d\tau} \rho_\lambda \quad (2)$$

Распределение температур в слое намораживания льда примем прямолинейным:

$$T = T_e + \frac{T_\phi - T_0}{\xi} X \quad (3)$$

где T_0 — температура поверхности льда на границе раздела «лед—паровая полость».

Такое предположение обосновано тем, что лед образуется в тонких слоях толщиной ξ (отношение толщины ξ к внутреннему диаметру корпуса льдогенератора меньше 0,04), которые со временем смораживаются в ледяной массив цилиндрической формы.

Дифференцируя уравнение (3) и применяя условие (1), в котором упругость паров воды ρ'' выражена через давление насыщенных паров по уравнению состояния, получаем

$$\frac{T_{\delta} - T_0}{\xi} = \frac{S * \psi(L + r)}{\lambda} \psi \frac{P \psi \mu}{R \psi T_0} \quad (4).$$

Вновь используя уравнение прямолинейного распределения температур (3), и применяя граничное условие (2) приходим к уравнению вида

$$\frac{T_{\delta} - T_0}{\xi} = \frac{L \psi \rho_{\epsilon}}{\lambda} \psi \frac{d\xi}{d\tau}.$$

Откуда, разделяя переменные и интегрируя, получаем

$$T_0 = T_{\delta} - \frac{L \psi \rho_{\epsilon}}{\lambda \psi \tau} \psi \frac{\xi^2}{2} \quad (5).$$

Данное уравнение является ключевым, так как оно содержит параметр времени τ и искомую толщину слоя намораживания льда ξ . Выразим давление упругости паров воды надо льдом:

$$P = A \psi e^{-\frac{k}{T_0}} \quad (6)$$

и подставим его в уравнение (4), тогда с учетом уравнения (5) получим

$$\xi = \frac{(T_{\delta} - T_0) \psi R \psi \frac{\psi}{\psi} T_{\delta} - \frac{\rho_{\epsilon} \psi L \psi \xi^2}{2 \psi \lambda \psi \tau} \psi}{\frac{\rho_{\epsilon} \psi L}{\lambda} \psi A \psi e^{-\frac{k}{T_0}} \psi \psi} \quad (7).$$

Полученный результат приведен в виде неявного уравнения относительно искомого параметра ξ .

Зависимость упругости насыщенных паров воды от температуры кипения можно представить в упрощенном виде

$$P = 35 \psi T_0 - 8940 \quad (8).$$

Такое уравнение описывает табличные данные по упругости насыщенных паров воды от температуры в диапазоне температур 0...-15 °С.

Тогда с учетом (8) из (4) получаем

$$\frac{T_{\delta} - T_0}{\xi} = \frac{S * \psi_L}{\lambda} \psi_{\mu} \frac{\psi_3}{R} \psi_{\mu} \psi_3 35 - \frac{8940}{T_0} \frac{\psi}{\psi} \quad (9)$$

и, применяя равенство (5), получаем

$$\frac{S * \psi_L}{R} \psi(L + r) \psi_3 k - \frac{b}{T_{\delta} - \frac{\rho_{\epsilon} \psi_L \psi_{\xi}^2}{2 \psi_L \psi_r}} \psi = \frac{\rho_{\epsilon} \psi_L \psi_{\xi}}{2 \psi_r} \quad (10).$$

Данное уравнение учитывает следующие факторы:

- геометрические размеры поверхности контакта воды со льдом и поверхности вакуумного воздействия на слой воды;
- скорость откачки вакуумного насоса;
- свойства воды и льда.

Сопоставление графиков теории и эксперимента

Намораживание слоями по 10 мм

