

УДК 639.33

Численно-аналитический метод расчета эволюции полей температур с учетом динамики размораживания

Д-р техн. наук И.Ю. АЛЕКСАНИН, Н.В. ДУЛЬГЕР, канд. техн. наук В.Н. ЛЫСОВА
Астраханский государственный технический университет

A mathematical model of hydrobionts defrostation process is given that takes into consideration the characteristics of biological object, the analytical and numerical realization of which allowed to evaluate the evolution of temperature fields. The developed numerical and analytical method of calculation of the evolution of temperature fields and its software taking into account the dynamics and approximation of the kinetics curves of defrostation allows to calculate the temperatures in industrially frozen blocks, during defrostation of different kinds of raw materials and methods of defrostation.

В настоящее время проблема совершенствования технологического оборудования в пищевой промышленности тесно связана с вопросами его надежности, энергосбережения и максимального сохранения качества обрабатываемого продукта на каждом этапе технологической цепи, сокращения потерь сырья при обработке. Более 70 % вырабатываемой пищевой продукции приходится на долю мороженых продуктов. В этой связи разработка рациональных, энергосберегающих способов и конструкций аппаратов для размораживания является актуальной задачей, решение которой зависит от множества варьируемых факторов (вида и параметров теплоносителя, способа его подвода и т.д.).

Очевидно, что создание рациональной технологии невозможно без комплексного изучения свойств объекта и режимных параметров процесса холодильной обработки, заключительный этап которой – размораживание.

Наиболее распространен способ размораживания гидробионтов путем погружения или орошения водой. Тем не менее водный способ размораживания и системы энергоподвода в промышленных дефростерах еще недостаточно изучены и приводят к ухудшению качественных показателей замороженных продуктов.

Проводили исследования физико-химических, теплофизических и структурно-механических свойств гидробионтов [2] и получили аппроксимирующие зависимости.

Математическую модель процесса размораживания [1,3] разработали с учетом комплекса характеристик биообъекта. Ее аналитическая и численная реализация

позволила оценить эволюцию температурных полей по толщине блока и скорости размораживания для различного сырья в зависимости от варьируемых факторов, вида теплоносителя, способа и цикличности энергоподвода.

Численно-аналитический метод расчета эволюции полей температур и его программное обеспечение разработаны с учетом динамики размораживания на основе аппроксимации кривых кинетики размораживания влаги и комплекса функциональных зависимостей свойств и характеристик продуктов [влажности, температуры, структурных характеристик (плотности)]. Поля температур рассчитаны для блоков промышленной заморозки при дефростации различных видов сырья и разных способах размораживания.

Для соблюдения технологических требований необходимо знать величину и распределение температуры в слое в любой момент времени. Экспериментально определить изменения температуры в слое очень трудно из-за специфических особенностей теплопереноса.

Нахождение нестационарных полей температур связано с решением системы дифференциальных уравнений влаго- и теплопереноса. Решить эту систему при переменных коэффициентах без ряда серьезных допущений трудно. Частные аналитические решения достаточно громоздки, что усложняет их практическое использование. Целесообразно применять математические численные методы, с помощью которых с высокой точностью можно рассчитать поля температур, причем составленную программу расчета можно достаточно оперативно использовать в инженерных рас-

четах дефростеров при различных режимах и конструктивных особенностях.

В общем виде уравнение переноса тепла при одномерной задаче имеет вид

$$c\rho(x, t, W) \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(W, x, t) \frac{\partial t}{\partial x} \right] + \quad (1)$$

$$+ \varepsilon r(W, x, t) \rho(W, x, t) \frac{\partial L}{\partial \tau} + w(W, x, t),$$

где функции $c\rho$, λ , r , ρ , w – теплофизические параметры;

L – относительное содержание вымороженной воды.

В уравнение (1) можно подставить вместо $\frac{\partial L}{\partial \tau}$ дифференциальное изменение среднего по слою содержания вымороженной воды $\frac{\partial \bar{L}}{\partial \tau}$, а также с достаточной

точностью принять коэффициент фазовых превращений $\varepsilon = 1$, так как в процессе размораживания перенос влаги в основном в виде жидкости происходит при относительной изотропности структуры. Учитывая изотропность (равномерность L по слою) структуры при размораживании, $c\rho$, λ , r , ρ практически не зависят от x , и если вынести $\bar{\lambda}(W, t)$ за знак дифференциала, разделить уравнение на $c\bar{\rho}(W, t)$, получим

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \bar{a}(W, t) \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{r(W, t) \bar{\rho}(W, t)}{c\bar{\rho}(W, t)} \frac{\partial \bar{L}}{\partial \tau} + \frac{w(W, x, t)}{c\bar{\rho}(W, t)}, \quad (2)$$

$$\text{где } \bar{a}(W, t) = \frac{\bar{\lambda}(W, t)}{c\bar{\rho}(W, t)} - \text{коэффициент температуро-}$$

проводности.

Целесообразно провести дифференциальное преобразование правой части уравнения (2). Вследствие отсутствия в нашем случае внутреннего источника тепла $w = 0$ последнее слагаемое правой части можно исключить. Сократив плотность во втором слагаемом (далее знаки среднего и варьируемые параметры будем опускать) и перенеся второе слагаемое правой части в левую с обратным знаком, после выноса за скобку $\frac{\partial t}{\partial \tau}$ и математических преобразований получим

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{a}{1 - \frac{r}{c} \frac{\partial L}{\partial t}} \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}. \quad (3)$$

Подставив функциональные зависимости $c, \lambda, \rho, r, \frac{\partial L}{\partial \tau} = f(W, t)$ в уравнение (3), получим

математическую модель переноса тепла в блоке с учетом фазового перехода (лед – вода).

Начальные условия для данной задачи зададим с учетом равномерного распределения температуры в начальный момент времени $\tau_{\text{нач}}$ в виде:

$$\text{при } \tau = \tau_{\text{нач}} = 0, \quad T = T_0 (\text{°C}), \text{ т.е. } T(x, \tau_{\text{нач}}) = T_0.$$

При размораживании теплообмен на границе слоя задается граничными условиями 2-го рода:

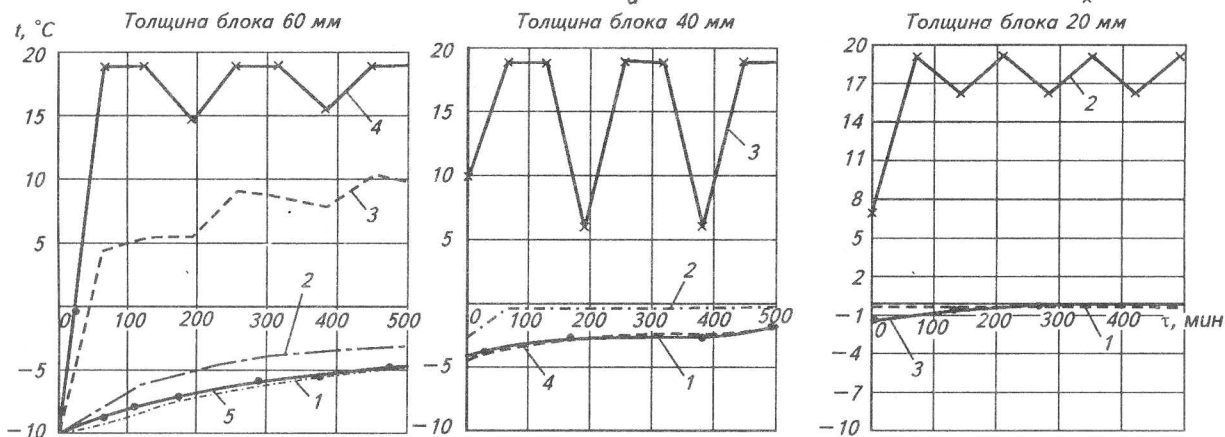
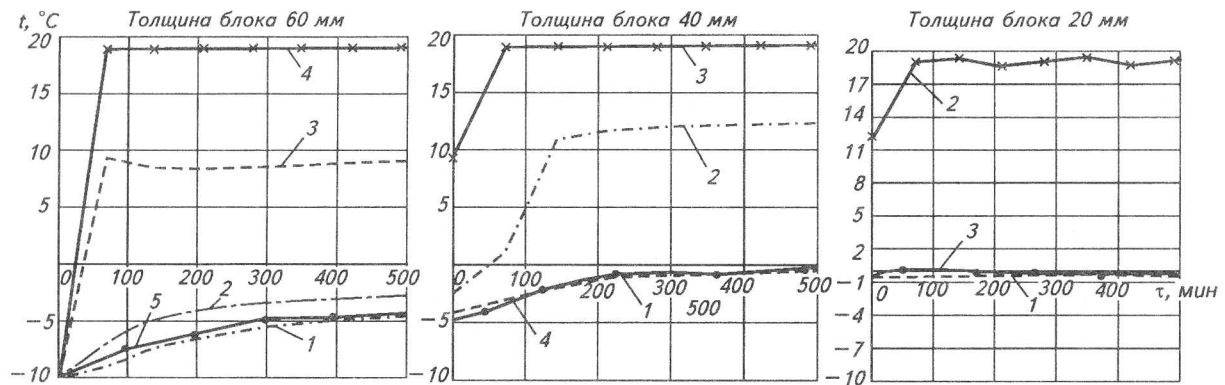
$$-\lambda(W, t) \frac{\partial t}{\partial x} = \alpha [T_{\text{окр.среды}} - T_{x=0(\text{поверхн})}]. \quad (4)$$

При различных способах энергоподвода и температурных режимах коэффициент теплоотдачи α составляет 300...10000 Вт/(м²·К). В данном случае теплоотдача зависит от формы и размеров поверхности нагрева (или охлаждения), ее температуры, температуры среды, коэффициента объемного расширения и других ее физических свойств ($\lambda, \alpha, v, c, \rho$).

Решением уравнения (4) при краевых условиях является функция $t = f(\tau, W, x)$, подставив в которую $L = f(\tau, t, W)$, получим искомую функцию $t = f(x, \tau, W)$.

В оросительном режиме расчет производили при новых начальных условиях по толщине и на границе слоя, соответствующих полю температур, взятому из расчетной матрицы температур $t = f(x, \tau_k)$ и присвоенному в последующем расчете температурному полю $t = f(x, \tau_0)$ в начальный момент времени после достижения криоскопической температуры на глубине, равной 1/6 толщины блока. При этом в новом расчете автоматически уменьшаются величина матрицы и характерный размер блока на 1/3 его толщины. Число последовательных расчетов ограничивается минимальной толщиной блока, равной морфометрическому размеру рыбы.

При осциллирующем энергоподводе [периодическое отключение внешнего подвода энергии и проведение дефростации (размораживание + прогрев) за счет аккумулированной блоком тепловой энергии] и асимптотическом приближении температуры поверхности к температуре внешнего теплоносителя и снижении темпа роста температуры на поверхности, оцениваемом по тангенсу угла наклона зависимости $T = f(\tau)$ на каж-



Послойная эволюция температур при оросительном размораживании ($t_c = 20^\circ\text{C}$, $W = 0,78$; $t_{нач} = -10^\circ\text{C}$):
 а – постоянный энергоподвод; б – осциллирующий энергоподвод;

1 – в центре; 2 – во втором слое; 3 – в третьем слое; 4 – на поверхности; 5 – экспериментальные данные
 1 – в центре; 2 – во втором слое; 3 – в третьем слое; 4 – экспериментальные данные
 1 – в центре; 2 – на поверхности; 3 – экспериментальные данные

дом шаге $\Delta\tau = \tau_{k+1} - \tau_k$ по времени $\text{tg}\psi = (T_{k+1} - T_k) / \Delta\tau$, приравниваем в граничных условиях коэффициент теплоотдачи α к нулю (при $\text{tg}\psi \leq 0,2$ $\alpha = 0$). После этого температура на поверхности будет снижаться, а в центре слоя повышаться вначале резко и далее плавно (из-за снижения температурного градиента внутри слоя), стремясь к выравниванию по слою. После уменьшения темпа снижения температуры поверхности ниже определенного предела при $\text{tg}\psi \leq -1,39 \cdot 10^{-3}$ (экспериментальные данные) подключается внешний энергоподвод и в граничных условиях значение коэффициента теплоотдачи α соответствует реальным условиям конвективного теплообмена на границе раздела фаз (блок – теплоноситель).

Циклы повторяются до достижения технологически заданной температуры в центре блока (в конце дефростации).

В осциллирующем оросительном режиме при начальных и граничных условиях учитываются вышеперечисленные особенности обоих режимов.

Практическую оценку истинности решения можно провести дискретно по локальным в блоке температурам продукта, полученным экспериментально.

Для численного решения дифференциального уравнения переноса тепла параболического типа в частных производных при заданных начальных и разнородных граничных условиях использовали метод конечных разностей по неявной схеме.

Графическая аппроксимация температурных полей при рациональных режимах оросительного размораживания показывает, что температура на поверхности блока быстро повышается до температуры, близкой к температуре среды, и в дальнейшем практически не меняется. Изменение температуры по толщине, кроме пограничного слоя, непосредственно контактирующего с теплоносителем, где происходит более плавный рост температуры по зависимости, аналогичной поверхностной эволюции температуры (с характерной точкой изменения вида функциональной зависимости), имеет иной характер. По толщине блока происходит плавное

изменение температуры по зависимости, не меняющейся с течением времени, так как относительно резкому повышению температуры препятствуют дополнительные затраты энергии на фазовый переход (лед – вода) при уменьшающемся температурном градиенте в слое.

Интенсивность размораживания в оросительном режиме повышается из-за уменьшения размеров блока и обновления поверхности теплообмена, при послойном отпадании структурно-однородных частей блока (в частности, равных морфометрическому размеру рыбы).

При осциллирующем энергоподводе [периодическое отключение внешнего подвода энергии и проведение дефростации (размораживание + прогрев) за счет аккумулированной блоком тепловой энергии] характер изменения температуры на поверхности и в глубине слоя (см. рисунок) экстремально-циклический, что, как показали теоретический анализ и экспериментальные исследования, приводит к снижению энергозатрат и повышению качества размороженной продукции – сохранению структуры продукта, аминокислотного, витаминного состава и т.д.

Расчеты эволюции полей температур проводили при осциллирующем оросительном режиме, комплексно сочетающем в себе достоинства отдельных вышеописанных режимов. Данный режим рекомендован авторами для внедрения на производстве, для модернизации существующих и разработки новых конструкций дефростеров, не требующих больших материальных затрат при экономии энергии и повышении качества готовой продукции.

Реализация предложенных мероприятий на базе модернизации оросительного дефростера (две транспортные зоны: для перемещения замороженных блоков и отвода размороженной кильки из рабочей зоны, зональная периодическая подача воды) позволит снизить себестоимость готовой продукции.

• Таким образом, на основе экспериментального изучения свойств гидробионтов установлено, что λ и α определяются только значениями влияющих факторов (влажности W и температуры t) и практически не зависят от вида гидробионта.

• На базе теоретического анализа, проведенных экспериментов и апробации на производстве сделан вывод о рациональности применения осциллирующего режима (периодического отключения внешнего подвода энергии и проведение дефростации за счет аккумулированной

блоком тепловой энергии), комплексно сочетающего в себе достоинства традиционных режимов.

• Отмечено, что однократного орошения блока водой недостаточно, чтобы разморозить поверхностный слой и удалить его при $T > 15$ °С, потому что допустимая температура на поверхности достигается за более короткий промежуток времени и приводит к сравнительному снижению конечного теплосодержания блока, необходимого для окончательного размораживания слоя. Этот на первый взгляд аномальный эффект приводит не к сокращению продолжительности размораживания, а к ее увеличению при повышении температуры воды более 20 °С, т.е. использование воды с относительно высокой температурой нецелесообразно.

• Даны рекомендации по внедрению осциллирующего способа размораживания (продолжительность циклов, температурных режимов), апробированного в промышленных условиях, по модернизации существующих и разработке новых конструкций дефростеров, не требующих значительных материальных затрат при экономии энергии и повышении качества готовой продукции. Применение осциллирующих режимов сокращает продолжительность размораживания до 30 %, продолжительность контакта с теплоносителем – до 60 %.

• Осциллирующий режим размораживания позволяет создать более мягкие условия (малые температурные градиенты в блоке и относительно низкая средняя температура размороженной рыбы) при проведении процесса. Погружное размораживание происходит при $t_{cp} = 10...11$ °С, осциллирующий режим размораживания – при $t_{cp} = 4...5$ °С.

Список литературы

1. *Алексанян И.Ю., Лысова В.Н., Львова Н.В.* Оптимизация процесса размораживания дефростеров на основе математического моделирования // Научные разработки ученых – решению социально-экономических задач Астраханской области / Материалы техн. конференции Администрации Астраханской области (плерарное заседание). – Астрахань: АГТУ, 2001.
2. *Лысова В.Н., Дюльгер Н.В.* К вопросу решения задачи теплопереноса с подвижными границами фазового перехода при циклическом энергоподводе // Материалы Междунар. науч.-техн. конф., посвященной 70-летию АГТУ. – Астрахань, 2000. Т.2.
3. *Лысова В.Н., Львова Н.В.* Математическая модель дефростации с учетом многообразия параметров процесса // Вестник АГТУ / Сборник науч. трудов. – Атырау, 2002.