

энергетических установок на морских судах: Автореферат дис. ... канд. техн. наук. — Л., 1976. — 27 с.

6. РД 5.5524-82. Системы подогрева жидких грузов морских нефтеналивных судов. Правила и нормы проектирования. — М.: Министерство судостроения СССР, 1982. — 105 с.

7. Судовые энергетические установки: Учебник / Г.А. Артемов, В.П. Волошин, Ю.В. Захаров, А.Я. Шквар. — Л.: Судостроение, 1987. — 480 с.

Получено 11.07.2005 г.

УДК 536.244 / 664.8.037.5

Лисица А.Ю.,
Петухов И.И., Сырый В.Н.

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»

ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ И СОХРАНЕНИЯ КАЧЕСТВА ПЛОДООВОЩНОЙ ПРОДУКЦИИ ПРИ БЫСТРОМ ЗАМОРАЖИВАНИИ

Досліджено вплив режиму охолодження та заморожування на темп охолодження ягід та профіль температури. Результати розрахунку співставленні з даними, отриманими під час експериментів. Визначено раціональні режими заморожування з точки зору збереження якості продуктів та мінімізації витрат рідкого азоту у швидкоморозильній тунельній установці.

Исследовано влияние режима охлаждения и замораживания на темп охлаждения ягод и профиль температуры. Результаты расчёта сопоставлены с данными, полученными в ходе экспериментов. Определены рациональные режимы замораживания с точки зрения сохранения качества продуктов и минимизации затрат жидкого азота в скороморозильной туннельной установке.

The influence of cooling and freezing mode on rate cooling berries and temperature profile was investigated. Calculation result were compared with the experimental data. Rational freezing modes with relation to product quality preservation and liquid nitrogen in fast freezing plant expense minimization were defined.

C — концентрация;
 D_C — коэффициент диффузии;
 c — удельная теплоёмкость;
 D_T — коэффициент температуропроводности;
 m — масса;
 \dot{Q} — тепловой поток;
 r — радиус, пространственная координата;
 T, t — температура;
 \bar{T}_l — средняя температура тела;
 ΔT_{pc} — глубина захода в метастабильную область;
 w — скорость;
 x — массовая доля;
 α — коэффициент теплоотдачи;
 λ — коэффициент теплопроводности;

ρ — плотность;
 τ — время;
 ψ — скрытая теплота кристаллизации;
ХАТ — холодная аэродинамическая труба.
Индексы:
1 — растворитель;
2 — растворённые вещества;
 c — охладитель;
 f — параметры на фронте или зоне кристаллизации;
1 — жидкая фаза;
 o — начальное значение;
 s — твёрдая фаза;
 pc — переохлаждение.

Введение

Одним из основных способов длительного сохранения качества плодовоовощных продуктов яв-

ляется быстрое замораживание и последующее хранение при низких температурах. Для этого в основном используются воздушные холодильные технологии. Развитие производства быстрозаморо-

роженных продуктов в странах СНГ отстает от потребностей рынка из-за недостаточной технологической оснащённости и высокой цены оборудования.

Использование криогенных азотных технологий замораживания облегчает решение этих проблем. По сравнению с воздушными холодильными технологиями уменьшаются размеры установки и необходимые производственные площади, увеличивается мобильность. В 2-3 раза сокращаются потери массы ягод и фруктов при замораживании, вследствие образования мелкокристаллической структуры льда значительно лучше сохраняются начальные качества сырья – структура, содержание витаминов, ароматических веществ, тканевых соков, вкусовые и питательные свойства при дефростации (оттаивании) [1]. Реализовать указанные преимущества можно при рациональном выборе схемы и рабочих параметров установки, максимальном использовании хладоресурса жидкого азота.

Обзор проблемы

Более глубокое и детальное исследование процессов охлаждения, замораживания и дефростации пищевых продуктов предполагает численное моделирование. В установках для замораживания пищевых продуктов одним из определяющих параметров является продолжительность процесса кристаллизации и градиент температуры.

В общем случае аналитическое решение такой задачи получить невозможно из-за нелинейности описывающих процесс уравнений [2]. Для расчёта времени замораживания тел простой формы Международным институтом холода рекомендованы формулы Планка [3]. В некоторых случаях, на базе экспериментов, формулы Планка уточняются. Однако все эти решения получены для частных случаев охлаждения тела без фазового перехода либо затвердевания тела с начальной температурой, равной криоскопической. Они не учитывают зависимость физико-химических свойств от температуры и концентрации растворённых веществ в незамороженной части тканевых соков.

На практике замораживание реализуется при неоднородном профиле температуры в толще

продукта. Причём свойства продукта находятся в тесной зависимости от структуры содержащейся в нём воды и концентрации водного раствора. Последняя, при перемещении фронта кристаллизации к ядру продукта, увеличивается. Связь криоскопической температуры с концентрацией растворённых веществ приведена в моделях [3–5].

Кроме того, действительный процесс замораживания пищевых продуктов, особенно при быстрым замораживании, существенно неравновесный. Из-за захвата и удержания маточного раствора между кристаллами затвердевшей части продукта состав жидкой фазы отклоняется от линии ликвидуса [6].

Упрощённые модели позволяют рассчитать лишь конечные значения параметров процесса замораживания и не позволяют получить их динамику и распределение в толще продукта. Между тем, в практике замораживания интерес представляет поведение пищевых продуктов в узком интервале температур между криоскопической и минус 10 °С, в котором происходят неблагоприятные изменения качества продуктов.

Упрощённые модели не позволяют также исследовать влияние эффекта задержки начала кристаллизации из-за кинетики фазового перехода. При медленном охлаждении (например, при вакуумировании) из-за отсутствия конвективного теплообмена внутри пищевых продуктов, их переохлаждение до начала кристаллизации может быть весьма существенным [4].

В [4] предложены модели кристаллизации пищевых продуктов в форме полубесконечного тела. В настоящей работе представлена модель замораживания тел в форме шара для произвольных начальных и граничных условий процесса. Модель учитывает зависимость теплофизических свойств от температуры и концентрации растворённых веществ в жидкой фазе продукта, изменение концентрации раствора при вымораживании растворителя, а также эффект переохлаждения вещества перед началом кристаллизации.

Основные уравнения модели

В начальный момент времени вещество шара имеет однородный профиль температуры и кон-

центрации растворённых примесей. Их изменение во времени описывается уравнениями тепловой и концентрационной диффузии в сферических координатах без внутренних источников теплоты и потоков массы:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{1}{c_p} \frac{\partial \lambda}{\partial T} \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)^2 + D_T \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right), \quad (1)$$

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = D_c \left(\frac{\partial^2 C}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial C}{\partial r} \right). \quad (2)$$

Задача полагается сферически симметричной, так что

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=0} = 0 \quad \text{и} \quad \left. \frac{\partial C}{\partial r} \right|_{r=0} = 0. \quad (3)$$

Для уравнения (1) на поверхности шара задаются граничные условия третьего рода:

$$-\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_f = \alpha_c (T_s - T_c). \quad (4)$$

Коэффициент теплоотдачи α_c выбирается в соответствии с характером взаимодействия продукта с охладителем: свободная или вынужденная конвекция одиночного продукта и засыпки, орошение или погружение продукта в низкокипящий охладитель.

Особенностью постановки задач с фазовыми превращениями является необходимость задания граничных условий на фронте фазового перехода. Это обусловлено разрывом теплофизических характеристик на границе раздела фаз и выделением скрытой теплоты фазового превращения. Одним из подходов к численному моделированию процессов затвердевания тел является задание двух границ зоны кристаллизации, между которыми жидкость охлаждена до криоскопической температуры, но процесс затвердевания ещё не завершён [7]. Для этой области с массой m_f граничное условие определяется уравнением скорости изменения массовой доли твёрдой фазы x_s :

$$\frac{dx_s}{d\tau} = \frac{\dot{Q}_s - \dot{Q}_l}{m_f \psi}. \quad (5)$$

Уравнение (2) интегрируется только в пределах жидкой фазы продукта. Следуя [2], на границе фазового перехода задаётся условие:

$$\left. \frac{\partial C}{\partial r} \right|_f = -\frac{C_f}{D_c} \frac{dr}{d\tau}. \quad (6)$$

Система (1-6) замыкается уравнениями, описывающими теплофизические свойства вещества.

Для учёта переохлаждения тела перед началом кристаллизации в настоящей модели предусматривается инициация фазы затвердевания при выполнении условия

$$\bar{T}_l \leq T_{fp} - \Delta T_{pc}. \quad (7)$$

После появления фронта затвердевания из-за выделения скрытой теплоты кристаллизации температура между границами зоны фазового перехода повышается до криоскопической. В дальнейшем процесс замораживания проходит без переохлаждения жидкой фазы.

Поскольку затвердевание начинается с периферии продукта и в нём отсутствует перемешивание массы, эффект переохлаждения проявляется в непосредственной близости к поверхности продукта. Например, при получении жидкого льда из воды и её растворов в поверхностных кристаллизаторах, величина слоя переохлаждения составляет несколько сотых миллиметра [6]. Тогда в (7) вместо \bar{T}_l следует использовать среднюю температуру на заданной толщине переохлаждённого слоя. Ее приближённое значение можно получить из эксперимента.

Для интегрирования уравнений (1, 2) используется явная численная схема, которая является наиболее точной и быстрой в реализации [8].

Обтекание потоком хладагента одиночного плода существенно отличается от обтекания слоя продуктов, что существенно влияет на время полного замораживания. Зависимость изменения коэффициента теплоотдачи от скорости охлаждающего потока при различной пористости слоя засыпки представлена на рис. 1.

Результаты исследования и их обсуждение

Для наилучшего сохранения качества продуктов и минимизации затрат жидкого азота в ско-

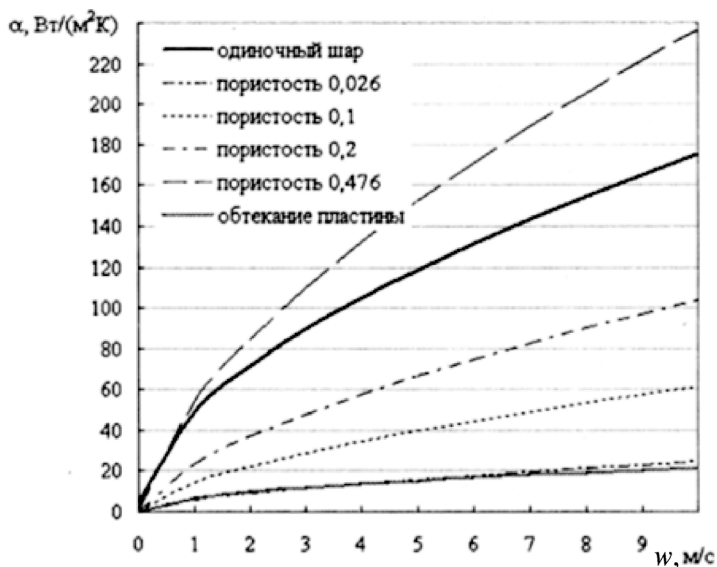


Рис.1. К оценке влияния соседних плодов на теплообмен с хладагентом. Диаметр шаров в засыпке 0,01 м; температура омывающей среды – 40 °С.

роморозильной туннельной установке необходимо проанализировать влияние основных режимных параметров (температуры и скорости охлаждающего потока) на время процесса. Для этого воспользуемся вышеприведенной методикой расчета. В качестве исследуемого продукта возьмем ягоду винограда. Зафиксируем диаметр и начальную температуру. Результаты расчета представлены на рис. 2.

Анализируя кривые, можно сделать вывод, что понижение температуры ниже –40 °С, равно как и увеличение скорости выше 5 м/с не дает существенного выигрыша во времени замораживания. На основе этих и других результатов для экспериментального исследования процессов замораживания была создана холодная аэродинамическая труба, схема которой представлена на рис. 3.

Конструкция ХАТ представляет собой замкнутый контур. На её рабочем участке 1 вдоль и поперёк охлаждающего потока может быть установлен сетчатый лоток 2 для размещения исследуемого продукта. Охлаждение продуктов осуществляется в потоке холодного газообразного азота или его смеси с воздухом.

Изменение температуры охлаждающего потока осуществляется посредством подачи в ХАТ

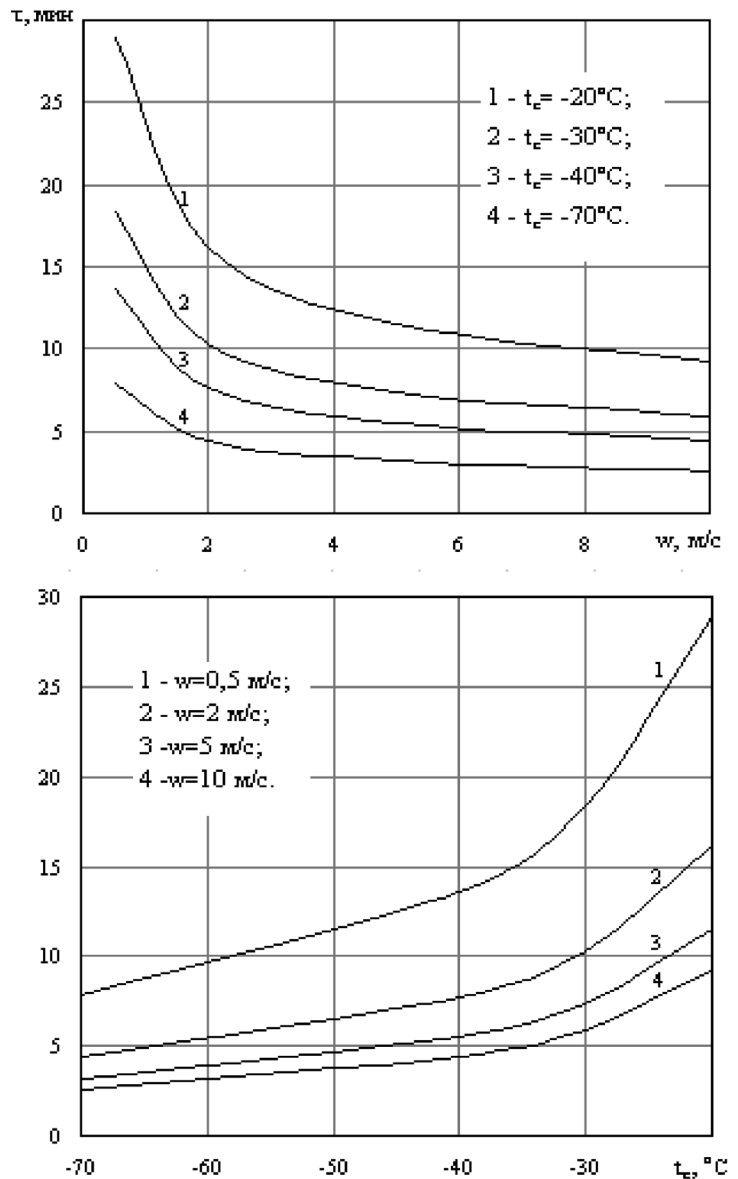


Рис. 2. Зависимость времени полного замораживания винограда от режимных параметров при $d = 18$ мм; $t_0 = 21$ °С.

жидкого азота. Для циркуляции потока используется вентилятор 5 с приводом от электродвигателя 6. Регулирование скорости потока осуществляется поворотной заслонкой 7. Визуализация состояния замораживаемого продукта осуществляется с помощью иллюминаторов.

Информационно-измерительная система и система регулирования выполнены на основе измерителей-регуляторов 3 и персонального компьютера 4. Она позволяет поддерживать стационарный режим охлаждающего потока и в

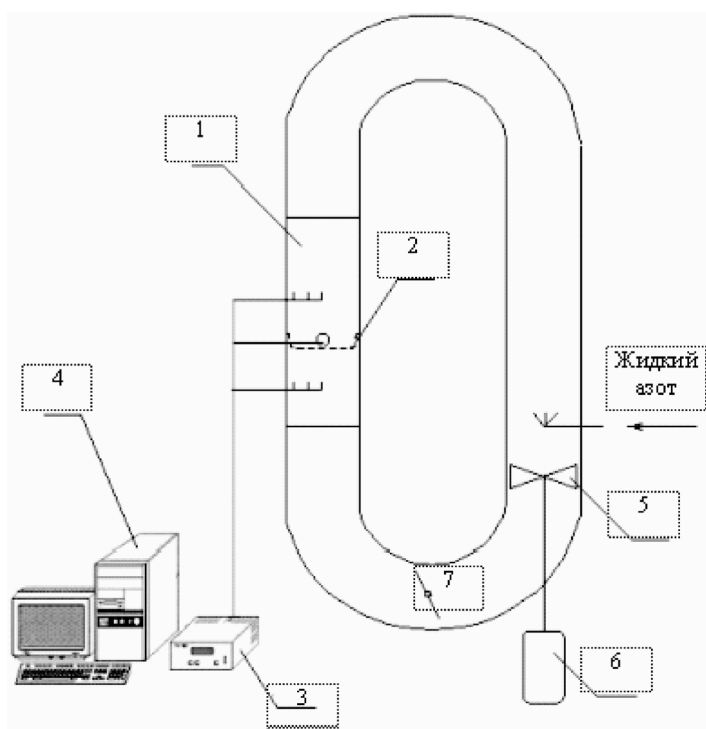


Рис. 3. Схема экспериментальной установки ХАТ.

автоматическом режиме фиксирует температуру и скорость охлаждающего потока вблизи и на удалении от исследуемого продукта, а также температуру в толще продукта.

На рис. 4 представлены результаты расчёта и эксперимента по замораживанию одиночного плода винограда диаметром 18 мм при начальной температуре 21 °С. Начальная концентрация растворённых веществ в продукте задавалась на уровне 200 кг/м³, коэффициент концентрационной диффузии – 10⁻⁹ м²/с [4]. Здесь представлены данные о средней температуре ядра продукта, составляющего 30% его общей массы. Это связано с условиями проведения эксперимента – термopара располагалась в центре исследуемого продукта, тем самым оказывая влияние на процесс замораживания.

При продвижении фронта кристаллизации к центру шара, расчётная концентрация растворённых веществ в жидкой и твёрдой фазе раствора увеличивается до 500 кг/м³. При этом криоскопическая температура на фронте затвердевания снижается с –2 до –8 °С.

Из рисунка видно, что расчётная динамика температуры хорошо согласуется с данными опыта.

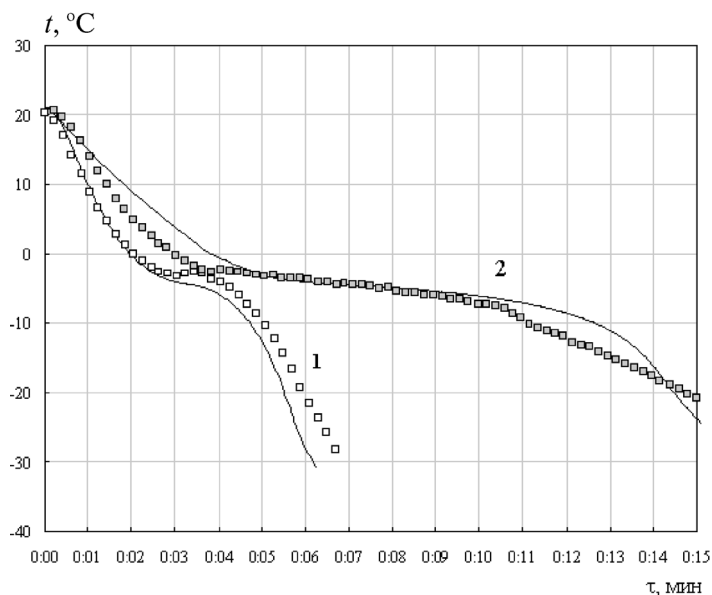


Рис. 4. Динамика температуры в ягоде винограда при различной скорости потока в ХАТ: $d = 18$ мм; $t_c = -40$ °С; 1 – $w_c = 3,8$ м/с; 2 – $w_c = 0,5$ м/с; сплошные линии – расчётные параметры; маркеры – эксперимент.

При подготовке статьи использованы результаты, полученные в ходе выполнения проекта Uzb-35j, профинансированного Украинским научно-технологическим центром.

ЛИТЕРАТУРА

1. Павлюк Р.Ю., Черевко А.И., Гулый И.С., Симахина Г.А., Соколова Л.М., Дьякова Т.С., Федорова С.С., Новые технологии витаминных углеводсодержащих фитодобавок и их использование в продуктах профилактического действия. Харьков. гос. академия технологии и организации питания, Укр. гос. ун-т пищевых технологий. Харьков-Киев 1997. – 285 с.
2. Пехович А.И., Жидких В.М. Расчёты теплового режима твёрдых тел. Изд. 2-е перераб. и доп. – Л.: «Энергия», 1976.-351 с.
3. Чумак И.Г., Никульшина Д.Г., Холодильные установки, проектирование: Учебное пособие для вузов. – К.: Выща шк. Головное изд-во, 1988. – 280 с.
4. Christopher Val Studholme. Modeling Heat and Mass Transport In Biological Tissues During Freezing. A thesis submitted to the Faculty of

Graduate Studies and Research in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Applied Mathematics Department of Mathematical Sciences Edmonton, Alberta Spring 1997. P 135.

5. *Dariusz Gyal, Franciszek Kluza*. Experimental and analytical determination of freezing point depression/ Electronic journal of polish agricultural universities. 2002 V 5. Issue 2 series agricultural engineering. <http://www.ejpau.media.pl/series/volume5/issue2/engineering/art-03.html>

6. *Чумак И.Г., Чепурненко В.П. и др.*; Холодильные установки – М.: Агропромиздат, 1991. – 495 с.

7. *Chen-Chao-K, Chang-Vif-V*. Variational embedding technique to inward cylindrical solidification with convective and radiative boundary conditions. – 3-d Pasif. Chem. and Congr., Seoul, May 8...11, 1983. Proc., V2. P. 37-41.

8. *Оран Э., Борис Дж.* Численное моделирование реагирующих потоков: Пер. с англ. – М.: Мир, 1990. – 660 с.

Получено 11.07.2005 г.