

**ОДЕСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ
ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

ЗБІРНИК ПРАЦЬ

VI МІЖНАРОДНОЇ НАУКОВО-ПРАКТИЧНОЇ
КОНФЕРЕНЦІЇ

**«ІННОВАЦІЙНІ
ЕНЕРГОТЕХНОЛОГІЇ»**



**ОДЕСА
2017**

Публікуються доповіді, представлені на VI Міжнародній науково-практичній конференції «Інноваційні енерготехнології» (4 – 8 вересня 2017 р.) і присвячені актуальним проблемам підвищення енергоефективності в сфері АПК, харчових та хімічних виробництвах, розробки та впровадження ресурсо-та енергоефективних технологій та обладнання, альтернативних джерел енергії.

Редакційна колегія:

доктор техн. наук, професор

О.Г. Бурдо

Ю.О. Левтринська

Е.Ю. Ананійчук

О.В. Катасонов

Одеська національна академія харчових технологій, 2017 р.

МІЖНАРОДНИЙ НАУКОВИЙ ОРГКОМІТЕТ

Єгоров
Богдан Вікторович
Бурдо
Олег Григорович
Атаманюк
Володимир Михайлович
Васильєв
Леонард Леонідович
Гавва
Олександр Миколайович
Гумницький
Ярослав Михайлович
Долинський
Анатолій Андрійович
Зав'ялов
Владимир Леонідович
Керш
Владимир Яковлевич
Колтун
Павло Семенович
Корнієнко
Ярослав Микитович
Малежик
Іван Федорович
Михайлов
Валерій Михайлович
Паламарчук
Ігор Павлович
Снежкін
Юрій Федорович
Сорока
Петро Гнатович
Тасімов
Юрій Миколайович
Товажнянський
Леонід Леонідович
Ткаченко
Станіслав Йосифович
Ульєв
Леонід Михайлович
Черевко
Олександр Іванович
Шит
Михайл Львович

- голова, Одеська національна академія харчових технологій, ректор, д.т.н., професор
- вчений секретар, Одеська національна академія харчових технологій, д.т.н., професор
- Національний університет «Львівська політехніка», д.т.н., професор
- Інститут тепло- і масообміну ім. А.В. Ликова, Республіка Білорусь, д.т.н., професор
- Національний університет харчових технологій, д.т.н., професор
- Національний університет „Львівська політехніка”, д.т.н., професор
- Інститут технічної теплофізики, почесний директор, д.т.н., академік НАНУ
- Національний університет харчових технологій, д.т.н., професор
- Одеська державна академія будівництва та архітектури, д.т.н., професор
- Technident Pty. Ltd., Australia, Dr.
- Національний технічний університет України „Київський політехнічний інститут”, д.т.н., професор
- Національний університет харчових технологій, д.т.н., професор
- Харківський державний університет харчування та торгівлі, д.т.н., професор
- Вінницький національний аграрний університет, д.т.н., професор
- Інститут технічної теплофізики, директор, д.т.н., член-кор. НАНУ
- Український державний хіміко-технологічний університет, д.т.н., почесний професор
- Віце-президент союзу наукових та інженерних організацій України
- Національний технічний університет „Харківський політехнічний інститут”, д.т.н., професор
- Вінницький національний технічний університет, г. Вінниця, д.т.н., професор
- Національний технічний університет Харківський політехнічний інститут”, д.т.н., професор
- Харківський державний університет харчування та торгівлі, ректор, д.т.н., професор
- Інститут енергетики Академії Наук Молдови, к.т.н., в.н.с.

3. Природные образования носят стохастическую и фрактальную природу, поэтому целесообразным выглядит применение для исследований аппарата фрактальной геометрии и теории перколяции.

Литература

1. Мидоренко Д. А. Мониторинг водных ресурсов: Учеб. пособие. / Д. А. Мидоренко, В. С. Краснов. – Тверь: Твер. гос. ун-т, 2009. – 77 с.
2. Хвесик М. А. Водні ресурси – інвестиція сьогодення і перспектива майбутнього / М. А. Хвесик, В. М. Мандзик. // Інвестиції: практика та досвід. – 2009. – №1. – С. 2–8.
3. Закон України «Про енергозбереження» [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/74/94-%D0%B2%D1%80>.
4. Антипов С. Т. Тепло- и массообмен при концентрировании жидких сред вымораживанием / С. Т. Антипов, В. Е. Добромиров, В. Ю. Овсянников. – Воронеж: гос. технол. акад. Воронеж, 2004. – 208 с.
5. Бурдо О. Г. Процессы кристаллизации воды в ультразвуковом поле / О. Г. Бурдо, Ф. А. Тришин, А. Р. Трач. // Наукові праці [Одеської національної академії харчових технологій]. – 2014. – С. 80–86.
6. Бурдо О. Г. Моделирование процесса кристаллизации воды в ультразвуковом поле / О. Г. Бурдо, Ф. А. Тришин, А. Р. Трач. // Харчова наука і технологія. – 2015. – С. 75–80.
7. Методи моделювання пористих середовищ, що проводять / П. Ф.Буданов, Ю. С. Олійник, А. Г. Сіліна, А. М. Чернюк. // Системи обробки інформації. – 2015. – №5. – С. 51–55.
8. Menger sponge [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://en.wikipedia.org/wiki/Menger_sponge.
9. Москалев П. В. Математическое моделирование пористых структур / П. В. Москалев, В. В. Шитов. – Москва: Физматлит, 2007. . – 120 с.

УДК 621.75:541

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА НАПРАВЛЕННОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ

Бурдо О.Г., д-р техн. наук, профессор, Давар Ростами Пур, фирма «D.R.P.», Teheran, Iran, Масельская Я.А., магистрант факультета ЭТОиТД, ОНАПТ

MATHEMATICAL MODEL OF THE DIRECTIONAL CRYSTALLIZATION PROCESS

Burdo O.G., Dr. Tech. Sci., Professor, Davar Rostami Pur, firma "D.R.P.",
Teheran, Iran, Maselskaya Ya.A., graduate student of the Faculty of ETE & TD,
ONAPT

Аннотация. Рассмотрены мировые тенденции на рынке соков. Анализируются перспективы гранатового сока в Украине. Сравниваются современные технологии концентрирования соков. Показаны преимущества низкотемпературных методов концентрирования. Обоснованы перспективы технологий блочного вымораживания для получения концентрированного гранатового сока.

Abstract. The world trends in the juice market are considered. The prospects of pomegranate juice in Ukraine are analyzed. Contemporary technologies of juicing are compared. The advantages of low-temperature methods of concentration are shown. The prospects of block freezing technologies for obtaining concentrated pomegranate juice are grounded.

Ключевые слова: гранатовый сок, концентрирование сока, низкотемпературные методы концентрирования, технологии блочного вымораживания.

Key words: pomegranate juice, juice concentration, low-temperature methods of concentration, technologies of block freezing.

Введение. Представляется, что важным параметром, определяющим эффективность процесса блочного вымораживания, является форма кристаллизаторов и их компоновка в емкости концентратора.

Первые конструкции блочных вымораживателей использовали эффект «термического парадокса» и состояли из пучка стержневых испарителей [1], расположенных коридорным либо шахматным пучком (рис.1,а). В дальнейшем [2] была предложена оригинальная форма испарителей (рис.1,б), которые предназначались для более полного заполнения льдом емкости. В установках большой производительности использовались пластинчатые кристаллизаторы [3], которые оказались удобными и в монтаже, и при эксплуатации (рис.1,в). Однако во всех этих конструкциях объем балластной жидкости (а) в емкости оставался значительным. А это не позволяло серьезно повышать концентрацию раствора. Вообще, задача оптимизации компоновки аппарата блочного вымораживания серьезно не ставилась.

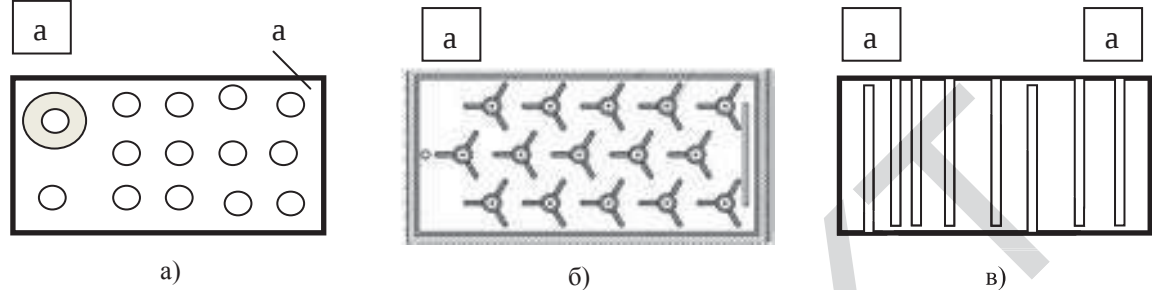


Рис. 1. Схемы компоновок испарителей

Общими при экспериментальном исследовании различных по конструктивному исполнению испарителей [1 - 3] оказались закономерности формирования блока льда и структуры раствора в процессе криоконцентрирования. Несмотря на то, что рост массы льда (M_l) во времени снижается и имеет вид выпуклой экспоненты (рис.2,а), характер роста концентрации раствора (X_p) во времени выглядит параболой (рис.2, б). При этом при приближении отношения объемов льда (V_l) и исходного раствора (V_p) к 1, скорость роста X_l стремительно повышается. Этот факт был отмечен авторами [3] и дал основание считать, что конструкция аппарата должна реализовывать такие возможности.

На основе проведенного анализа в данной работе выдвигается научное положение: «При использовании плоско - параллельных кристаллизаторов рациональное соотношение шага между кристаллизаторами, компоновка аппарата (расстояния от торцов кристаллизатора до стенок емкости и дна), могут обеспечить максимальную степень концентрирования раствора при снижении термического сопротивления системы поверхность кристаллизатора - раствор за счет организации направленной кристаллизации, которая проходит при росте площади поверхности раздела фаз».

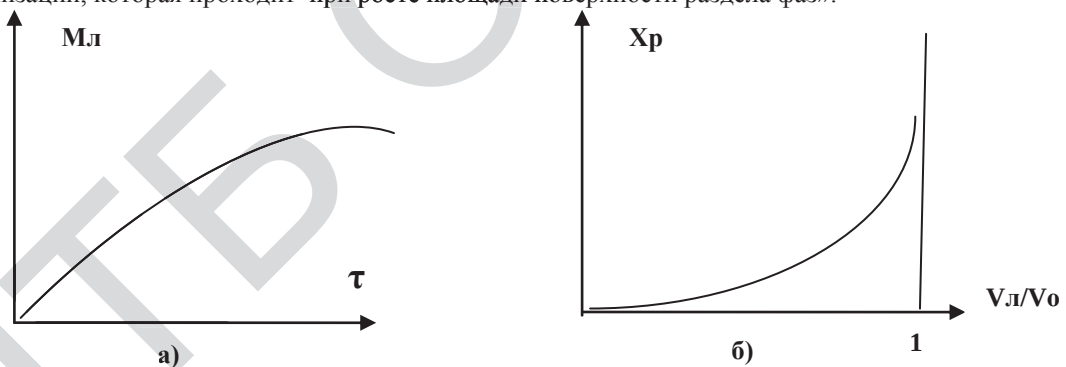


Рис.2. Типичные картины кинетики: формирования массы льда (а) и изменения концентрации раствора (б)

Естественно, необходимым условием реализации выдвинутой гипотезы является согласование конструктивных параметров испарителей и концентраторов с режимными характеристиками процесса.

Вторая идея научного положения связана с предложением организовать процесс кристаллизации льда с нарастанием внешней поверхности блока льда. Это приведет к росту поверхности фазового контакта и будет способствовать реализации эффекта «термического парадокса», суть которого для стержневых кристаллизаторов изложена авторами [1, 3].

Результаты исследований. В настоящей работе впервые предлагается использовать идею «термического парадокса» для пластинчатых кристаллизаторов. Иллюстрация этого положения дана на рис.3. Показано, что работает не только фронтальные поверхности кристаллизатора, но и торцевые. При этом, аппарат проектируется так, чтобы расстояния от боковых торцов до стенок емкости кристаллизатора, и от нижнего торца до дна емкости равнялись конечному значению толщины блока льда (δ). Тогда (рис.3) высота блока льда станет $(L + \delta)$, а ширина – $2(B + \delta)$. А в прежних конструкциях она рассматривалась равной высоте кристаллизатора (L).

Таким образом, предлагаемое решение сохраняет достоинства пластинчатых испарителей (их технологичность и высокая производительность) и использует эффект «термического парадокса». Проведем анализ термических сопротивлений по схеме (рис.4). Та часть объема льда, которая растет на фронтальной поверхности испарителя, имеет традиционные недостатки: с повышением толщины слоя его термическое сопротивление (R_l) растет. Однако организуется кристаллизация и на торцевых поверхностях испарителя, формируется дополнительный объем льда, который характеризуется ростом внешней поверхности. А это – предпосылки к снижению термического сопротивления конвективного теплообмена (R_k) и термического сопротивления твердой фазы (R_l). В результате появляется возможность достижения максимальной степени концентрирования раствора, снижения времени процесса и энергетических затрат при сохранении большой производительности аппарата.

Рассмотрим методы аналитического моделирования кинетических зависимостей блочного вымораживателя.

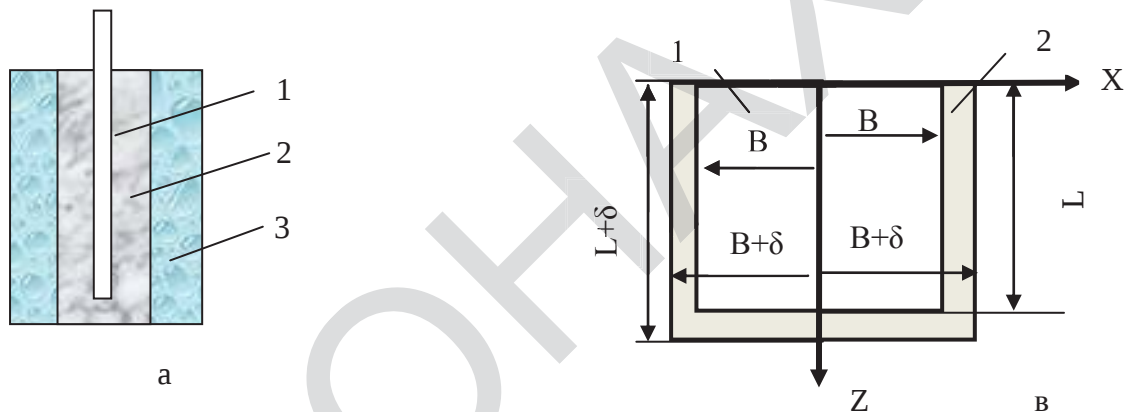


Рис. 3. Постановка задачи моделирования: а – физическая модель; в – геометрическая модель (1 – поверхность испарителя, 2 – поверхность льда).

Теплофизическая модель предлагаемого решения приведена на рис.4.

Особенности сырья определяют: теплоемкость (c_s), плотность (ρ_s), теплопроводность (λ_s) и вязкость (ν_s). Исходной информацией является: масса загружаемого сока (G_c), его температура (t_n) и концентрация (X_c). Характер процесса вымораживания определяют: удельная теплота кристаллизации (Ω_v) и криоскопическая температура (t_{kr}) и толщина блока льда (δ_l).

Основные характеристики аппарата: толщина (b), высота (L), и половина ширины испарителя (B), шаг между ними (s) и их число (z), объем загружаемого продукта (V_n). Параметры холодильной системы ($ХС$): потребляемая электрическая мощность (N_e), температуры кипения (t_o) и конденсации (t_{kd}) и электрический холодильный коэффициент (η_e).

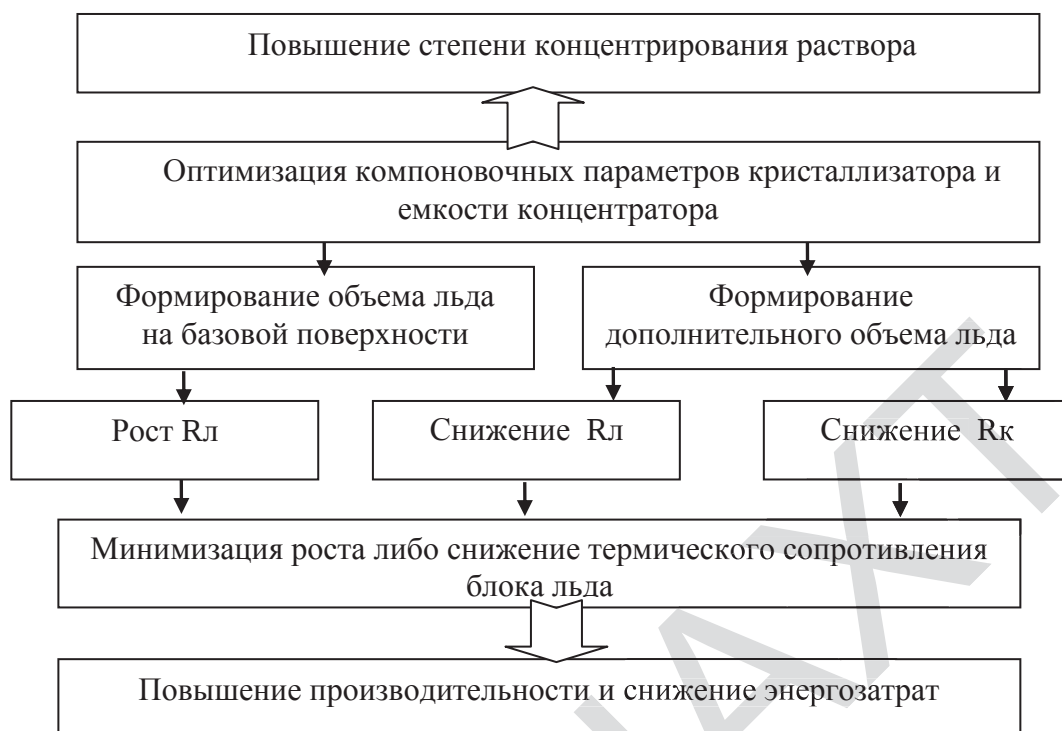


Рис.4. Теплофизическая модель предлагаемого блочного вымораживателя.

Параметрическая модель. Сводку всех ключевых факторов, определяющих гидродинамические, теплообменные и диффузионные взаимодействия в аппарате, включает параметрическая модель (рис.5).

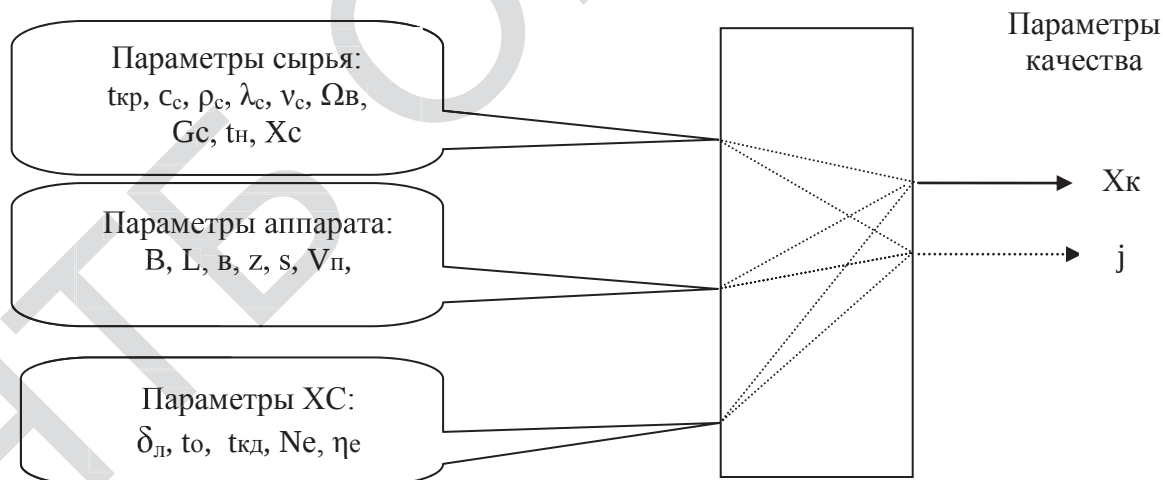


Рис.5. Параметрическая модель блочного вымораживателя

Параметрами качества считаем значение конечной концентрации сока (X_k) и удельные расходы энергии (j , Дж/кг готового продукта). Задача дальнейших исследований – установить взаимные связи между комплексами этих параметров.

Модель термического парадокса. Проведем анализ теплопередачи при работе инновационной установки блочного вымораживания. Суммарное значение термического сопротивления всей цепочки теплопередачи «раствор – поверхность блока льда – лед – контакт блока с испарителем – стенка

испарителя – кипение холодильного агента» определяется (рис.2.4) по последовательно – параллельной схеме. Можно исключить из анализа термические сопротивления контакта и процесса кипения, которые в процессе вымораживания остаются неизменными и имеют низкие значения. Суммарное термическое сопротивление (R_c) определяется последовательной цепочкой «блок льда (R_l) – конвекция от раствора к поверхности льда (R_k)». В самом блоке льда тепловые потоки проходят (рис.2.3) по параллельной схеме: через базовое сечение (R_b) и через дополнительное, постоянно растущее сечение (R_d).

$$R_c = R_b - R_d + R_k \quad (1)$$

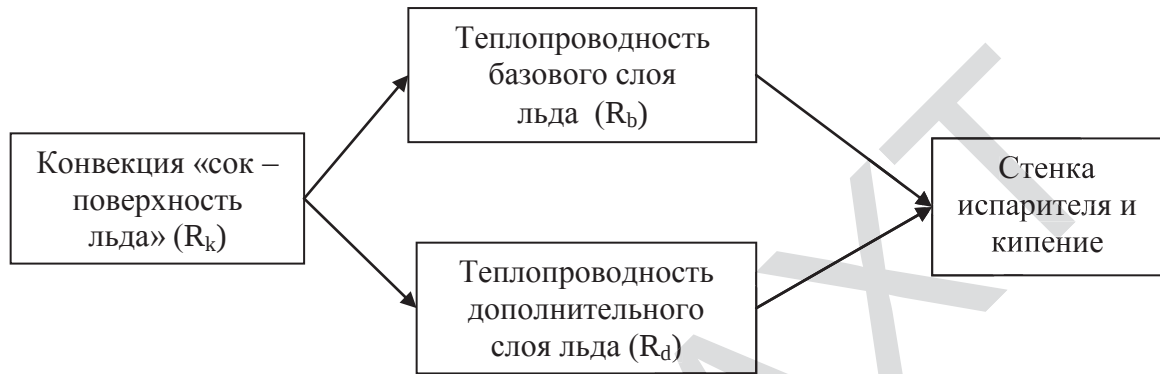


Рис.6. Схема теплопередачи

На основе (рис.6) соотношение (1) можно представить в виде:

$$R_c = \frac{\delta_l}{\lambda_l} \frac{1}{2LB} - \frac{\delta_l}{\lambda_l} \frac{1}{L\delta + 2(B+\delta)\delta} + \frac{1}{\alpha_k} \frac{1}{(L+\delta)2(B+\delta)} \quad (2)$$

Первое слагаемое (2.2) увеличивается с ростом толщины блока льда (δ), однако второе снижает термическое сопротивление блока, а третье – с ростом (δ) постоянно снижается (рис.7).

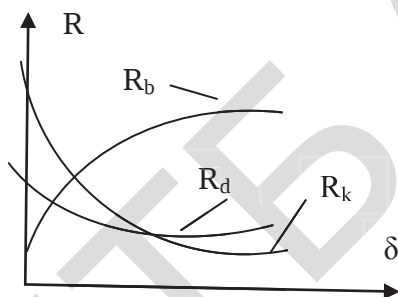
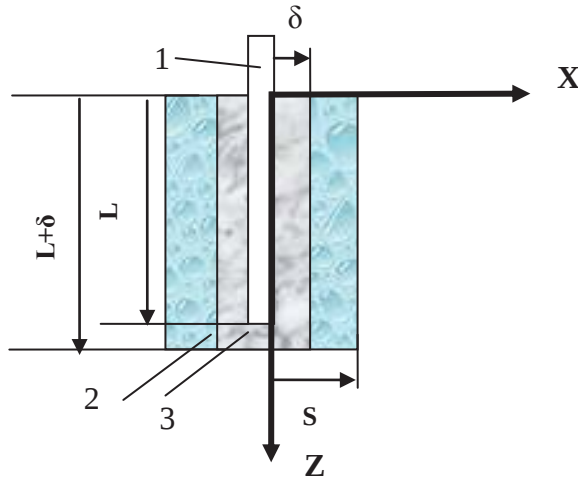


Рис.7. Зависимость R от δ

Количественные значения составляющих термических сопротивлений определяются конкретными размерами испарителя и толщины блока льда. Предварительные оценки показывают, что суммарный эффект ожидается до 20%. Представляется, что температура кипения холодильного агента и толщина блока льда могут использоваться для «сшивания» моделей – тепломассобменной и энергетической.

Кинетические модели процесса вымораживания. Общая модель процесса, изложенная в [1], справедлива для задачи, которая поставлена на рис.8.



- 4- плоский испаритель высотой L ,
толщиной b и шириной $2B$.
5- сок;
6- 3 – блок льда.
 S - зона действия испарителя;
 δ - толщина блока льда.

Площадь базовой поверхности: $F_b = 2BL$

Площадь дополнительной поверхности льда:

$$F_d = 2\delta L + Lb + 2\delta(B + \delta)$$

Рис.8 - Постановка задачи моделирования

Необходимым условием процесса направленной кристаллизации является организация теплопередачи по цепи «сок – блок льда – стенка испарителя (кристаллизатора) – холодильный агент». Процесс испарения в плоских испарителях подробно изучен в работах В.П. Мордынского [3]. Конструкция такого испарителя оптимизирована, эффективная организация процесса испарения позволяет пренебречь термическим сопротивлением процесса испарения, считать, что поверхность испарителя имеет одинаковую температуру. Поэтому, на схеме (рис.8) рассматривается цепочка теплопередачи «сок – блок льда – стенка испарителя».

При записи системы уравнений будем считать, что распределение температур есть только по одной координате - X . Запишем для осесимметричной задачи в декартовых координатах уравнения энергии, неразрывности, движения с соответствующими граничными условиями и уравнениями состояния.

Для стенки кристаллизатора уравнение Фурье – Кирхгофа:

$$\frac{\partial t_{CT}}{\partial \tau} = a_{CT} \left(\frac{\partial^2 t_{CT}}{\partial x^2} \right), \quad \tau > 0, \quad x_0 \leq x \leq x_1 \quad (3)$$

Условия однозначности включают начальные условия (4), граничные условия III рода (5) «стенка испарителя – холодильный агент», и IV рода (6 – «стенка испарителя - лед».

$$\text{при } \tau = 0, \quad t_{CT1} = t_{CT0} = t_x, \quad x_0 \leq x \leq x_1 \quad (4)$$

$$-\lambda_{CT} \left(\frac{\partial t_{CT}}{\partial x} \right) - \alpha_x (t_{CT} - t_0) = 0, \quad \text{при } x = x_0 \quad (5)$$

$$\lambda_{CT} \left(\frac{\partial t_{CT}}{\partial x} \right) + \lambda_L \left(\frac{\partial t_L}{\partial x} \right) = 0, \quad \text{при } x = x_1 \quad (6)$$

Для блока льда уравнение энергии (3), записывается при следующих условиях однозначности (8):

$$\frac{\partial t_L}{\partial \tau} = a_L \left(\frac{\partial^2 t_L}{\partial x^2} \right) \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \text{при } \tau > 0, \quad x = x_1 \quad t_L &= t_{CT1} \\ \text{при } \tau > 0, \quad x = \delta \quad t_L &= t_{ЛГ} \\ \text{при } \tau > 0, \quad x_1 \leq x \leq \delta \end{aligned} \quad (8)$$

В пределах объема продукта нестационарное температурное поле выражается в виде:

$$\frac{\partial t_{\Pi}}{\partial \tau} + \frac{\partial t_{\Pi}}{\partial x} w_x + \frac{\partial t_{\Pi}}{\partial y} w_y + \frac{\partial t_{\Pi}}{\partial z} w_z = a_L \left(\frac{\partial^2 t_{\Pi}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t_{\Pi}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t_{\Pi}}{\partial z^2} \right) \quad (9)$$

где компоненты скорости движения жидкости определяются уравнением Навье-Стокса:

$$\rho w \operatorname{grad} w = \rho g - \operatorname{grad} P + \mu \nabla^2 w \quad (10)$$

Условия однозначности для объема жидкости:

$$\begin{aligned} \text{при } \tau > 0, \quad x = \delta \quad t_{\Pi} = t_{\Pi\Gamma} \\ \text{при } \tau > 0, \quad x = S \quad t_{\Pi} = t_S \\ \text{при } \tau > 0, \quad x_1 \leq x \leq \delta \end{aligned} \quad (11)$$

$$\lambda_{\text{Л}} \left(\frac{\partial t_{\text{Л}}}{\partial x} \right) - \alpha_{\text{Л}} (t_{\text{Л}} - t_{\text{ЛГ}}) = q_{\text{КР}} \quad (12)$$

Энергетический баланс процесса кристаллизации:

$$c_{\text{РЛ}} \rho_{\text{Л}} \frac{d t_{\text{Л}}}{d \tau} = \lambda_{\text{Л}} \frac{d^2 t_{\text{Л}}}{d x^2} + \frac{d M_{\text{Л}}}{d \tau} \frac{1}{V} \Omega \quad (13)$$

а удельный тепловой поток, который необходим для охлаждения продукта:

$$c_{\text{РП}} \rho_{\text{П}} \frac{d t_{\text{П}}}{d \tau} = q(\tau) \quad (14)$$

Соотношение (2.17) получено при допущении, что тепловой поток от диссипации энергии движения жидкости у поверхности блока льда пренебрежимо мал (а это справедливо в условиях свободной конвекции), кристаллизуется один компонент – вода, а поток массы нормируется объемом блока. Предполагаем, что массовый поток определяется только уравнением Фика:

$$\frac{d^2 M_{\text{Л}}}{d \tau^2} = \beta [C_{\text{КР}}(t_{\text{ЛГ}}) - C_{\text{П}}] \frac{\rho_{\text{Л}}}{\rho_{\text{П}}} \frac{d F_{\text{ЛГ}}}{d \tau} \quad (15)$$

Условия однозначности для объема жидкости:

$$\begin{aligned} \text{при } \tau = 0, \quad C_{\text{П}} = C_{\text{ПН}} \\ \text{при } \tau > 0, \quad x = \delta \quad C_{\text{П}} = C_{\text{ПГ}} \\ \text{при } \tau > 0, \quad x = S \quad C_{\text{П}} = C_S \\ \text{при } \tau > 0, \quad \delta \leq x \leq S \end{aligned} \quad (16)$$

Одномерное нестационарное поле концентраций сухих веществ в блоке льда определяется уравнением диффузии:

$$\frac{\partial \bar{C}_{\text{Л}}}{\partial \tau} + \frac{\partial \bar{C}_{\text{Л}}}{\partial x} w_x = D_{\text{Л}} \left(\frac{\partial^2 \bar{C}_{\text{Л}}}{\partial x^2} \right) \quad (17)$$

Наружные поверхности стенок концентратора теплоизолированы, но влияние окружающей среды необходимо учитывать. Условия на границе со стенкой концентратора со стороны продукта:

$$\text{при } \tau > 0, \quad x = S \quad t_{\Pi} = t_S \quad (18)$$

$$-\lambda_{\text{СТК}} \left(\frac{\partial t_{\text{СТК}}}{\partial x} \right) + \alpha_{\text{СК}} (t_{\text{СТК}} - t_{\text{П}}) = 0 \quad (19)$$

Для стенки концентратора уравнение Фурье – Кирхгофа:

$$\frac{\partial t_{\text{СТК}}}{\partial \tau} = a_{\text{СТ}} \left(\frac{\partial^2 t_{\text{СТК}}}{\partial x^2} \right), \quad \tau > 0, \quad (20)$$

условия однозначности

$$\text{при } \tau = 0, \quad t_{\text{СТК1}} = t_{\text{СТК2}} = t_{\text{ОС}} \quad (21)$$

Для слоя тепловой изоляции:

$$\frac{\partial t_H}{\partial \tau} = a_H \left(\frac{\partial^2 t_H}{\partial x^2} \right), \tau > 0, \quad (22)$$

условия однозначности

$$\text{при } \tau = 0, \quad t_{H1} = t_{H2} = t_{OC}, \quad (23)$$

Влияние окружающей среды проходит при ГУ III рода:

$$\lambda_H \left(\frac{\partial t_H}{\partial x} \right) + \alpha_C (t_{OC} - t_H) = 0 \quad (24)$$

Теплопередача от слоя тепловой изоляции к наружной стенке концентратора проходит при ГУ IV рода:

$$\lambda_{CTK} \left(\frac{\partial t_{CTK}}{\partial x} \right) + \lambda_H \left(\frac{\partial t_H}{\partial x} \right) = 0 \quad (25)$$

Представленную модель необходимо дополнить уравнениями связи:

$$\lambda_{CT} = \lambda(t_{CT}); \lambda_L = \lambda(t_L); \lambda_P = \lambda(t_P, C_P); \quad (26)$$

$$a_P = a(t_P, C_P); a_{CT} = a(t_{CT}); a_L = a(t_L); \quad (27)$$

$$\rho_P = \rho(t_P, C_P); \rho_L = \rho(t_L); \mu_P = \mu(t_P, C_P); \quad (28)$$

$$D = D(t_P) \quad (29)$$

Полученная модель вымораживающего устройства (3) ... (29) представляет собой сложную систему нелинейных дифференциальных уравнений. Это нестационарная, сопряженная гидродинамическая, тепловая и массообменная задача, осложненная подвижной границей раздела «лед - продукт», неопределенностью возможных внешних силовых воздействий в соотношениях. Для замыкания системы требуются соотношения для расчета коэффициентов теплоотдачи и массоотдачи. Основные сложности численного моделирования связаны с решением проблем гидродинамической ситуации в объеме продукта.

Наиболее рациональным решением поставленной задачи в настоящее время является применение возможностей теории подобия. На первом этапе следует конкретизировать способ и параметры воздействия на процесс кристаллизации.

Отличия начинаются в конкретизации чисел Фурье и Био. Их необходимо модернизировать в соответствие с рис. 8. Тогда, известное соотношение должно учесть, что форма слоя – пластина. Поэтому $n = 0$ [4]. С учетом приведенных уточнений определяется безразмерное время вымораживания:

$$Fo = \frac{Ph}{2} \left(1 + \frac{2}{Bi_T} \right) \quad (30)$$

где Bi_T – тепловое число Био, смысл которого заключается в соотношении внутреннего термического сопротивления и внешнего. По сути, это отношение термических сопротивлений микро- и макрокинетики. Поскольку, форма блока льда отличается, то требуется корректировка и числа Био. Более того, следует учесть и фактор роста поверхности блока во времени, т.е. обосновать гипотезу «термического парадокса». Согласно (2) внутреннее термическое сопротивление состоит из 2 слагаемых.

$$R_L = \frac{\delta_L}{\lambda_L} \left[\frac{1}{2LB} - \frac{1}{L\delta + 2(B+\delta)\delta_L} \right] \quad (31)$$

Первое слагаемое постоянно растет из-за увеличения δ . А значение второго во времени снижает общую величину термического сопротивления блока льда.

Внешнее термическое сопротивление конвективного теплообмена «сок – поверхность блока льда» определяется коэффициентом теплоотдачи (α) и растущей наружной поверхностью блока льда.

$$R_K = \frac{1}{\alpha_K} \frac{1}{(L+\delta)2(B+\delta)} \quad (32)$$

Тогда, число Био для задачи (рис.8) запишется так:

$$Bi = \frac{R_k}{R_d} = \frac{\alpha_k}{\lambda_d} 2(L + \delta)(B + \delta) \left(\frac{\delta_d}{2LB} - \frac{\delta_d}{L\delta + 2(B + \delta)} \right) \quad (33)$$

Таким образом, могут быть определены задачи и методы экспериментального моделирования процессов вымораживания.

Выводы.

3. Перспективным путем разделения пищевых растворов являются принципы криоконцентрирования. В отличие от схем объемной кристаллизации, в аппаратах блочного вымораживания обеспечивается эффект направленной кристаллизации, что способствует формированию твердой фазы с плотной упаковкой кристаллов льда.

4. Конструкции аппаратов блочного вымораживания имеют резервы для совершенствования, повышения интенсивности массопереноса при кристаллизации, роста производительности и снижения энергоемкости. Разработана математическая модель кинетики и энергетики процесса кристаллизации в аппаратах вымораживания. На основе методов теории подобия нестационарная трехмерная модель направленной кристаллизации приведена к форме, удобной для инженерных расчетов.

Литература.

1. Бурдо О.Г. Холодильные технологии в системе АПК – Одесса: Полиграф, 2009 – 288с.
2. Бурдо О.Г., Милинчук С.И., Мордынский В.П., Харенко Д.А. Техника блочного вымораживания – Одесса: Полиграф, 2011 – 294с.
3. Гунько П.А. Исследование и разработка технологии извлечения белковых компонентов из творожной сыворотки низкотемпературными методами. /дис. к.т.н., 2014, Кемерово 2014 Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Кемеровский технологический институт пищевой промышленности» (ФГБОУ ВПО «КемТИПП»).
4. Мальцева О.М. Моделирование процесса намораживания льда на цилиндрической поверхности емкостного криоконцентратора // Техника и технология пищевых производств. 2016. Т. 42. № 3 с.118-123 / ФГБОУ ВО «Кемеровский технологический институт пищевой промышленности»
5. Овсянников В.Ю., Краминова Ю.С., Кириченко Т.С., Москаленко А.С. Методика определения оптимального температурного режима в кристаллизаторах-криоконцентраторах // Международный студенческий научный вестник. – 2016. – № 3-1. – С. 43-44; URL: <https://eduherald.ru/ru/article/view?id=14704> (дата обращения: 01.01.2017).
6. Бостынец Н.И., Овсянников В.Ю. Исследования и разработка установки для криоконцентрирования вишневого сока.

УДК66.047.55.086.2-035.2

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МИКРОВОЛНОВОЙ ЛЕНТОЧНОЙ СУШИЛКИ

Бурдо О.Г., Маренченко Е.И., Пилипенко Е.А., Балагура В.В.

MATHEMATICAL MODEL OF MICROWAVE BAND DRYER

Burdo O.G., Marenchenko E.I., Pilipenko E.A., Balagura V.V.

Abstract. The prospects of electromagnetic energy supply technologies for drying food products are shown. The scheme of belt dryer with infrared and microwave energy generators is considered. The hardware-processor circuit, the physical and parametric model of the dryer are presented. On the basis of the phenomenological approach, a mathematical model of the drying process in an electromagnetic field is compiled.

Аннотация. Показаны перспективы электромагнитных технологий подвода энергии при сушке пищевых продуктов. Рассмотрена схема ленточной сушилки с инфракрасными и микроволновыми генераторами энергии. Приведены аппаратурно-процессовая схема, физическая и параметрическая

Безбах И. В., Кепин Н. И.	
ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ ЭКСТРАКЦИИ, ИСПОЛЗУЮЩИХСЯ ДЛЯ ИЗВЛЕЧЕНИЯ БИОЛОГИЧЕСКИ-АКТИВНЫХ КОМПОНЕНТОВ ИЗ ПРИРОДНОГО СЫРЬЯ	
Недбайло А. Є.	285
КИНЕТИКА КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ВОДЫ В УЛЬТРАЗВУКОВОМ ПОЛЕ	
Тришин Ф. А., Терзиев С. Г., Орловская Ю. В.	289

МОДЕЛЮВАННЯ ЕНЕРГОТЕХНОЛОГІЙ

ВИКОРИСТАННЯ ТЕОРІЇ ПОДІБНОСТІ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ КОНВЕКТИВНО – ТЕРМОРАДІАЦІЙНОГО СУШІННЯ	
Малежик І. Ф., Бурлака Т. В., Дубковецький І. В., Деканський В. Є.	296
ІДЕНТИФІКАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ КОМІРЧАСТОЇ МОДЕЛІ ІЗ ЗВОРОТНИМИ ПОТОКАМИ В ВІБРОЕКСТРАКТОРАХ	
Мистюра Т. Г., Зав'ялов В. Л., Лобок О. П., Попова Н. В., Запорожець Ю. В.	302
МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ІННОВАЦІЙНИХ ЕНЕРГОТЕХНОЛОГІЙ УТИЛІЗАЦІЇ ПОЛІМЕРІВ	
Бухкало С. І.	309
ДОСВІД РОЗРОБКИ КОМП'ЮТЕРНО - ІНТЕГРОВАНОГО СТЕНДУ ДЛЯ СУПРОВОДУ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОЦЕСІВ ЗНЕВОДНЕННЯ В СЕРЕДОВИЩІ МІКРОХВИЛЬОВОГО-ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ	
Яровий І. І.	313
ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЕ ПУЗЫРЬКОВОГО КЛАСТЕРА В ПРОЦЕССАХ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ КАВИТАЦИИ	
Иваницкий Г. К.	319
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОВЫШЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ЭКСТРАКТА СТЕВИИ В МИКРОВОЛНОВОМ ВАУУМ-ВЫПАРНОМ АППАРАТЕ	
Бурдо О. Г., Ружицкая Н. В., Резниченко Т. А., Резниченко Д. Н.	322
МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ГОМОГЕНІЗАЦІЇ РОЗПЛАВУ КОМПОЗИЦІЇ ПОЛІЕТИЛЕН – КАУЧУК	
Гоцький Я. Г., Двойнос Я. Г.	327
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА НАПРАВЛЕННОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ	
Бурдо О. Г., Давар Ростами Пур	335
ОЦІНЮВАННЯ ЕНЕРГОЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ З КОГЕНЕРАЦІЙНО-ТЕПЛОНАСОСНИМИ УСТАНОВКАМИ ТА ПІКОВИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ТЕПЛОТИ	
Остапенко О. П.	331
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОБЕЗВОЖИВАНИЯ ТОРФА И БИОМАССЫ В ТЕХНОЛОГИЯХ ПРОИЗВОДСТВА БИОТОПЛИВ	
Снежкин Ю. Ф., Коринчук Д. Н.	337
ПОДХОДЫ К МОДЕЛИРОВАНИЮ ПРОЦЕССА ВЫМОРАЖИВАНИЯ БЛОКА ЛЬДА	
Тришин Ф. А., Трач А. Р.	343
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА НАПРАВЛЕННОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ	
Бурдо О. Г., Давар Ростами Пур, Масельская Я. А.	347
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МИКРОВОЛНОВОЙ ЛЕНТОЧНОЙ СУШИЛКИ	
Бурдо О. Г., Маренченко Е. И., Пилипенко Е. А., Балагура В. В.	355
АНАЛІЗ ОПОРІВ ПЕРЕНЕСЕННЯ РЕЧОВИНИ ЧЕРЕЗ МЕМБРАНУ ПРИ НАНОФІЛЬРАЦІЇ ТА ЗВОРОТНОМУ ОСМОСІ	
Гулієнко С. В.	364
МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ЕКСТРАГУВАННЯ В МІКРОХВИЛЬОВОМУ ПОЛІ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОТИТЕЧІЙНОГО ЕКСТРАКТОРА З ПІДВОДОМ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ЕНЕРГІЇ	
Левтринська Ю. О., Зиков А. В., Терзів С. Г.	367
К ВОПРОСУ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ КИПЕНИЯ КАПЕЛЬ ХЛАДАГЕНТА В ФИЛЬТРЕ ЭЖЕКТОРЕ	
Когут В. Е., Бушманов В., Хмельнюк М. Г.	374