

Добова потреба в енергії покривається на 17,83 %. Як бачимо, використання методів лінійного програмування (зокрема, симплекс методу) дає можливість розробляти фруктовозернові композиції з високими органолептичними показниками, низькою вартістю та калорійністю. При цьому досягається легкість варіювання складу компонентів суміші та швидкість розрахунку необхідного їх співвідношення.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Харчування людини [Текст] / Т.М. Димань, М.М. Барановський, М.С. Ківа та ін. // за ред. Т.М. Димань. – Біла Церква: РВІКВ БДАУ, 2005. – 302 с.
2. Бодров, В.И. Математические методы принятия решений [Текст] / В.И. Бодров, Т.Я. Лазарева, Ю.Ф. Мартемыанов // Учеб. пособие. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. тех. ун-та, 2004. – 124 с.
3. Норм фізіологічних потреб населення України в основних харчових речовинах та енергії [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://zakon.rada.gov.ua/go/z0834-99>  
УДК 664.012.3:005.584.1

**БУРДО О.Г., доктор техн. наук, професор,  
МОРДЫНСКИЙ В.П., канд. техн. наук, ассистент, ХАРЕНКО Д.А., аспирант**  
Одесская национальная академия пищевых технологий

## КОНЦЕНТРИРОВАНИЕ САХАРНЫХ РАСТВОРОВ В АППАРАТАХ БЛОЧНОГО ВЫМОРАЖИВАНИЯ

В работе рассмотрены проблемы моделирования сопряженных процессов гидродинамики и теплопереноса в аппаратах блочного вымораживания. Учитываются волновые процессы перемешивания при работе акустических высокочастотных генераторов. Результаты экспериментальных исследований обобщены на основе новых чисел подобия – волновых чисел Рейнольдса, Эйлера и Стантона. Дана схема минимизации энергетических затрат в установке блочного вымораживания.

**Ключевые слова:** блочное вымораживание, сахарный раствор, акустические интенсификаторы процесса кристаллизации.

The problems of associated hydrodynamics and heat-and-mass transfer processes modeling in block freezing apparatuses are considered in the paper. Wave processes of mixing under acoustic high-frequency generators action are taken into account. The results of experimental researches are summarized on basis of new similarity numbers – wave Reynolds, Euler, Stanton numbers. The scheme of energy expenditure minimization in block freezing apparatus is given

**Keywords:** sectional freezing, saccharine solution, acoustic enhancers of process of crystallization.

Диффузионные способы получения сока из свеклы являются основными в технологиях сахара. Свекольный экстракт представляет собой поликомпонентную систему, которую разделяют на две группы – сахар и несахар. К несахару относят большую группу растворимых белковых и пектиновых веществ и продуктов их распада, редуцирующий сахар, аминокислоты, амиды кислот, слабые азотистые основания, соли органических и неорганических кислот. В соке содержится 1...3г/л мезги. На практике очистка диффузионного сока проводится обработкой известью (процесс дефекации) и осаждением ее избытка диоксидом углерода (процесс сатурации). Считается, что такая технология отличается простотой технологических операций, относительно низкой стоимостью реагентов. Эффективность очистки достигает 40%, а сахароза при этом практически не разрушается. После отделения сатурационного осадка фильтрованием сок сульфитируют, нагревают и сгущают в выпарных аппаратах до содержания сухих веществ 63...65%. Полученный сироп сульфитируют, фильтруют и направляют на уваривание утфеля I кристаллизации.

Частичное удаление воды из сока можно осуществлять методом вымораживания. Ожидается, что энергетические затраты в технологии снизятся, а низкотемпературные процессы обезвоживания откроют новые возможности в повышении качества продукта. Очевидно, что составом свекольного сока возможно управлять на стадии процесса экстрагирования. Такие же механизмы управления массообменом возможны и в процессе кристаллизации при криоконцен-

трировании сахарного раствора. Звѣжаючи на те, що використання симплекс методу не потребує глибоких математичних знань і з практичною метою може бути опанований у найкоротші строки, його використання для розв'язування технологічних задач подібного плану виглядає не лише доцільним, але й необхідним.

Поступила 03.2012

трировании сахарного раствора.

**Комбинированные процессы при концентрировании сахарных растворов вымораживанием.** Исследование кинетики льдообразования из сахарных растворов проводилось на экспериментальном стенде [1], основными элементами которого являются холодильная машина и горизонтальный кристаллизатор. Раствор находится в емкости и с помощью механического устройства подвижного стола перемещается по вертикали. Температура в объеме раствора и на поверхности испарителя измеряется с помощью термпар. Горизонтальный кристаллизатор является испарителем холодильной машины, которая состоит из герметичного компрессора и воздушного конденсатора. В опытах измерялась температура раствора и поверхности кристаллизации ( $t_0$ ), объем раствора в емкости, параметры блока льда, концентрации раствора в емкости ( $c$ ). Результаты представлялись в графической форме в виде кинетических зависимостей роста блока льда и концентрации раствора при различных сочетаниях температуры на поверхности и начальных концентраций раствора. Итоговым результатом эксперимента считалась зависимость скорости вымораживания от сочетания исходных параметров. Типичный вид такой зависимости приведен на рис.1. Подробные результаты экспериментального моделирования представлены в [1].

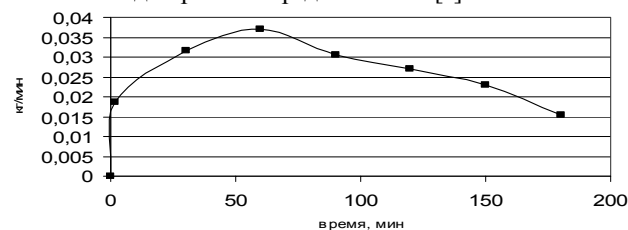


Рис.1. Изменение скорости вымораживания из сахарного раствора ( $c = 30\%$ ,  $t_0 = -20^\circ\text{C}$ )

С понижением температуры поверхности испарителя от  $-12^\circ\text{C}$  до  $-25^\circ\text{C}$  интенсивность вымораживания из 10 % раствора повышается практически вдвое. Однако при температуре  $-36^\circ\text{C}$  блок льда рос менее интенсивно [1]. Вероятно, что приближение к условиям криогидратной температуры эффективность разделения раствора при вымораживании снижалась, и эквивалентная теплопроводность блока льда уменьшалась. Такой же вывод был сделан и на основе анализа структуры блока льда.

Таблиця 1 число Грасгофа:

Степень интенсификации массопереноса

Обработка поверхности	Ультразвук	Электрическое поле	Закрутка потока	Вращение реактора	Вибрация
До 2 раз	В 2...3 раза	В 3...4 раза	В 6...8 раз	В 25...30 раз	В 30...35 раз

Опыты показали, что при согласовании уровня температур испарителя с концентрацией раствора можно поддерживать практически одинаковые скорости вымораживания. Рекомендуется вымораживание 10% сахарного раствора проводить при температуре испарителя -12 °С, 20 % - при -15 °С, а 30 % - при -20 °С.

Вместе с тем, опыты показали, что сахарный экстракт специфичен, и следует искать пути интенсификации процесса массопереноса при кристаллизации. В табл.1 приведена сводка, которую сформировали авторы [1], по эффективности различных методов интенсификации массопереноса в ряде технических задач. Технически целесообразным в аппаратах блочного вымораживания является метод акустического воздействия на объем раствора. Для понимания механизмов влияния акустических колебаний на процесс формирования блока льда на поверхности кристаллизации важно установить самостоятельные зависимости основных факторов, которые характеризуют работу излучателя. Таких факторов два: мощность излучения ( $P_a$ ) и частота колебаний ( $f$ ). Согласование этих параметров может способствовать эффективному воздействию на пограничный слой, снижать диффузионное сопротивление процессу кристаллизации. На первом этапе исследований использовался излучатель, мощность которого зависела от частоты. Влияние частоты акустических колебаний на изменение мощности пьезокерамического излучателя этой системы приведено в [2]. Опыты проводились в диапазоне частот от 0 до 50 кГц. Пик мощности приходился на частоты колебаний от 18 до 22 кГц [2]. В этом диапазоне обработка раствора акустическими полями будет соответствовать условиям наиболее интенсивных режимов воздействия ультразвука на процесс вымораживания.

Вместе с тем, интерес представляют акустические генераторы, мощность излучения которых стабильна во всем диапазоне частот.

**Математическая модель комбинированных процессов кристаллизации.** Методами теории подобия [3] получена структура модели в обобщенных числах подобия. Постановка задачи и подробные выкладки приведены в [4].

Влияние энергии, сообщаемой продукту излучателем, на кинетику процесса кристаллизации учтем на основе известного дифференциального уравнения Фурье – Кирхгофа [3]:

$$c_p \rho \frac{dt}{d\tau} = \lambda \nabla^2 t + \mu \Phi \quad (1)$$

где  $\Phi$  - диссипативная функция Рэлея [5].

Поскольку произведение теплоемкости, плотности, разности температур отнесенное ко времени есть удельная объемная мощность  $q_v$  (Вт/м<sup>3</sup>), выбрав в качестве определяющего параметра высоту продукта в аппарате ( $h$ ) получим безразмерное число Эйлера волнового:

$$Eu_B = \frac{q_v}{\mu f^2} \quad (2)$$

Конвективные процессы в аппарате характеризует

$$Gr = \frac{g \beta \Delta t h^3}{\nu^2} \quad (3)$$

а определяемое число подобия – модифицированное число Стантона волнового:

$$St_B = \frac{\beta}{df} \quad (4)$$

Приняв в качестве характерного размера системы диаметр излучателя получим модифицированное волновое число Рейнольдса:

$$Re_B = \frac{\rho d^2 f}{\mu} \quad (5)$$

Для условий постоянных значений мощности излучателя искомое уравнение в обобщенных переменных примет вид:  $St_B = A (Gr)^b (Re_B)^n (Se)^m$ . Определение констант A, b, n, m является задачей экспериментального моделирования.

**Экспериментальное моделирование процесса кристаллизации в поле акустических колебаний.** На первом этапе исследований проведена тарировка акустической системы. Интерес представляла зависимость мощности, которая вводилась в раствор от излучателей, от частоты колебаний. Искомая мощность определялась по двум методам. Измерялись показания электрических параметров, и рассчитывалась электрическая мощность ( $P_e$ ). Кроме того, проводилась оценка этой мощности методом калориметра. Для этого в сосуд Дьюара заливалась определенная масса воды, в объеме которой работал излучатель. Фиксировалось в опытах время и средняя температура воды. Для измерений температуры использовался образцовый термометр с ценой деления шкалы 0,1 °С. По уравнению теплового баланса рассчитывались значения потребленной водой тепловой мощности ( $Q$ ). Результаты тарировки приведены в табл.2.

Таблиця 2

Тарировка акустической системы

$f_s$ (кГц)	100	40	20	10	7
$I_s$ (мА)	50	40	30	23	17
$U_s$ (В)	5,8	7,5	10	12,5	14,3
$P_e$ (мВт)	290	300	300	287,5	243,1
$Q$ , Дж	84	105	105	105	105

Результаты тарировки системы позволяют сделать два вывода. Во-первых, мощность излучения системы практически одинакова в диапазоне частот 7...100 кГц. Во-вторых, значения  $P_e$  и  $Q$  хорошо согласуются.

Система акустической интенсификации прошла испытания на плоском горизонтальном испарителе. Пьезоизлучатель свободно перемещался и располагался на дне емкости и сбоку (вертикально на боковой стенке концентратора). В емкость заливалось 2 дм<sup>3</sup> сахарного раствора и регистрировалось время, когда выморозится 1,4 дм<sup>3</sup> раствора. Типичные результаты испытаний приведены на рис. 2–3.

Эффект от использования излучателя оказался положительным. Время вымораживания сокращалось на 5...15%. Наибольший эффект достигался при расположении излучателя на боковой поверхности концентратора (рис.2). С повышением концентрации раствора от 10% до 30% интенсивность вымораживания уменьшалась незначительно. Поэтому дальнейшие исследования проводились при расположении излучателя на боковой поверхности концентратора.

При обработке всего массива экспериментальных данных, полученных на плоском горизонтальном кристаллизаторе в диапазоне частот 7...100 кГц при различных зна-

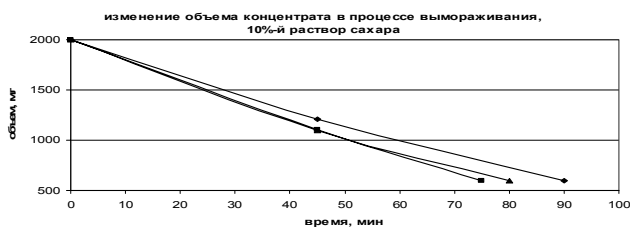


Рис. 2. Кинетика процесса вымораживания: 1 – без интенсификатора, 2 – излучатель на дне емкости, 3 – излучатель на боковой поверхности емкости

чениях начальной концентрации раствора (некоторые результаты которых приведены на рис. 2, 3) определены коэффициенты критериального уравнения:

$$St_A = 2,55 \cdot 10^{-5} \cdot Re_A^{-0,095} \cdot Sc^{0,33} \cdot Gr^{0,3} \quad (6)$$

Обработка экспериментальных данных, полученных на цилиндрическом кристаллизаторе в поле ультразвукового интенсификатора переменной мощности [2], одним уравнением не целесообразна, так как максимальная интенсивность льдообразования наблюдалась при частоте 18 кГц. Поэтому результаты опытов разбили на две группы в соответствии с диапазоном рабочих частот: 0-18 кГц и 18-100 кГц. В диапазоне частот 0-18 кГц критериальное уравнение имеет вид:

$$St_A = 5,5 \cdot 10^{-11} \cdot Re_A^{-0,92} \cdot Sn^{0,33} \cdot Gr^2, \quad (7)$$

а в диапазоне частот 18 - 100 кГц

$$St_A = 1,15 \cdot 10^{-8} \cdot Re_A^{-1,06} \cdot Sc^{0,33} \cdot Gr^{1,6} \quad (8)$$

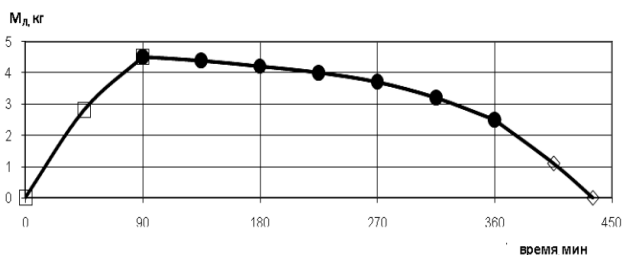


Рис. 4. Изменение массы блока льда

**Оптимизация режимов работы холодильной системы и криоконцентратора с ультразвуковым интенсификатором.** Вопросы оптимизации установок блочного вымораживания без элементов интенсификации рассмотрены в [1, 4]. В качестве параметра оптимизации здесь исследовалась температура поверхности кристаллизации, а целевой функцией принималась величина удельных энергетических затрат. В установках с пульсационными элементами интенсификации процедура оптимизации должна учитывать вклад энергии диссипации, который характеризует число Эйлера пульсационное (2). Существует научное противоречие, суть которого в том, что при воздействии ультразвуком на пограничный слой и снижении его диффузионного сопротивления, одновременно повышается энергетическая нагрузка на холодильную систему. Очевидно, что существует мера предельной целесообразности мощности генератора колебаний. Логично, что таким параметром может быть критическое число Рейнольдса волнового ( $Re_{Вкр}$ ). Тогда схема минимизации энергетических затрат будет включать: расчет

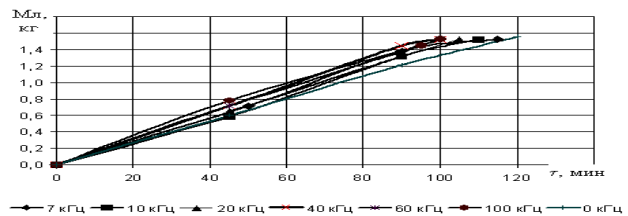


Рис. 3. Кинетика льдообразования с ультразвуковым интенсификатором при концентрации сахарного раствора  $c = 30\%$

значения критического числа Рейнольдса, определение рациональной частоты работы и удельной мощности генератора колебаний; времени, которое необходимо для решения технологической задачи; уровня затрат энергии холодильной машины за время цикла. В результате рассчитываются суммарные затраты энергии в системе при разных анализируемых вариантах. Более сложные задачи по оптимизации режимов работы возникают в конструкциях непрерывного вымораживания. Так, в установке с 5 аппаратами предусмотрено 5 циклов работы (рис.4). В первом цикле (0...90 мин) происходит формирование блока льда, во 2 - 4 (90...360 мин) осуществляется сепарирование блока и в последнем цикле лед плавится.

Соответственно изменяются и концентрации (рис.5). В 1 цикле повышается концентрация раствора, во 2...4 – снижается концентрация стоков. Самая низкая концентрация в 5 цикле, в расплаве льда (рис.5).

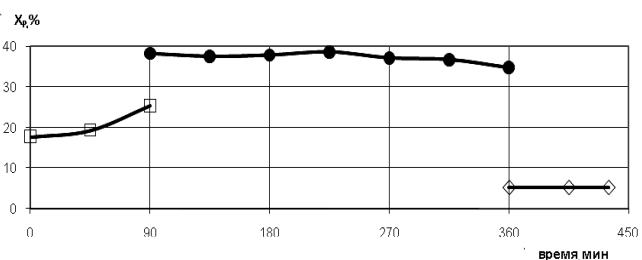


Рис. 5. Изменение концентрации растворов

В установках непрерывного действия следует согласовывать ряд режимных параметров. Это температуры и время кристаллизации, сепарирования и плавления. Факторами оптимизации являются, также, конструкция аппаратов и их число в установке.

Использование методов блочного вымораживания целесообразно в технологиях сахарного производства. Специфика сахарного диффузионного сока требует отработки специальных средств для эффективного воздействия на пограничный слой при формировании блока льда. Технически целесообразными являются ультразвуковые интенсификаторы. В условиях комбинированных процессов кристаллизации в ультразвуковом поле кинетика массопереноса моделируется зависимостью числа Стантона волнового от традиционных чисел Шмидта и Грасгофа и оригинального числа Рейнольдса волнового. Это число ответственно за гидродинамическую ситуацию в аппарате в условиях волновых процессов воздействия на диффузионный пограничный слой.

Поступила 02.2012

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бурдо, О.Г. Техника блочного вымораживания [Текст] / О.Г. Бурдо, С.И. Милинчук, В.П. Морлынский, Д.А. Харенко – Одесса: Полиграф, 2011. – 294с.
2. Burdo, O.G. Intensification of processes of low-temperature separation of food solutions [Текст] / O.G. Burdo, E.A. Kovalenko, D.A. Kharenko // Applied Thermal Engineering, №28 - 2008. - pp.311-316.
3. Бурдо, О.Г. Прикладное моделирование процессов переноса в технологических системах [Текст] / О.Г. Бурдо, Л.Г. Калинин // Учебник. – Одесса: Друж, 2008. – 348с.
4. Бурдо, О.Г. Холодильные технологии в системе АПК [Текст] – Одесса: Полиграф, 2009. – 288с.
5. Лыков, А.В. Теплообмен (Справочник) [Текст] – М.: «Энергия», 1971. – 560с.