УДК 621.565.92

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАМОРАЖИВАНИЯ ЛЬДА НА ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ ЕМКОСТНОГО КРИОКОНЦЕНТРАТОРА

О.М. Мальцева

ФГБОУ ВО «Кемеровский технологический институт пищевой промышленности (университет)», 650056, Россия, г. Кемерово, б-р Строителей, 47

e-mail: vm2@kemtipp.ru

Дата поступления в редакцию: 18.06.2016
Дата принятия в печать: 20.07.2016

Разделительное вымораживание (криоконцентрирование) широко применяется при концентрировании жидких продуктов, в том числе при переработке молока и вторичного молочного сырья. Криоконцентрирование позволяет получать концентраты высокого качества. В работе были исследованы процессы разделительного вымораживания обезжиренного молока. Лабораторный емкостный криоконцентратор позволяет производить одновременно разделительное вымораживание обезжиренного молока в одном цилиндре и плавление вымороженной фракции в другом. Плавление водной фракции в одном цилиндре осуществляется за счет теплоты, отводимой от намораживаемого льда в другом цилиндре. Температура теплообменной поверхности емкости, в которой происходит разделительное вымораживание, поддерживается стабильной в диапазоне от минус 2 до минус 8 °С с точностью ±0,2 °С. Лед на теплообменной поверхности емкостного криоконцентратора намерзает в виде полого цилиндра, толщина стенки которого зависит от температуры теплообменной поверхности и продолжительности процесса разделительного вымораживания. Моделирование технологических процессов является важным этапом технологического проектирования пищевых производств. Математическое моделирование позволяет снизить материальные и временные затраты при проектировании технологических процессов и найти наиболее эффективные технологические решения. На основании классических уравнений тепломассопереноса была разработана математическая модель кристаллизации водной фракции обезжиренного молока на цилиндрической поверхности емкостного криоконцентратора. Исходными данными для нахождения зависимости толщины слоя вымороженного на цилиндрической поверхности льда от продолжительности процесса являются: температура поверхности криоконцентратора и криоскопическая температура концентрируемого продукта, а также геометрические параметры криоконцентратора. Полученные расчетные зависимости были сопоставлены с экспериментальными данными. Установлено соответствие расчетной модели разделительного вымораживания обезжиренного молока на цилиндрической поверхности реальному процессу разделительного вымораживания.

Обезжиренное молоко, криоконцентратор, разделительное вымораживание, математическое моделирование

Введение

Современное развитие пищевой промышленности как одной из наиболее важных и динамично развивающихся отраслей народного хозяйства, призванной работать для всестороннего удовлетворения потребностей населения, происходит с учетом последних достижений научно-технического прогресса. Это в полной мере относится и к молочной промышленности. Молоко является превосходным источником большинства витаминов и минералов, необходимых для нормального роста и развития организма, поэтому его относят к основным пищевым продуктам. Однако при хранении молока, его транспортировке и предварительной обработке могут происходить структурные изменения основных компонентов – белков и жира, а также могут изменяться его физико-химические, технологические и органолептические показатели. Очевидно, что решение вопросов по сохранению молочного сырья и готовых молочных продуктов в должном качестве для потребителей является одним из основных направлений в научных исследованиях.

Установлено, что изменение содержания свободной воды в молоке и молочном сырье оказывает существенное влияние на активность и состав микрофлоры, а также ограничивает разрушительное действие ферментов и микроорганизмов на молочные продукты. Современные технологические и технические методы обезвоживания позволяют решить проблему сохранения должного качества молочных продуктов на достаточно длительный срок [1].

В настоящее время используют все известные на сегодняшний день способы удаления воды: в виде пара (выпаривание), в жидком виде (молекулярная фильтрация), а также в замороженном виде (криоконцентрирование). При этом обязательно учитывается, что при любом выбранном способе концентрирования молочных продуктов сгущение должно происходить без необратимых изменений свойств и состава исходного сырья.

Исследования способов концентрирования жидких продуктов, используемых в зарубежной и отечественной практике, показывают, что метод криоконцентрирования (концентрирования вымораживанием) является одним из наиболее эффективных технологических процессов, основным преимуществом которого является низкотемпературная обработка продуктов, обеспечивающая максимально полное сохранение их исходных свойств, ценных

термолабильных компонентов (витаминов, белков, углеводов), а также ароматических и вкусовых соединений [2].

В настоящее время наиболее широкое распространение получило концентрирование вымораживанием в два этапа. На первом этапе – кристаллизации получают суспензию, которая содержала бы пригодные для сепарирования крупные, примерно равные по размеру кристаллы льда с относительно малой удельной поверхностью. При кристаллизации происходит образование зародышей кристаллов и увеличение их размера. На втором этапе – сепарировании происходит механическое разделение кристаллов от остального раствора. Второй этап является значительно более сложным процессом по сравнению с кристаллизацией на первом этапе.

Получение суспензии кристаллов льда в концентрате – термодинамически достаточно эффективный процесс. Однако последующее механическое разделение требует сложного аппаратурного оформления и дополнительных энергетических затрат, к тому же из-за явления смачивания на поверхности кристаллов удерживается большое количество жидкого концентрата даже после отделения кристаллов от раствора. Это явление сопровождается значительными потерями растворенных веществ и уменьшением эффективности процесса разделения.

Намораживание массива льда на теплообменной поверхности в емкостных кристаллизаторах значительно увеличивает продолжительность первой стадии – кристаллизации, однако позволяет исключить стадию сепарирования, и за счет значительно меньшей площади контакта твердой и жидкой фаз продуктов разделения значительно уменьшаются потери растворенных веществ. Соответственно повышается эффективность процесса разделения [3].

В настоящее время моделирование технологических процессов является важным, а часто и необходимым этапом технологического проектирования пищевых производств, который позволяет значительно снизить материальные и временные затраты при проектировании технологий, а также позволяет найти наиболее эффективные технологические решения, позволяющие повысить эффективность производства в целом.

Моделирование процесса кристаллизации льда на теплообменной поверхности емкостного кристаллизатора позволяет значительно упростить проектирование технологий разделительного вымораживания молока, подобрать температурные режимы разделительного вымораживания, определить конечную толщину льда, позволяющую производить разделительное вымораживание с наименьшими энергетическими затратами [4, 5].

Объекты и методы исследований

Экспериментальные исследования проводились на базе НОЦ «Холодильная, криогенная техника и технологии» ФГБОУ ВО «КемТИПП (университет)».

Для проведения экспериментальных исследований использовалось молоко производства ООО «Анжерское молоко» (Кемеровская область). Перед началом криоконцентрирования исходное молоко предварительно охлаждалось до 3,5 °С.

Концентрирование молока осуществлялось в двухцилиндровой разделительной вымораживающей установке с емкостью цилиндров 3,5 л. Схема и общий вид установки для разделительного вымораживания представлены на рис. 1 [6].

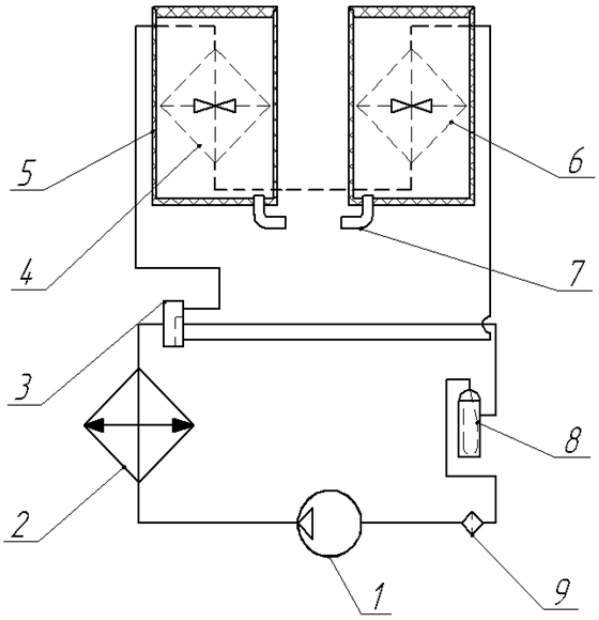

Рис. 1. Схема и общий вид двухцилиндровой разделительной вымораживающей установки с емкостью цилиндров 3,5 л: 1 – компрессор; 2 – предконденсатор; 3 – четырехходовый клапан; 4 – испаритель-концентратор (в отключенном состоянии клапана 3 выполняет роль конденсатора); 5 – цилиндрическая теплоизоляционная емкость; 6 – испаритель-концентратор (в отключенном состоянии клапана 3 выполняет роль испарителя); 7 – сливной трубопровод; 8 – отделитель жидкости; 9 – фильтр-осушитель

При разделительном вымораживании обезжиренного молока в вымораживающей установке вода вымерзает на цилиндрической стенке испарителя-концентратора 4 или 5. После достижения заданной толщины льда на теплообменной поверхности емкости, выполняющей роль испарителя, производится удаление молочного концентрата через сливной патрубок 7. Затем происходит переключение четырехходового клапана 3. Емкости, которые выполняли роль испарителя и конденсатора, меняются местами, в теплообменник, в емкости которого происходило намораживание льда, подается хладагент после предконденсатора 2. За счет теплоты конденсации происходит плавление намороженного льда, а емкость, которая до этого выполняла роль конденсатора, заполняется молоком для разделительного вымораживания. Таким образом, плавление намороженного в предыдущем цикле льда производится за счет теплоты, отводимой от намораживаемого льда в текущем цикле.

Температура теплообменной поверхности емкости, в которой происходит разделительное вымораживание, поддерживается стабильной в диапазоне от минус 2 до минус 8 °С с точностью ±0,2 °С.

Лед на теплообменной поверхности намерзает в виде полого цилиндра, толщина стенки которого зависит от температуры теплообменной поверхности и продолжительности процесса низкотемпературной обработки [7, 8].

На рис. 2 схематично изображена вымерзшая фракция, которая образуется на стенках цилиндрической емкости криоконцентратора.

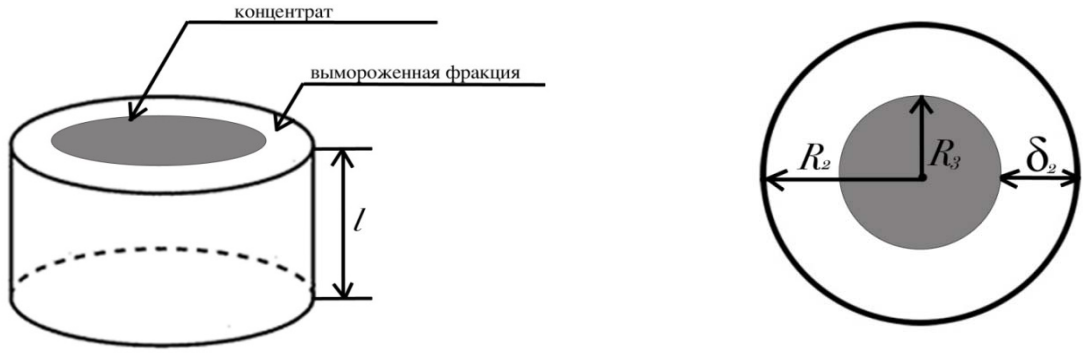

Рис. 2. Схематичное изображение слоя вымороженной фракции в цилиндрическом емкостном криоконцентраторе:
l – высота полого цилиндра вымороженной фракции; R_2 – внешний радиус цилиндрического слоя вымороженной фракции;
R_3 – внутренний радиус цилиндрического слоя вымороженной фракции;
δ_2 – толщина слоя вымороженной фракции обезжиренного молока

Результаты и их обсуждение

Основой расчета является предположение о том, что вся теплота, отводимая от молока, вследствие разности температур между вымораживаемым продуктом и хладагентом, кипящим в испарителе, идет на льдообразование водной фракции на теплообменной поверхности криоконцентратора. Весь процесс кристаллизации разбит на равные временные интервалы – единичные интервалы времени. В течение единичного временного интервала льдообразование условно не происходит. Определяется количество теплоты, которое будет отведено от молока в течение единичного интервала времени при заданной разности температур между продуктом и теплообменной поверхностью кристаллизатора и образовавшегося до начала временного интервала слоя льда. В соответствии с количеством теплоты, отведенной от вымораживаемого молока, определяется количество образующейся ледяной фракции на теплообменной поверхности. По окончании временного интервала к слою вымерзшей фракции добавляется лед, образовавшийся за единичный интервал времени.

Использование классических уравнений тепломассопереноса позволяет рассчитать процесс намораживания льда на цилиндрической поверхности криоконцентратора [9].

На рис. 3 схематично показан процесс льдообразования при разделительном вымораживании молока на внутренней поверхности криоконцентратора цилиндрического типа.

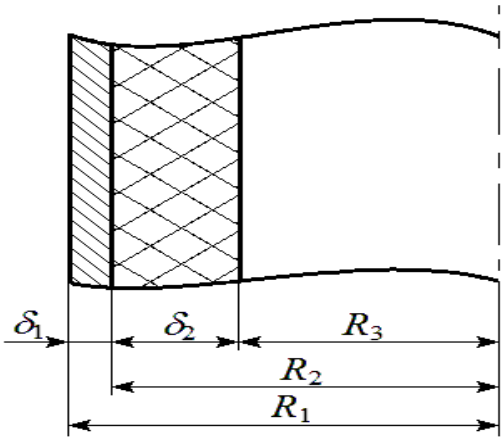

Рис. 3. Схематичное изображение слоя вымороженной фракции при разделительном вымораживании в цилиндрическом емкостном криоконцентраторе

На схеме обозначены: δ_1 – толщина стенки (нержавеющая сталь) ≈ 0,5 мм; δ_2 – толщина вымороженной фракции в текущий момент времени τ. В начальный момент времени при $\tau = 0$ имеем толщину вымороженной фракции $\delta_2 = 0$.

Тепловой поток через цилиндрическую стенку криоконцентратора определялся по формуле

$$Q = \frac{2\pi l(t_3 - t_1)}{\frac{1}{\lambda_1}\ln\frac{R_1}{R_2} + \frac{1}{\lambda_2}\ln\frac{R_2}{R_3}} = \frac{2\pi l(t_3 - t_1)}{\frac{1}{\lambda_1}\ln\frac{R_1}{R_2} + \frac{1}{\lambda_2}\ln\frac{R_3 + \delta_2}{R_3}}, \quad (1)$$

где l – высота цилиндра (до уровня молока); t_1; t_3 – температура на радиусах R_1 и R_3; λ_1; λ_2 – коэффициенты теплопроводности соответственно нержавеющей стали и льда.

Удельный тепловой поток q рассчитывается как отношение теплового потока к площади цилиндрической поверхности криоконцентратора:

$$q = Q/F_3, \qquad (2)$$

где

$$F_3 = 2\pi R_3 l \qquad (3)$$

– площадь боковой поверхности цилиндра на радиусе R_3.

Удельный тепловой поток через стенку радиусом R_3 с учетом выражений (1-3) рассчитывается по формуле

$$q = \frac{t_3 - t_1}{\left(\frac{1}{\lambda_1}\ln\frac{R_1}{R_2} + \frac{1}{\lambda_2}\ln\frac{R_3+\delta_2}{R_3}\right)R_3}. \qquad (4)$$

Обозначим ΔR – изменение радиуса за единичный интервал времени $\Delta\tau$. Рассчитаем количество теплоты, идущей на образование льда.

Объем льда, образующийся в единичный интервал времени $\Delta\tau$:

$$V = \pi l \Delta R(2R_3 - \Delta R). \qquad (5)$$

Масса образующегося льда:

$$m = \pi l \Delta R(2R_3 - \Delta R)\rho, \qquad (6)$$

где ρ – плотность водного льда.

Количество теплоты, идущей на образование льда:

$$Q = \frac{r_{пл}\pi l \Delta R(2R - \Delta R)\rho}{\Delta\tau}, \qquad (7)$$

где $r_{пл}$ – удельная теплота кристаллизации воды.

Удельный тепловой поток от кристаллизации льда через поверхность R_3:

$$q = \frac{r_{пл}\Delta R(2R_3 - \Delta R)\rho}{2R_3\Delta\tau}. \qquad (8)$$

Таким образом, со стороны испарителя от раствора через двухслойную (сталь и лед) цилиндрическую стену отводится удельный тепловой поток, рассчитываемый по формуле (4). С другой стороны, кристаллизующийся лед выделяет теплоту, рассчитываемую по формуле (8). Из полученной системы из двух уравнений в каждом следующем друг за другом единичном интервале времени $\Delta\tau$ однозначно определяется ΔR, которое прибавляется к R_3 по истечении каждого единичного интервала времени $\Delta\tau$.

Задавшись реальными геометрическими параметрами криоконцентратора, а также температурой теплообменной поверхности t_1 = –4 °С и криоскопической температурой t_3 = –0,55 °С, был произведен расчет процесса намораживания льда на цилиндрической поверхности при различных величинах единичного интервала времени $\Delta\tau$. Результаты расчета представлены на рис. 4.

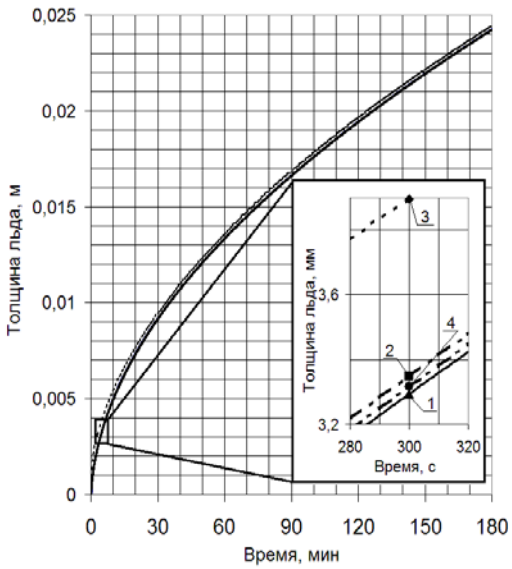

Рис. 4. Графическая зависимость толщины слоя льда на цилиндрической поверхности криоконцентратора от продолжительности намораживания: 1 – $\Delta\tau$ = 1 с; 2 – $\Delta\tau$ = 10 с; 3 – $\Delta\tau$= 1 мин; 4 – $\Delta\tau$ = 10 с (усредненное значение теплового потока в единичном временном интервале)

Рассчитывали толщину слоя льда на цилиндрической поверхности в процессе намораживания в течение 3 ч.

На рис. 4 представлены четыре кривые. Кривая 1 получена при значении единичного интервала времени $\Delta\tau$ = 1 с, кривая 2 при $\Delta\tau$ = 10 с, кривая 3 при $\Delta\tau$ = 1 мин. Поскольку кривые практически сливаются в одну, при значении времени τ = 5 мин приведен увеличенный фрагмент графика. Видно, что толщина льда, приведенная на графике 1 и 2, отличается очень незначительно, отличие около 0,06 мм. Расчет с единичным интервалом времени $\Delta\tau$ = 1 мин (график 3) дает уже существенное отличие (около 0,63 мм) от толщины льда, рассчитанной с использованием единичного интервала времени $\Delta\tau$ = 1 с (график 1).

При расчете толщины льда в процессе разделительного вымораживания для получения кривых 1–3 (рис. 4) предполагалось, что значение теплового потока от теплообменной поверхности к продукту не меняется в течение единичного интервала времени и равняется тепловому потоку в начале единичного интервала времени. Кривая 4 (рис. 4) представляет результаты расчета со средним значением теплового потока в начале и в конце единичного интервала времени, величина которого принята $\Delta\tau$ = 10 с. Таким образом, для расчета толщины слоя льда в зависимости от времени разделительного вымораживания достаточно использовать единичный временной интервал $\Delta\tau$ = 10 с и усреднение теплового потока в начале и в конце временного интервала.

Для проверки адекватности предложенной модели расчета толщины слоя льда в процессе разделительного вымораживания производилось сравнение расчетных величин с данными натурного эксперимента разделительного вымораживания в криоконцентраторе, схема которого представлена

на рис. 1 и дано описание в работах [3, 4, 5]. Расчетные данные и экспериментальные значения в графическом виде представлены на рис. 5.

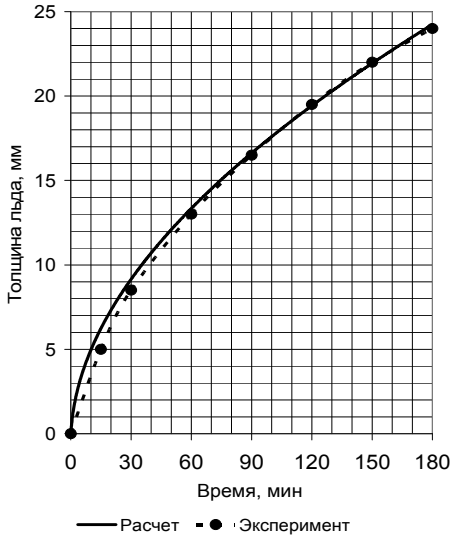

Рис. 5. Графическая зависимость толщины слоя льда на цилиндрической поверхности криоконцентратора от продолжительности намораживания

Рассмотрев систему двух случайных величин (X, Y), где X – значения толщины вымороженной фракции, полученные экспериментальным путем в течение заданных промежутков времени, Y – расчетные значения толщины льда, полученные из уравнения (4) и (8), рассчитали значение коэффициента корреляции r_{XY}. Полученное значение коэффициента корреляции составило r_{XY} = 0,99886, что говорит о тесной прямой связи между экспериментальными и расчетными величинами.

Рассматривая в качестве случайной величины Z разность между экспериментальными и расчетными значениями, получили, что все экспериментальные значения попадают в интервал отклонения от среднего значения на величину среднего квадратического отклонения. Следовательно, с доверительной вероятностью не менее 0,95 можно ожидать попадание значений случайных величин в интервал ($M_Z-\sigma$, $M_Z+\sigma$).

Таким образом, предлагаемая расчетная модель разделительного вымораживания обезжиренного молока на цилиндрической поверхности адекватно описывает реальный процесс разделительного вымораживания.

Список литературы

1. Пап, Л. Концентрирование вымораживанием: пер. с венг. / Л. Пап; под ред. О.Г. Комякова. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1982. – 96 с.

2. Короткий, И.А. Технологии криоконцентрирования в пищевой промышленности / И.А. Короткий, Д.Е. Федоров, О.М. Мальцева // Сборник научных трудов SWorld. Материалы международной научно-практической конференции «Перспективные инновации в науке, образовании, производстве и транспорте ‘2012». – Вып. 2. – Т. 1. – Одесса: КУПРИЕНКО, 2012. – ЦИТ: 212-520. – С. 13–15.

3. Короткий, И.А. Исследование процессов очистки воды разделительным вымораживанием / И.А. Короткий, Е.В. Короткая, А.В. Учайкин // Техника и технология пищевых производств. – 2015. – Т. 38. – № 3. – С. 89–94.

4. Короткий, И.А. Исследование работы емкостного кристаллизатора для разделительного вымораживания жидких пищевых продуктов / И.А. Короткий, Д.Е. Федоров, Н.А. Тризно // Техника и технология пищевых производств. – 2012. – № 4. – С. 120–125.

5. Короткая, Е.В. Очистка воды вымораживанием в емкостном кристаллизаторе / Е.В. Короткая, И.А. Короткий, А.В. Учайкин // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. – 2015. – № 6. – С. 140–145.

6. Устройство для концентрирования жидких пищевых продуктов: пат. 2509514 Рос. Федерация: МПК A 23 L 3/00 / Короткий И.А., Гунько П.А., Мальцева О.М., Учайкин А.В.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО КемТИПП. – № 2013106559/13; заявл. 01.11.2012; опубл. 20.03.2014, Бюл. № 8.

7. Короткий, И.А. Разделительное вымораживание при переработке обезжиренного молока / И.А. Короткий, Е.В. Короткая, О.М. Мальцева // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. – 2015. – № 10. – С. 115–121.

8. Мальцева, О.М. Влияние разделительного вымораживания на изменение плотности обезжиренного молока / О.М. Мальцева, Е.В. Короткая, И.А. Короткий // Современные тенденции развития науки и производства: сборник материалов III Междунар. науч.-практ. конф. / Западно-Сибирский научный центр; Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева. – Кемерово, 2016. – С. 403–406.

9. Теоретические основы хладотехники. Тепломассообмен / С.Н. Богданов, Н.А. Бучко, Э.И. Гуйго [и др.]; под ред. Э.И. Гуйго. –М.: Агропромиздат, 1986. – 320 с.

MODELING OF ICE FORMATION ON CYLINDRICAL SURFACE OF CAPACITIVE CRYOCONCENTRATOR

O.M. Maltseva

Kemerovo Institute of Food Science and Technology (University), 47, Boulevard Stroiteley, Kemerovo, 650056, Russia

e-mail: vm2@kemtipp.ru

Received: 18.06.2016
Accepted: 20.07.2016

Separating freeze-out (cryoconcentration) is widely used for liquid products concentration including milk and secondary dairy raw materials processing. This method allows us to obtain high quality concentrates. Separating freeze-out of nonfat milk have been investigated. The laboratory capacitive cryoconcentrator allows simultaneous separating freeze-out of nonfat milk in one cylinder and frozen fraction melting in another one. Water fraction melting in one cylinder is carried out due to the heat taken away from the ice formed in the other cylinder. The temperature of heat exchange surface of the container in which separating freeze-out takes place is kept stable (up to ± 0.2°) in the range of minus 2 to minus 8. The ice on the heat exchange surface of the capacitive cryoconcentrator is formed in the form of a hollow cylinder. Its wall thickness depends on the temperature of the heat exchange surface and separating freeze-out duration. Modeling of technological processes is an important stage in the technological design of food productions. Mathematical modeling makes it possible to lower material and time expenditures during the design of technological processes and to find the most effective technological solutions. Mathematical model for crystallization of nonfat milk water fraction on the cylindrical surface of the capacitive cryoconcentrator has been developed according to the classical equations of heat and mass transfer. Initial data for finding the dependence of the layer thickness of ice frozen out on the cylindrical surface on the process duration are the surface temperature of the cryoconcentrator and cryoscopic temperature of the concentrated product as well as geometrical parameters of the cryoconcentrator. The estimated dependences obtained were compared with experimental data. The compliance of the estimated model of nonfat milk separating freeze-out on the cylindrical surface to the real process of separating freeze-out has been established.

Nonfat milk, cryoconcentrator, separating freeze-out, mathematical modeling

References

1. Pap L. *Kontsentrirovanie vymorazhivaniem* [Concentration by freezing]. Moscow, Legkaya i pishchevaya promyshlennost' Publ., 1982. 96 p.

2. Korotkiy I.A, Fedorov D.E., Mal'tseva O.M. Tekhnologii kriokontsentrirovaniya v pishchevoy promyshlennosti [Technologies of cryoconcoction in the food industry]. *Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Perspektivnye innovatsii v nauke, obrazovanii, proizvodstve i transporte 2012»* [Proc. of the international scientific and practical conference "Perspective Innovations in Science, Education, Production and Transport' 2012"]. Odessa, 2012, iss. 2, vol. 1, pp. 13–15.

3. Korotkiy I.A., Korotkaya E.V., Uchaykin A.V. Issledovanie protsessov ochistki vody razdelitel'nym vymorazhivaniem [Investigation of the process of water purification using separation freezing]. *Tekhnika i tekhnologiya pishchevykh proizvodstv* [Food Processing: Techniques and Technology], 2015, vol. 38, no. 3, pp. 89–94.

4. Korotkiy I.A., Fedorov D.E., Trizno N.A. Issledovanie raboty emkostnogo kristallizatora dlya razdelitel'nogo vymorazhivaniya zhidkikh pishchevykh produktov [Research work for the capacitance of the mold separation freezing liquid food]. *Tekhnika i tekhnologiia pishchevykh proizvodstv* [Food Processing: Techniques and Technology], 2012, no. 4, pp. 120–125.

5. Korotkaya E.V., Korotkiy I.A., Uchaykin A.V. Ochistka vody vymorazhivaniem v emkostnom kristallizatore [Water purification by freezing in capacitive crystallizer]. *Vestnik krasnoyarskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [The Bulletin of KrasGAU], 2015, no. 6, pp. 140–144.

6. Korotkiy I.A., Gun'ko P.A., Mal'tseva O.M., Uchaykin A.V. *Ustroystvo dlya kontsentrirovaniya zhidkikh pishchevykh produktov* [The device for concoction of liquid foodstuff]. Patent RF, no. 2509514, 2014.

7. Korotkiy I.A., Korotkaya E.V., Mal'tseva O.M. Razdelitel'noe vymorazhivanie pri pererabotke obezzhirennogo moloka [Fractional freeze separation in the skimmed milk processing]. *Vestnik Krasnoyarskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [The Bulletin of KrasGAU]. 2015. №10. S. 115-121.

8. Mal'tseva O.M., Korotkaya E.V., Korotkiy I.A. Vliyanie razdelitel'nogo vymorazhivaniya na izmenenie plotnosti obezzhirennogo moloka [Influence of a separation freezing on change of density of skim milk]. *Materialy III Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Sovremennye tendentsii razvitiya nauki i proizvodstva»* [Proc. of the III International scientific and practical conference "Current trends of development of science and production"]. Kemerovo, 2016, pp. 403–406.

9. Bogdanov S.N., Buchko N.A., Guygo E.I. (ed.), et al. *Teoreticheskie osnovy khladotekhniki. Teplomassoobmen* [Theoretical basis of hladotehniki. Heat and Mass Transfer]. Moscow, Agropromizdat Publ., 1986. 320 p.

Дополнительная информация / Additional Information

Мальцева, О.М. Моделирование процесса намораживания льда на цилиндрической поверхности емкостного криоконцентратора / О.М. Мальцева // Техника и технология пищевых производств. – 2016. – Т. 42. – № 3. – С. 118–124.

Maltseva O.M. Modeling of ice formation on cylindrical surface of capacitive cryoconcentrator. *Food Processing: Techniques and Technology,* 2016, vol. 42, no. 3, pp. 118–124. (in Russ.).

Мальцева Оксана Михайловна
старший преподаватель кафедры высшей математики, ФГБОУ ВО «Кемеровский технологический институт пищевой промышленности (университет)», 650056, Россия, г. Кемерово, б-р Строителей, 47,
тел.: +7 (3842) 39-68-32

Oksana M. Maltseva
Senior Lecturer of the Department of Higher Mathematics, Kemerovo Institute of Food Science and Technology (University), 47, Boulevard Stroiteley, Kemerovo, 650056, Russia,
phone: +7 (3842) 39-68-32