

УДК 66.065.51:641

И.А. Короткий, Д.Е. Федоров, Н.А. Тризно**ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ЕМКОСТНОГО КРИСТАЛЛИЗАТОРА
ДЛЯ РАЗДЕЛИТЕЛЬНОГО ВЫМОРАЖИВАНИЯ
ЖИДКИХ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ**

Работа посвящена исследованию процесса кристаллизации в криоконцентраторе емкостного типа. Проведены эксперименты по разделительному вымораживанию воды при различных значениях температуры хладоносителя и продолжительности процесса кристаллизации. Приведена зависимость массы полученного льда от времени низкотемпературной обработки, построены графики изменения толщины слоя льда, а также температурные кривые на теплообменной поверхности кристаллизатора. В результате экспериментальных исследований получены графики, отражающие зависимость удельного энергопотребления от времени и толщины слоя намораживаемого льда. На основании полученных зависимостей определены энергоэффективные режимы разделительного вымораживания.

Криоконцентрирование, разделительное вымораживание, кристаллизатор, очистка воды, замораживание.

Введение

Большинство жидких пищевых продуктов растительного и животного происхождения представляют собой суспензии с содержанием сухих веществ от 5 до 40 %. Удаление части воды из таких растворов сопровождается уменьшением их объема, что позволяет снизить расходы на транспортировку и хранение. При этом активность воды также уменьшается, в результате чего происходит замедление биохимических и микробиологических процессов с повышением сроков годности продукта.

Для удаления влаги из жидких пищевых продуктов существуют такие методы, как выпаривание, мембранные способы и концентрирование вымораживанием (криоконцентрирование). Последний способ является наиболее перспективным методом, который заключается в том, что в процессе замораживания вещества вода в нем кристаллизуется в виде чистого льда, при этом концентрация незамороженного раствора увеличивается. Сам процесс состоит из двух этапов: кристаллизации влаги, осуществляемой в специальном оборудовании (кристаллизаторах), и сепарирования – отделения льда от концентрированного раствора. По сравнению с остальными способами концентрирование при пониженных температурах имеет ряд преимуществ, к числу которых относится более полное сохранение биологически ценных компонентов – витаминов, микро- и макроэлементов, а также ароматических веществ и термолабильных жидкостей [1]. При вымораживании степень биохимических изменений в продукте пренебрежимо мала, что обуславливает высокое качество получаемых концентратов, а отделенная после криоконцентрирования чистая вода может использоваться в дальнейшем технологическом процессе.

Поскольку вымораживание протекает при отрицательных температурах, то процессы коррозии применяемого технологического оборудования проходят очень медленно, поэтому существует возможность использования дешевого конструкционного материала [2]. Кроме того, невысокие энергетические затраты на криоконцентрирование делают этот

способ экономически более эффективным по сравнению с другими способами сгущения.

Долгое время основным препятствием на пути к широкому распространению разделительного вымораживания являлись высокие потери сухого вещества. Современные технологии позволяют проводить криоконцентрирование с потерями сухого вещества менее 1 %.

Разделительное вымораживание проводят в кристаллизаторах прямого и косвенного охлаждения. В первом типе кристаллизаторов отвод теплоты от продукта осуществляется за счет испарения влаги в условиях вакуума. Несмотря на энергоэффективность, такой способ вымораживания характеризуется большими потерями чистой воды (порядка 15–20 %) и ароматических веществ. В кристаллизаторах косвенного охлаждения отвод теплоты осуществляется через охлаждаемые стенки либо путем введения извне рециркуляционной жидкости. Такие типы кристаллизаторов нашли широкое внедрение в пищевой промышленности.

Сепарирование, являющееся более сложным процессом по сравнению с кристаллизацией, проводится преимущественно двумя методами: основанными на механическом вытеснении концентрата из смеси и основанными на действии конвективной или молекулярной диффузии. При этом стоит отметить, что наиболее эффективного сепарирования можно достичь путем намораживания льда в криоконцентраторе емкостного типа. В таких аппаратах по завершении процесса кристаллизации концентрат сливается из центральной части емкости, после чего намороженный лед плавится и удаляется из аппарата. Это позволяет значительно упростить конструкцию аппарата и повысить эффективность разделительного вымораживания.

В пищевой промышленности концентрирование вымораживанием применяется для очистки и опреснения воды, получения натуральных пищевых красителей, концентрированных фруктовых соков, алкогольных напитков, кофейных экстрактов, для сгущения молока и молочных продуктов и т.д. Раздели-

тельное вымораживание успешно используется в фармакологии для сгущения лекарственных препаратов [3]. Стоит также отметить, что данный способ может применяться как предварительный этап подготовки продукта к последующей сублимационной сушке [4].

Экономическая эффективность использования криоконцентрирования напрямую зависит от удельного энергопотребления установки на удаление 1 кг влаги, что в свою очередь определяется многими факторами: геометрией самого кристаллизатора, температурой и продолжительностью замораживания, кратностью циклов и т.д. Правильно подобранные режимы работы криоконцентратора обеспечивают минимальные энергозатраты и наибольшую производительность по вымораживанию влаги.

Для разработки технологий криоконцентрирования жидких пищевых продуктов в емкостном криоконцентрате необходимо сперва исследовать процессы льдообразования на его теплообменных поверхностях при вымораживании влаги из растворов. Таким образом, целью настоящей работы является исследование процесса разделительного вымораживания воды в кристаллизаторе емкостного типа и определение наиболее эффективных технологических параметров.

Материалы и методы

Для проведения экспериментальных исследований был использован емкостный кристаллизатор, разработанный в ФГБОУ ВПО КемТИПП на кафедре «Теплохладотехника», схема которого представлена на рис. 1.

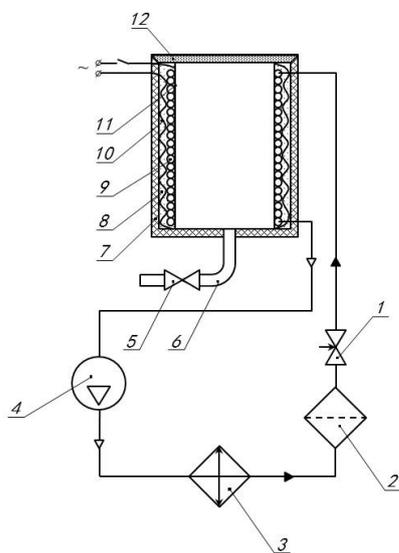


Рис. 1. Схема кристаллизатора емкостного типа

Установка состоит из цилиндрической емкости 7 с крышкой 12, в которую помещена другая цилиндрическая емкость 11, выполненная из нержавеющей стали. Пространство между их стенками заполнено хладагентом 8. Тепло от него отводится хладагентом, циркулирующим через испаритель-змеевик 9 холодильной машины, включающей также компрессор 4, конденсатор 3, фильтр-осушитель 2 и

дрессельное устройство 1. Слив концентрата осуществляется через трубопровод 6 путем открытия запорного вентиля 5. Оттаивание намороженного льда осуществляется термоэлектронагревателем 10. Объем кристаллизатора составляет 4 л, мощность компрессора – 120 Вт, используемый хладагент – R134a.

Контрольно-измерительный комплекс регистрации температур раствора, хладоносителя, узловых точек цикла холодильной машины и поддержания заданной температуры хладоносителя включал в себя термопары, измеритель-регулятор ОВЕН ТРМ1, преобразователь интерфейса RS-485, модуль ввода аналоговый ОВЕН МВА8 и персональный компьютер. Для определения энергозатрат использовался электрический счетчик «МЕРКУРИЙ 203 2Т». Перед началом каждого эксперимента в криоконцентрат заливало 3500 мл воды, предварительно охлажденной до 1 °С. Измерителем-регулятором ОВЕН ТРМ1 задавалась температура хладоносителя минус 2, минус 5, минус 7 и минус 10 °С, эксперимент проводился в течение 15, 30, 60, 90, 120 и 180 мин. По истечении заданного времени незамерзшая вода сливалась и с помощью мерного цилиндра определялось количество вымороженной воды.

Результаты и их обсуждение

Результаты определения количества вымороженной воды в процессе кристаллизации в зависимости от времени и температуры хладоносителя представлены в табл. 1.

Таблица 1

Количество вымороженной воды
в процессе кристаллизации, кг

Время, мин	Температура хладоносителя, °С			
	минус 2	минус 5	минус 7	минус 10
15	0,2	0,2	0,2	0,2
30	0,41	0,45	0,45	0,45
60	0,66	0,95	1,00	1,01
90	0,87	1,24	1,43	1,46
120	1,08	1,50	1,70	1,81
180	1,39	1,95	2,25	2,43

Представленные данные свидетельствуют о том, что с понижением температуры хладоносителя масса вымороженной воды увеличивается, причем чем большее время длился процесс кристаллизации, тем более явно проявлялась эта зависимость. Через 30 мин заморозки величина вымороженной воды при всех заданных температурах хладоносителя практически совпадает, поскольку к этому времени температура хладоносителя достигает заданного уровня лишь при установленном значении температуры минус 2 °С (см. рис. 3). При дальнейшем увеличении длительности вымораживания разность между массой образовавшегося льда при различных значениях температуры хладоносителя повышается.

Масса образовавшегося льда в процессе кристаллизации является относительной величиной, которая зависит не только от продолжительности вымораживания и температуры хладоносителя, но и от геомет-

рии самого кристаллизатора, поэтому для разработки технологического процесса криоконцентрирования более информативной характеристикой является толщина намораживаемого слоя льда.

Для определения толщины слоя льда вначале был произведен расчет высоты, м, по формуле

$$h_{л} = \frac{4 \cdot V_{см}}{\pi \cdot D^2}, \quad (1)$$

где $V_{см}$ – объем водолеяной смеси (определяется как сумма объема незамороженной воды и намороженного льда), m^3 ; D – диаметр рабочей емкости криоконцентратора, равный 0,174 м.

Стоит отметить, что при определении объема водолеяной смеси учитывались значения плотности воды и льда, составляющие соответственно 0,9982 и 0,917 $г/см^3$.

Затем был рассчитан внутренний диаметр замерзшего ледяного массива, м:

$$D_{л.м.} = \sqrt{\frac{D^2 - 4 \cdot V_{л.}}{\pi \cdot h_{л}}}, \quad (2)$$

где $V_{л.}$ – объем образовавшегося льда, m^3 .

Толщина намороженного слоя льда, м, определялась по формуле

$$S = \frac{D - D_{л.м.}}{2}. \quad (3)$$

По полученным данным был построен график изменения толщины намораживаемого слоя льда в зависимости от времени при различных значениях температуры хладоносителя (рис. 2).

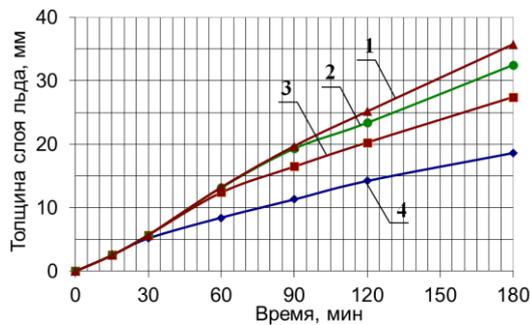


Рис. 2. Зависимость толщины намораживаемого слоя льда от времени кристаллизации при температуре хладоносителя: 1 – минус 10 °С; 2 – минус 7 °С; 3 – минус 5 °С; 4 – минус 2 °С

По графику, представленному на рис. 2, установлено, что скорость образования льда имеет нелинейный характер и со временем кристаллизации снижается. Данный факт обусловлен тем, что по мере роста толщины слоя льда термическое сопротивление между теплообменной поверхностью и водой повышается, что снижает эффективность отвода теплоты. При температурах хладоносителя минус 10, минус 7 и минус 5 °С наибольшая скорость образования льда наблюдалась в диапазоне от 30 до 60 мин. В том слу-

чае, когда температура хладоносителя составляла минус 2 °С, скорость кристаллизации была максимальной в первые 30 мин процесса замораживания. Через 180 мин после процесса кристаллизации толщина образовавшегося слоя льда при температурах хладоносителя минус 2, минус 5, минус 7 и минус 10 °С составила соответственно 18,6; 27,4; 32,5 и 35,8 мм.

На рис. 3 представлен график изменения температуры на теплообменной поверхности кристаллизатора в процессе замораживания.

После запуска холодильная машина работает непрерывно до тех пор, пока температура хладоносителя не достигнет заданного значения. Время, необходимое для этого, при установленных значениях температуры хладоносителя минус 2, минус 5, минус 7 и минус 10 °С составило 25, 60, 96 и 160 мин соответственно, после чего на графиках наблюдается волнообразный характер температурных кривых. Холодильная машина при этом работает в циклическом режиме для поддержания заданной температуры хладоносителя в допустимом диапазоне, установленном перед началом эксперимента.

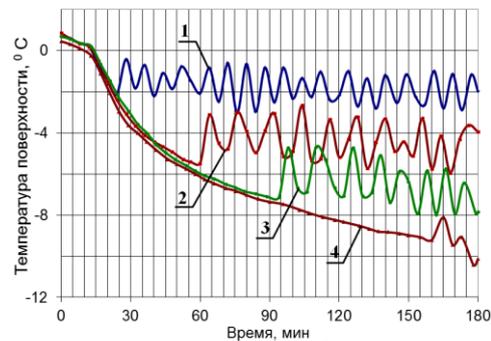


Рис. 3. Зависимость температуры теплообменной поверхности кристаллизатора от времени замораживания при температуре хладоносителя: 1 – минус 2 °С; 2 – минус 5 °С; 3 – минус 7 °С; 4 – минус 10 °С

Энергетические затраты процесса замораживания состоят из затрат электроэнергии на привод компрессора. Расход энергии на замораживание при различных температурных режимах представлен на рис. 4.

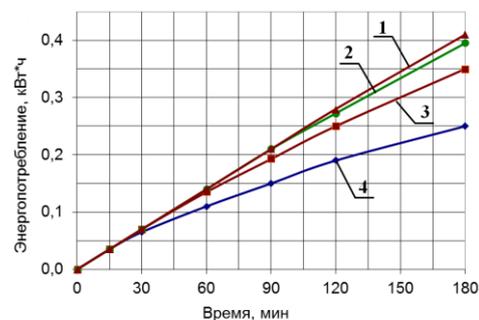


Рис. 4. Величина энергопотребления в процессе кристаллизации при температуре хладоносителя: 1 – минус 10 °С; 2 – минус 7 °С; 3 – минус 5 °С; 4 – минус 2 °С

В случае, когда температура хладоносителя составляла минус 10 °С, зависимость энергопотребле-

ния от времени имела практически линейный характер. Это связано с тем, что из 180 мин общего времени кристаллизации холодильная машина работала в непрерывном режиме 160 мин и лишь 20 мин в циклическом режиме (см. рис. 3). Повышение температуры хладоносителя до минус 7 °С приводит к незначительному снижению энергопотребления, на рис. 4 незначительное отклонение графика наблюдается через 90 мин замораживания. Дальнейшее повышение температуры хладоносителя до минус 5 и минус 2 °С приводит к значительному снижению энергозатрат. Через 180 мин кристаллизации энергозатраты при температуре хладоносителя минус 2 °С были на 40 % ниже, чем при установленном значении температуры хладоносителя минус 10 °С.

Для определения наиболее энергоэффективных режимов разделительного вымораживания был построен график зависимости удельного энергопотребления (кДж/кг вымороженной влаги) от толщины слоя образовавшегося льда (рис. 5).

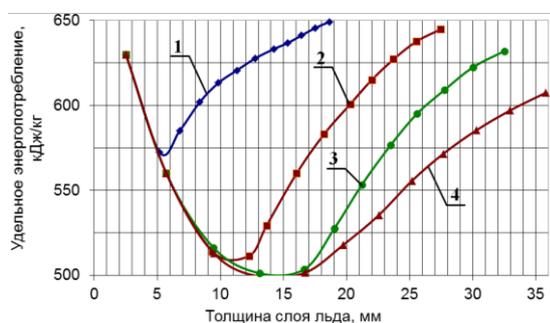


Рис. 5. Зависимость удельного энергопотребления от толщины слоя льда в процессе кристаллизации при температуре хладоносителя: 1 – минус 2 °С; 2 – минус 5 °С; 3 – минус 7 °С; 4 – минус 10 °С

Из графика, приведенного на рис. 5, следует, что по мере увеличения толщины слоя льда сначала происходит снижение удельного энергопотребления до определенного значения. Высокие значения энергопотребления в начале эксперимента обусловлены тем, что значительная часть энергии, подводимой к холодильной машине, расходуется не на льдообразование, а на понижение температуры воды и хладоносителя. Затем по мере понижения температуры хладо-

носителя увеличивается льдообразование и удельные затраты энергии на образования льда уменьшаются. Минимальному энергопотреблению соответствует определенная толщина слоя льда. По мере увеличения толщины слоя льда растет термическое сопротивление образующегося ледяного массива, ухудшается теплоотвод и затраты энергии на намораживание льда увеличиваются. Каждой температуре хладоносителя соответствовал свой оптимум толщины слоя льда с минимальным удельным энергопотреблением. При температурах хладоносителя минус 2 и минус 5 °С наименьшие энергозатраты на вымораживание 1 кг влаги наблюдались при толщине слоя льда соответственно 5–6 и 9–12 мм. В том случае, когда температура хладоносителя составляла минус 7 и минус 10 °С, наименьшее удельное энергопотребление соответствовало толщине слоя льда 13–16 мм. Было также установлено, что кристаллизация при заданной температуре хладоносителя минус 10 °С характеризовалась наименьшими удельными энергозатратами, которые при толщине слоя льда 13–16 мм составили 500–512 кДж/кг вымороженной влаги.

Таким образом, разделительное вымораживание сопровождается наименьшими энергозатратами при непрерывной работе холодильной машины до достижения слоя льда 13–16 мм. В данном случае длительность этого процесса составила 60–70 мин, хладоноситель к тому времени охлаждался до температуры минус 6...минус 7 °С. Вымораживание при более высоких температурах ведет к повышению удельного энергопотребления, а кристаллизация при установленной температуре ниже минус 10 °С является нецелесообразной, поскольку при этом хладоноситель не успевает охладиться до заданного значения. Практическая значимость представленных результатов исследований заключается в том, что приведенные режимы работы емкостного кристаллизатора обеспечивают наименьшее удельное энергопотребление криоконцентратора на удаление 1 кг воды. В конечном итоге это приводит к сокращению себестоимости готового продукта, который подвергается данному процессу обработки. Таким образом, удастся добиться повышения эффективности разделительного вымораживания, что делает этот способ переработки продуктов перспективным направлением пищевой промышленности.

Список литературы

1. Шамаров, М.В. Низкотемпературное концентрирование / М.В. Шамаров, М.И. Лугинин // Пищевая индустрия. – 2011. – № 4/9. – С. 65–66.
2. Зелинская, Е.В. Теоретические аспекты использования гидроминерального сырья: монография / Е.В. Зелинская, У.Ю. Воронина. – М.: Академия Естествознания, 2009.
3. Шульга, Н.Н. Криоконцентрирование сыворотки крови / Н.Н. Шульга // Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук. – 2009. – № 5. – С. 47–48.
4. Лугинин, М.И. Разработка и исследование струйного криоконцентратора жидких продуктов: дис. ... канд. техн. наук. – Краснодар, 2008. – 138 с.

ФГБОУ ВПО «Кемеровский технологический институт пищевой промышленности»,
650056, Россия, г. Кемерово, б-р Строителей, 47.
Тел./факс: (3842) 73-40-40
e-mail: office@kemtipp.ru

SUMMARY

I.A. Korotky, D.E. Fedorov, N.A. Trizno

**RESEARCH ON THE OPERATION OF THE CAPACITIVE CRYSTALLIZER
FOR FREEZING OUT OF LIQUID FOOD PRODUCTS**

The paper is devoted to research on the process of crystallization in the cryoconcentrator of capacitive type. Experiments on water separation freezing out have been carried out at different temperatures of a coolant and duration of the crystallization process. The dependence of the weight of the obtained ice on the time of the low-temperature processing is given. The change of ice layer thickness and temperature curves on a heat transfer surface of a crystallizer have been graphed. As a result of experimental studies the graphics reflecting the dependence of specific power consumption on time and thickness of a frozen ice layer were received. Based on the dependences obtained power efficiency modes of separation freezing out were defined.

Cryoconcentrator, separation freezing out, crystallizer, water treatment, freezing.

Kemerovo Institute of Food Science and Technology
47, Boulevard Stroiteley, Kemerovo, 650056, Russia
Phone/Fax: +7(3842) 73-40-40
e-mail: office@kemtipp.ru

