

УДК 664.8.037.5

Профессор С.Т. Антипов, доцент В.Ю. Овсянников,
магистрант Я.И. Кондратьева

(Воронеж. гос. ун-т. инж. технол.) кафедра машин и аппаратов пищевых производств.
тел. (473) 255-38-96
E-mail: ows2003@mail.ru

Professor S.T. Antipov, associate Professor V.Iu. Ovsiannikov,
master student Ia.I. Kondrateva

(Voronezh state university of engineering technologies) Department of machines and
apparatuses of food production. phone (473) 255-38-96
E-mail:ows2003@mail.ru

Кинетика процесса концентрирования вымораживанием вишневого сока

Kinetics of the process of concentration by freezing the cherry juice

Реферат. Обоснована актуальность темы и определены основные направления исследований. Обоснован механизм процесса концентрирования жидких сред вымораживанием влаги, определяющийся в основном условиями миграции молекул воды к поверхности фронта кристаллизации и встраивании их в кристаллическую структуру льда. Показано, что режим вымораживания влаги характеризуется температурой теплообменной поверхности, воспринимающей теплоту кристаллизации влаги, скоростями перемещения и площадью поверхности контакта теплообменивающихся сред, видом и концентрацией растворенных веществ продукта. Охарактеризован процесс теплообмена между поверхностью кристаллизации и обрабатываемой технологической средой. Представлена схема работы экспериментальной вымораживающей установки и методика проведения опытов. Исследовано изменение средней величины количества вымороженного льда с единицы теплообменной поверхности вымораживающей установки во времени, отраженные в виде кривых роста и скорости роста ледяной фазы на поверхности теплообменных элементов площадью 0,08 м², за 3600 секунд в зависимости от температуры теплообменной поверхности и начального содержания сухих веществ в вишневом соке. Увеличение начального содержания сухих веществ в вишневом соке при постоянной температуре кипения хладагента в испарителе вымораживающей установки нелинейно снижает удельное количество льда, образовавшееся на теплообменной поверхности. Изменение температуры кипения хладагента также вызывает нелинейное увеличение удельного количества льда, вымороженного на теплообменной поверхности. Полученные кривые скорости роста ледяной фазы позволяют выделить участки кристаллизации влаги, имеющей различный характер связи с растворимым веществом. Исследовано изменение степени концентрации вишневого сока при вымораживании от температуры кипения хладагента и начального содержания сухих веществ в нем. Показано, что степень концентрирования вишневого сока снижается при увеличении начального содержания сухих веществ в нем и повышении температуры кипения хладагента в испарителе вымораживающей установки.

Summary. The urgency of theme is substantiated and the basic directions of studies are determined. Is substantiated the mechanism of the process of the concentration of liquid media by freezing moisture, that is determined in essence by the conditions for the migration of the molecules of water to the frontal surface of crystallization and their incorporation into the crystal structure of ice. It is shown that the regime of freezing moisture is characterized by the temperature of the heat exchange surface, which receives heat of crystallization of moisture, by the speeds of displacement and with the surface area of the contact of the being transferred heat media, by form and by the concentration of the dissolved substances of product. The process of heat exchange between the surface of crystallization and the workable technological medium is described. The schematic of the work of the experimental freezing out installation and the procedure of experiences is represented. Are investigated a change in the average value of a quantity of frozen out ice from the unit of heat exchange surface, which freezes out installations in the time, reflected in the form of the curves of increase and rate of growth in the icy phase on the surface of the heat exchange elements of area of 0.08 m², in 3600 seconds depending on the temperature of the heat exchange surface and initial content of dry matter in the cherry juice. An increase in the initial content of dry matter in the cherry juice at constant temperature of boiling refrigerant in the vaporizer of the freezing out installation nonlinearly reduces the specific quantity of ice, which was being formed on the heat exchange surface. A change in the boiling point of refrigerant also causes a nonlinear increase in the specific quantity of ice, frozen out on the heat exchange surface. The obtained curves of the rate of growth in the icy phase make it possible to isolate the sections of the crystallization of the moisture, which has different nature of connection with the solute. Is investigated a change in the degree of concentration of cherry juice with the freezing from the boiling point of refrigerant and initial content of dry matter. It is shown that the degree of the concentration of cherry juice is reduced with an increase in the initial content of dry matter in it and an increase in the boiling point of refrigerant in the vaporizer of the freezing out installation.

Ключевые слова: концентрирование вымораживанием, рост льда, степень концентрирования, вишневый сок.

Keywords: concentration by freezing, an increase in ice, the degree of concentration, the cherry juice.

© Антипов С.Т., Овсянников В.Ю.,
Кондратьева Я.И., 2014

Концентрирование пищевых и биологических сред методом вымораживания влаги обеспечивает наиболее полное сохранение химического состава и свойств веществ, входящих в сгущаемый продукт.

При этом, указанный процесс подразумевает выделение воды в виде льда при температурах ниже кристаллизации чистой воды, что особенно важно в случаях получения концентрированных плодовых и овощных соков высокого качества, продуктов детского и диетического питания, при энергетических затратах на проведение процесса сопоставимых с традиционными методами концентрирования мембранными методами и вакуумным выпариванием [1].

Режим вымораживания влаги, определяющий механизм процесса, характеризуется следующими параметрами: температурой охлаждающей среды или теплообменной поверхности, воспринимающей теплоту кристаллизации влаги, скоростями перемещения и площадью поверхности контакта теплообменивающихся сред, видом и концентрацией растворенных веществ продукта. Так выявляется зависимость механизма вымораживания от внешних факторов, объединяемых понятием режима вымораживания [2-3].

Исследование изменения средней величины количества вымороженного льда с единицы теплообменной поверхности вымораживающей установки во времени, полученное опытным путем, является одной из основных характеристик процесса вымораживания влаги.

С целью исследования кинетических закономерностей процесса концентрирования вишневого сока вымораживанием была создана экспериментальная установка на базе льдогенератора «blexmatic V41 electronic», принципиальная схема работы которой представлена на рисунке 1.

Экспериментальная установка состоит из холодильного агрегата с системой подачи и отвода хладагента, обеспечивающего достижение требуемой температуры кипения хладагента в цапфах испарителя и опрокидывающейся ванны. Поверхность вымораживания влаги представляет собой вертикальные цапфы испарителя, погруженные в ванну с продуктом.

Для замера температуры цапфы испарителя использовали прикрепленную к ней хромель-копелевую термопару с диаметром спая 0,2 мм. Конец термопары прикреплялся ко входному разъему измерителя – регулятора ТРМ202 с пределами измерения $-200\text{ }^{\circ}\text{C} \dots +800\text{ }^{\circ}\text{C}$ и ценой деления $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$.

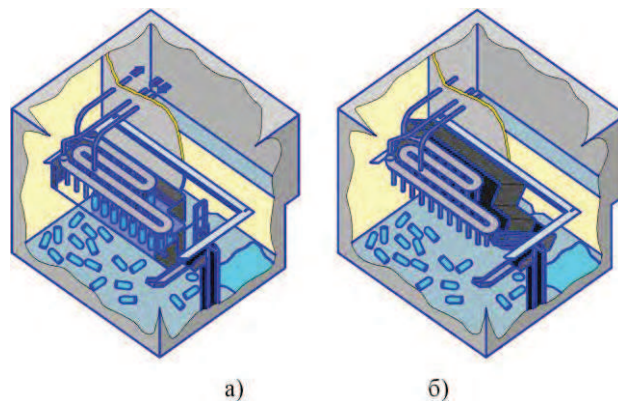


Рисунок 1. Схема работы вымораживающей установки в режиме: а) вымораживание влаги; б) оттаивание

Холодные спай термопар термостатировались. Предварительно изолированные друг от друга полихлорвиниловыми трубками они помещались в сосуд Дьюара с тающим льдом. Нуль в сосуде Дьюара контролировался лабораторным термометром с погрешностью измерения $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Термопара периодически проверялась на точность показаний.

Измерение высоты жидкого продукта в ванне проводили при помощи мерной линейки с ценой деления шкалы $1,0\text{ мм}$, укрепленной с левой стороны ванны.

Продолжительность цикла вымораживания влаги измерялась при помощи электронного секундомера с дискретностью выходного сигнала равного $0,1\text{ с}$.

Съем вымороженного льда из вишневого сока осуществлялся при опущенном положении ванны льдогенератора и переключенной работе холодильного агрегата в режиме «оттаивание».

Вес вымороженного льда определялся за один цикл работы установки, продолжительность которого была принята равной 3600 с .

Вымороженный лед помещался в заранее взвешенную мерную ёмкость, и суммарная масса мерной емкости с вымороженным льдом определялась на аналитических весах с точностью до $0,01\text{ г}$. Для определения величины сухого вещества вишневого сока, захватываемого при кристаллизации льда в пространство между кристаллами формировавшейся ледяной гранулы, полученный вымороженный лед расплавляли, термостатировали при температуре $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ и определяли содержание сухих веществ в нем при помощи зеркального рефрактометра ИРФ-22.

Система подачи хладагента во внутреннюю полость морозильных цапф испарителя состоит из холодильного агрегата, включающего поршневой герметичный компрессор, двухсекционный воздушный конденсатор, ресивер, фильтр-осушитель, терморегулирующий вен-

тиль, чувствительный баллон которого прикреплен к магистрали всасывания хладагента в компрессор, реле давления и соленоидные клапаны.

В качестве холодильного агента в холодильной машине использовался Фреон R134a. Мощность холодильного агрегата позволяла при экспериментах получать температуру кипения холодильного агента от 262 до 250 К за счет варьирования холодопроизводительности компрессора. Давление во всасывающей и нагнетающей магистрали компрессора контролировалось при помощи манометров, размещенных на приборной панели вымораживающей установки.

После осуществления цикла вымораживания определяли производительность вымораживающей установки по вымороженному льду и содержание сухих веществ в концентрированном вишневом соке.

Проведенные исследования роста и скорости роста ледяной фазы на поверхности теплообменных элементов площадью $0,08 \text{ м}^2$, за цикл вымораживания, равный 3600 с, в зависимости от температуры теплообменной поверхности и начального содержания сухих веществ в вишневом соке представлены на рисунках 2-5.

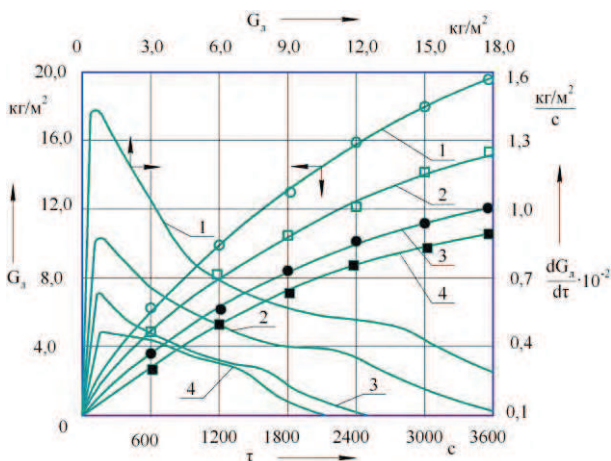


Рисунок 2. Кривые роста и скорости роста ледяной фазы на поверхности теплообменных элементов площадью $0,08 \text{ м}^2$, при температуре кипения хладагента 258 К и начальном содержании сухих веществ в вишневом соке: 1–12,0 %; 2–16,0 %; 3–20 %; 4–24 %

Анализ полученных экспериментальных кривых роста ледяной фазы и кривых скорости роста ледяной фазы, полученных методом графического дифференцирования, позволяет сделать следующие выводы.

Кривые роста ледяных фаз на исследуемой теплообменной поверхности вымораживающей установки, в зависимости от изменения температуры поверхности вымораживания и начального содержания сухих веществ в вишневом соке, носят идентичный характер [4-6].

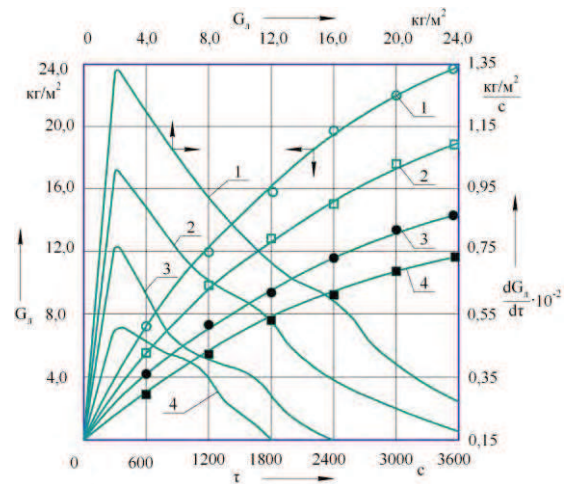


Рисунок 3. Кривые роста и скорости роста ледяной фазы на поверхности теплообменных элементов площадью $0,08 \text{ м}^2$, при температуре кипения хладагента 253 К и начальном содержании сухих веществ в вишневом соке: 1–12,0 %; 2–16,0 %; 3–20 %; 4–24 %

Увеличение начального содержания сухих веществ в вишневом соке при постоянной температуре кипения хладагента в испарителе вымораживающей установки нелинейно снижает удельное количество льда, образовавшееся на теплообменной поверхности.

Температура кипения хладагента в цапфах вымораживающей установки также оказывает влияние на удельное количество льда, вымороженного за соответствующие интервалы времени при организации процесса в указанном интервале времени.

Изменение температуры кипения хладагента также вызывает нелинейное увеличение удельного количества льда, вымороженного на теплообменной поверхности, при этом с уменьшением температуры кипения хладагента удельное количество вымороженного льда повышается.

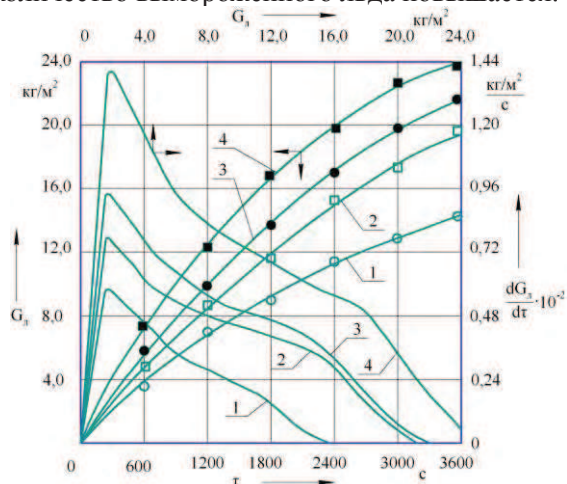


Рисунок 4. Кривые роста и скорости роста ледяной фазы на поверхности теплообменных элементов площадью $0,08 \text{ м}^2$, при начальном содержании сухих веществ в вишневом соке 12,5 % и температуре кипения хладагента: 1 – 262 К; 2 – 257 К; 3 – 255 К; 4 – 253 К

Кривые скорости роста ледяной фазы имеют сложную конфигурацию. Отмечено, что в момент контакта имеющей температуру, значительно меньшую по сравнению с температурой вымораживаемого вишневого сока, скорость кристаллизации резко возрастает от нулевого до максимального значения за весьма краткий промежуток времени вследствие теплового «удара» в момент контакта сока с охлажденными поверхностями цапф вымораживающей установки.

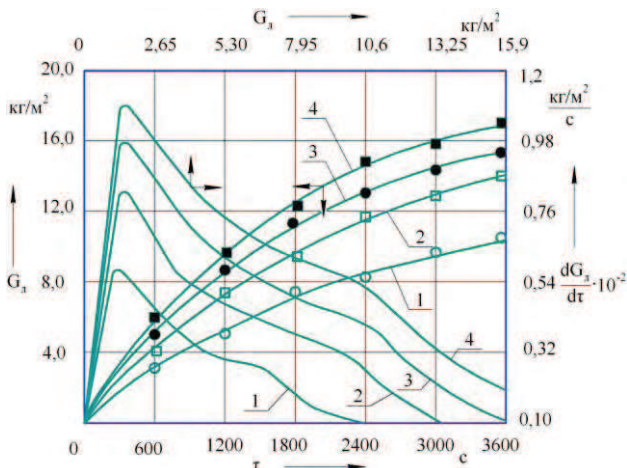


Рисунок 5. Кривые роста и скорости роста ледяной фазы на поверхности теплообменных элементов площадью $0,08 \text{ м}^2$, при начальном содержании сухих веществ в вишневом соке 18,0 % и температуре кипения хладагента: 1 – 262 К; 2 – 257 К; 3 – 255 К; 4 – 253 К

После этого кривая скорости кристаллизации резко изменяет свой угол наклона и наблюдается практически линейное изменение направления кривой скорости кристаллизации влаги на теплообменной поверхности до второй точки перегиба, что свидетельствует об образовании тонкого слоя льда на поверхности теплообмена, установлении сформировавшегося температурного режима между вишневым соком и поверхностью теплообмена.

Затем характер кривой скорости роста ледяной фазы приобретает нелинейный характер, после чего претерпевает вторую точку перегиба и монотонно нелинейно снижается. Отмеченная точка перегиба является пограничной, разделяющей процессы льдообразования влаги, имеющей различный характер связи с растворенными веществами вишневого сока. При этом в начальный период вымораживания кристаллизуется влага, находящаяся в слоях наиболее близких к поверхности льдообразования в форме наименее связанной с растворимыми веществами вишневого сока, а затем при смещении и миграции слоев жидкой фазы, наступает период резкого снижения скорости льдообразования,

вызванный как термическим сопротивлением слоя вымороженного льда на теплообменной поверхности, так и преодолением всевозрастающих сил сцепления молекул воды с растворимыми веществами вишневого сока.

Также исследована зависимость изменения степени концентрации вишневого сока при вымораживании от температуры кипения хладагента и начального содержания сухих веществ в нем, представленные на рисунках 6-7.

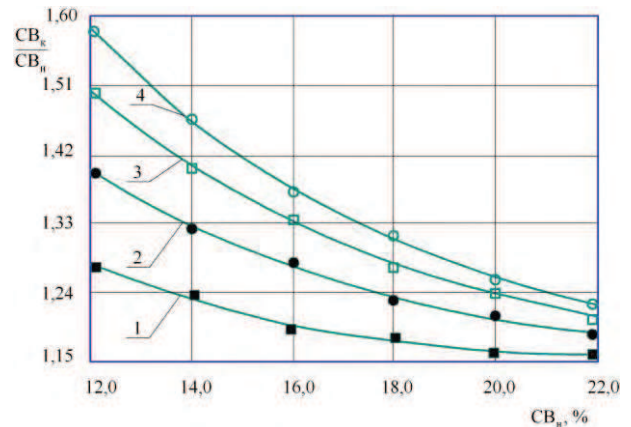


Рисунок 6. Изменение степени концентрации вишневого сока от начального содержания сухих веществ и температуры кипения хладагента: 1 – 262 К; 2 – 258 К; 3 – 255 К; 4 – 253 К

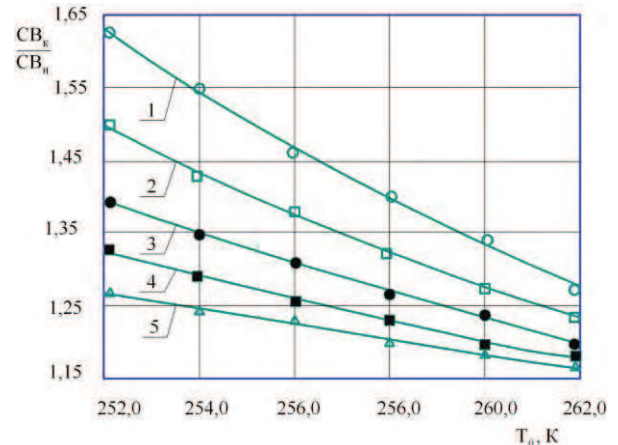


Рисунок 7. Изменение степени концентрации вишневого сока от температуры кипения хладагента при начальном содержании сухих веществ: 1–12,6 %; 2–14,1 %; 3–16,3 %; 4–17,9 %; 5–19,8 %

Зависимость изменения степени концентрации вишневого сока при вымораживании от начального содержания сухих веществ носит выраженный нелинейный характер [4]. Отмечено, что при увеличении начального содержания сухих веществ в вишневом соке величина отношения сухих веществ в сконцентрированном соке по отношению к исходному нелинейно монотонно снижается.

Температура кипения хладагента в теплообменных элементах вымораживающей установки также оказывает влияние на изменение степени концентрации вишневого сока при различном содержании сухих веществ в нем. Увеличение температуры кипения хладагента обуславливает пропорциональное снижение степени концентрации исходного вишневого сока при прочих условиях вымораживания влаги из него.

Проведенные исследования позволяют глубже раскрыть особенности и механизм об-

разования льда на теплообменной поверхности вымораживающей установки при концентрировании вишневого сока.

Полученный концентрат вишневого сока, вследствие своего высокого качества, может быть использован в технологии приготовления соков для детского и диетического питания, создания продуктов питания функциональной направленности и сырья для последующей сублимационной сушки.

ЛИТЕРАТУРА

1 Пап Л. Концентрирование вымораживанием. М.: Лёгкая и пищевая промышленность, 1982. 97 с.

2.Плотников В.Т., Филаткин В.Н. Разделительные вымораживающие установки. М.: Агропромиздат, 1987. 352 с.

3 Овсянников В.Ю. Оптимальные режимы концентрирования плазмы крови вымораживанием // Мясная индустрия. 2012. № 1. С. 65-68.

4 Антипов С.Т., Овсянников В.Ю., Рязанов А.Н., Яценко С.М. Разработка модели анализа и прогноза основных характеристик процесса криоконцентрирования // Хранение и переработка сельхозсырья. 2001. № 4. С. 36-38.

5 Sánchez J., Ruiz Y., Raventós M., Auleda J.M. et al. Progressive freeze concentration of orange juice in a pilot plant falling film // Innovative Food Science & Emerging Technologies. 2010. Vol. 11. № 4. P. 644-651.

6 Englezos P. The Freeze Concentration Process and its Applications // Developments in Chemical Engineering and Mineral Processing. 1994. Vol. 2. № 1. P. 3-15.

REFERENCES

1 Pap L. Kontsentrirovanie vymorazhivaniem [Freeze concentration]. Moscow, Legkaia i pishchevaia promyshlennost', 1982, 97 p. (In Russ.).

2 Plotnikov V.T., Filatkin V.N. Razdelitel'nye vymorazhivaiushchie ustanovki [Dividing the chiller plant]. Moscow, Agropromizdat, 1987, 352 p. (In Russ.).

3 Ovsiannikov V.Iu. Optimal modes freeze plasma concentration. *Miasnija industriia*. [Meat Industry], 2012, no. 1, pp. 65-68. (In Russ.).

4 Antipov S.T., Ovsiannikov V.Iu., Riazanov A.N., Iashchenko S.M. Development of the model of analysis and forecast of the fundamental characteristics of the process of cryo-concentration. *Khranenie i pererabotka sel'khozsyrya*. [Storage and processing agricultural], 2001, no. 4, pp. 36-38. (In Russ.).

5 Sánchez J., Ruiz Y., Raventós M., Auleda J.M. et al. Progressive freeze concentration of orange juice in a pilot plant falling film. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2010, vol. 11, no. 4, pp. 644-651.

6 Englezos P. The Freeze Concentration Process and its Applications. *Developments in Chemical Engineering and Mineral Processing*, 1994, vol. 2, no. 1, pp. 3-15.