

Изучение процесса размораживания мороженого с яблочным пюре методом низкотемпературной ^1H ЯМР-спектроскопии

Галина Полищук, Любовь Мацько

Национальный университет пищевых технологий, ул. Владимирская 68, 01033 Киев, Украина; тел. (+38044) 413-24-98; эл. почта milknuft@i.ua

Римгаудас Раманаускас

Пищевой институт КТУ, пр. Тайкос 92, LT-51180 Каунас, Литва; тел. (370-37) 311361; эл. почта lmai@lmai.lt

Татьяна Крупская, Владимир Туров

Институт химии поверхности им. А. А. Чуйка НАНУ, ул. Генерала Наумова, 17, 03164 Киев, Украина; тел. (+380044) 424-94-53; эл. почта v-turov@ukr.net

Методом низкотемпературной ^1H ЯМР-спектроскопии изучен процесс размораживания основных компонент мороженого с яблочным пюре при его таянии в диапазоне температур от $-60\text{ }^\circ\text{C}$ до $0\text{ }^\circ\text{C}$. Получены спектры ^1H ЯМР смеси стандартного химического состава и смесей, стабилизированных яблочным пюре с повышенным содержанием растворимого пектина. Установлено, что содержание сильно- и слабосвязанной воды в смесях с яблочным пюре и со стабилизатором структуры практически одинаково на фоне некоторых отличий величины межфазной энергии. Однако параметры слоев связанной воды значительно отличаются в присутствии молочных белков, что выражается в повышении количества сильносвязанной воды в смеси молочно-яблочного мороженого. Установлено, что характер распределения по радиусам кристаллов льда зависит от химического состава смесей и обусловлен как величиной связанной воды, так и значением межфазной энергии. При этом размеры кристаллов льда уменьшаются в присутствии таких эффективных влагосвязывающих агентов, как желатин и молочные белки. Микроскопирование образцов закаленного мороженого, полученного на основе исследуемых смесей, подтвердило общую тенденцию распределения кристаллов вымороженной воды в смесях различного химического состава.

Практическим применением полученных результатов исследований является рекомендация к использованию комбинированных по составу углеводо- и белоксодержащих смесей при производстве мороженого с повышенным содержанием воды. Образующие в таких смесях пространственные структуры препятствуют образованию грубокристаллической структуры в продукте при его получении и хранении в условиях низких температур.

Ключевые слова: мороженое, фазовый состав, ЯМР-спектроскопия.

Введение

Мороженое является одной из наиболее сложных по структуре пищевых систем, в которой многочисленные и разнообразные по форме и физическому состоянию дисперсные частицы (жировые шарики, воздушные пузырьки, кристаллы лактозы и льда) распределены в непрерывной дисперсионной среде – концентрированном растворе сахаров [1].

Низкотемпературные технологии и условия хранения мороженого в широком диапазоне отрицательных температур требуют понимания процессов, происходящих как со структурой продукта, так и с отдельными ее элементами. Наибольшие проблемы при формировании и

стабилизации структуры возникают в смесях молочного мороженого с низким содержанием жира (0,5–7,5 %), а также мороженого плодово-ягодного. Именно в этих видах замороженных десертов содержится наибольшее количество воды – до 70–72 %, в то время как в пломбире ее содержание снижается до 58–60 % за счет присутствия молочного жира в количествах до 12–20 %. Кроме того, жировые шарики механически препятствуют чрезмерному росту кристаллов льда в водной фазе, а также стабилизируют воздушные пузырьки, образуя вокруг них каркас из агломерированных частиц [2].

Вода, присутствующая в мороженом, может включаться в гидратные оболочки молекул углеводов или находиться в виде упорядоченных сеткой водородных связей полиассоциатов. В общем случае ее можно разделить на свободную, не входящую в состав гидратных комплексов, и связанную. При этом под связанной понимают ту часть воды, свободная энергия которой, по сравнению с объемной водой, понижена либо адсорбционными взаимодействиями с макромолекулами, либо гидратными взаимодействиями с органическими молекулами. Связанная вода также неоднородна и может подразделяться на сильно- и слабосвязанную. Критерием такой дифференциации можно считать депрессию температуры замерзания, связанную с понижением свободной энергии Гиббса [3]. В процессах замораживания-оттаивания фазовый состав смеси изменяется, поскольку свободная и часть связанной воды переходит в фазу гексагонального льда, происходит кристаллизация и рекристаллизация сахаров, формируются кристаллы жира.

Именно поэтому мороженое с повышенным содержанием воды (молочное, плодово-ягодное) требует обязательного применения эффективных стабилизаторов или стабилизационных систем для предотвращения появления крупных кристаллов льда и рекристаллизации воды при возможных колебаниях температур в процессе хранения и транспортировки. В то же время многие виды растительного сырья содержат технологически активные гидроколлоиды и белки и при соответствующей обработке могут быть использованы в качестве загущающих и стабилизирующих компонентов в составе мороженого. Одним из наиболее перспективных видов сырья являются яблоки поздних сортов. Для активации стабилизирующих свойств яблочного пюре авторами был разработан способ гидротермической и механической обработки, повышающий в нем содержание растворимого пектина практически в три раза за счет частичной деструкции протопектина [4]. Однако для исключения вероятности неконтролируемого процесса льдообразования в мороженом, не содержащем специально вносимых гидроколлоидов, необходимы дополнительные исследования его физического состояния в условиях низких температур.

Целью настоящей работы было изучение изменений фазового состава в процессе размораживания мороженого плодово-ягодного традиционного химического состава по сравнению с мороженым этой же группы, содержащим активированное яблочное пюре, а

также мороженым молочным с активированным яблочным пюре. Из состава двух последних образцов были исключены стабилизаторы структуры, что являлось инновационным технологическим решением.

Материалы и методы исследования

Состав смесей мороженого был принят следующим.

Смесь № 1. Мороженое яблочное традиционного состава: вода – 69,74 % (в т. ч. в составе пюре яблочного); сахароза – 26 %; сухие вещества яблок – 3,6 % (из них моносахара – 2,7 %; пектиновые вещества – 0,6 % , в т. ч. до 0,12 % растворимого пектина; минеральные вещества и кислоты – до 0,3 %); лимонная кислота – 0,16 %; желатин – 0,5 %.

Смесь № 2. Мороженое яблочное с активированным яблочным пюре без желатина следующего состава: вода – 69,56 %; сахароза – 26 %; сухие вещества яблок – 4,2 % (из них моносахара – 3,15 %, пектиновые вещества – 0,7%, в т. ч. до 0,35 % растворимого пектина; минеральные вещества и кислоты – до 0,35 %); лимонная кислота – 0,24 %.

Смесь № 3. Мороженое молочное с активированным яблочным пюре: вода – 66,56 %; сахар – 15,5 %; жир – 3,5 %; сухой обезжиренный молочный остаток – 10 % (в т. ч. белка – 3,7 %, лактозы – 5,3 %, солей – 1 %); сухие вещества яблок – 4,2 % (из них моносахара – 3,15 %, пектиновые вещества – 0,7 %, в т. ч. до 0,35 % растворимого пектина, минеральные вещества и кислоты – до 0,35 %); лимонная кислота – 0,24 %.

ЯМР-спектроскопия. Спектры ЯМР получали на ЯМР-спектрометре высокого разрешения (Varian “Mercury”) с рабочей частотой 400 МГц. Использовали 90° зондирующий импульс, длительностью 3 мкс. Температура в датчике регулировалась термоприставкой Bruker VT-1000 с точностью ± 1 град. Интенсивности сигналов определялись путем измерения площади пиков с использованием (при необходимости) процедуры разложения сигнала на его составляющие в предположении гауссовской формы линии и оптимизации его нулевой линии и фазы с точностью, которая для хорошо разрешенных сигналов была не ниже 5 %, а для перекрывающихся сигналов – ± 10 %. Для предотвращения эффектов переохлаждения жидкостей в исследуемых объектах измерения концентрации проводили при нагревании образцов, предварительно охлажденных до температуры 210 К. Методика ЯМР-измерений подробно описана в [5–8].

Из полученных спектров определяли интенсивности сигналов незамерзшей воды, сахара и жира. Известные концентрации указанных веществ в изучаемых смесях позволяли рассчитать зависимости их концентрации от температуры. По соотношению концентраций незамерзающей воды и сахаров определяли температурные зависимости концентрации сахаров в незамерзшей части воды. Распределения по радиусам наночапель размерзающейся воды определяли в соответствии с уравнением Гиббса-Томпсона [9]. При этом предполагалось, что в процессе замораживания вода замерзает в виде кристаллов

гексагонального льда, не содержащего добавок растворенных веществ, а размер наночапель воды в момент размораживания отвечает размерам кристаллов льда.

Оптическая микроскопия. Микрофотографирование эмульсий осуществляли с помощью микроскопа Primo Star (Carl Zeiss, Германия).

Результаты и обсуждение

Спектры ^1H ЯМР изученных смесей в температурном интервале $210\text{ K} < T < 280\text{ K}$ приведены на рис. 1.

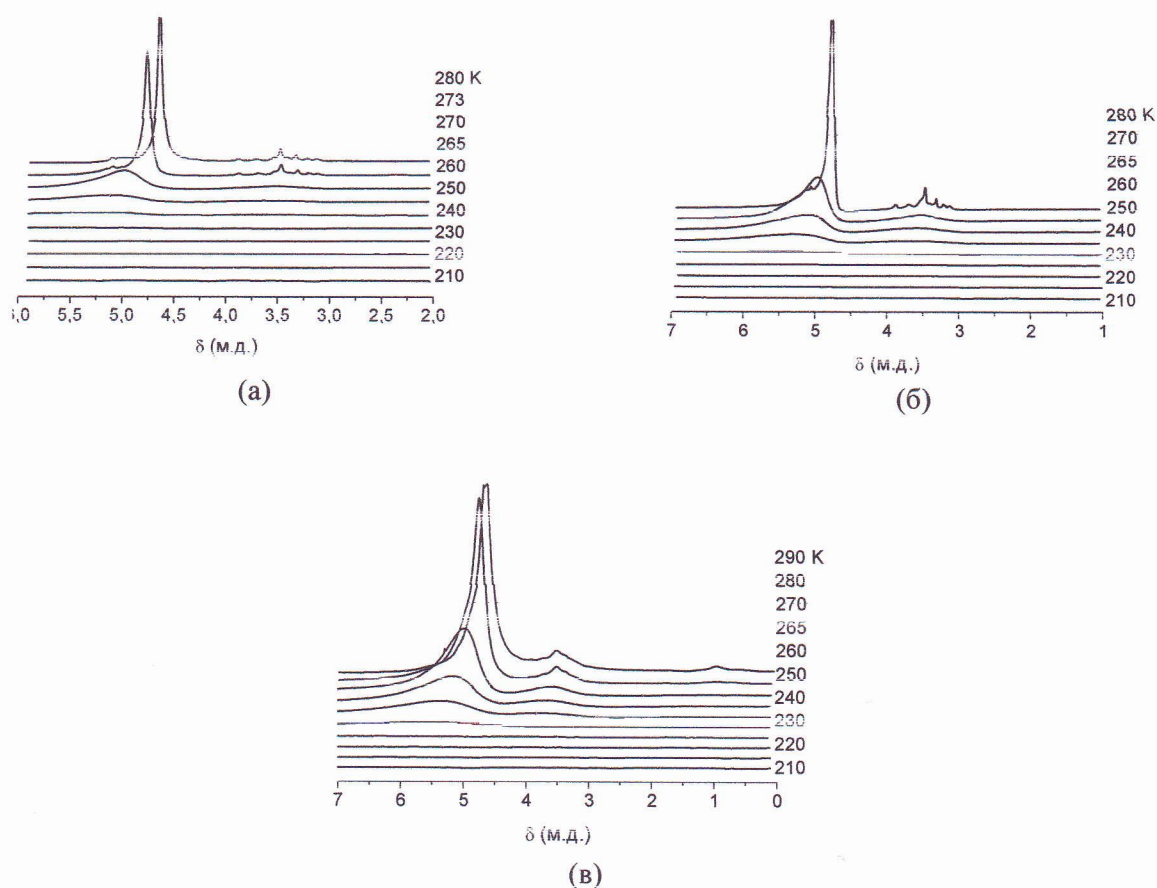


Рис. 1. Снятые при разной температуре спектры ^1H ЯМР смесей №1 (а), 2 (б) и 3 (в), полученные в температурном интервале $210 < T < 280\text{ K}$

Fig. 1. ^1H NMR specters obtained at different temperatures for mixes No.'s 1 (а), 2 (б) and 3 (в) within the range $210 < T < 280\text{ K}$

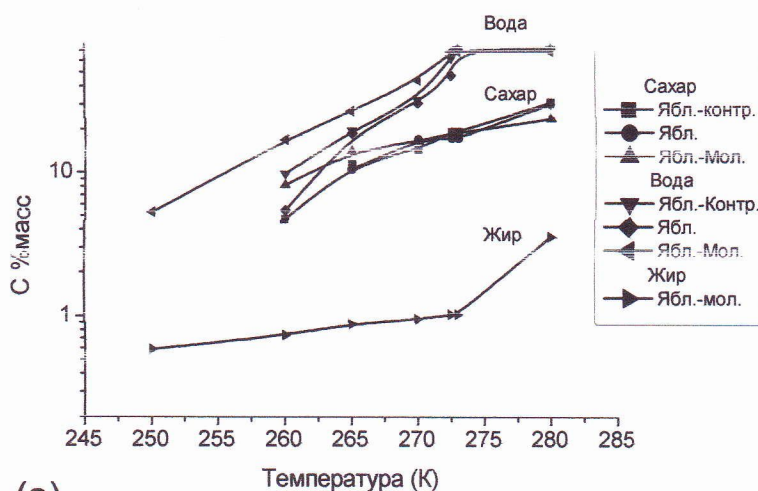
Сигналы ОН-групп незамерзающей воды ($\delta_{\text{H}}=4.5-5\text{ м. д.}$) и сахаров ($\delta_{\text{H}}=3-4$ и $5-5.5\text{ м. д.}$) фиксируются в спектрах при температуре $T > 240\text{ K}$. Для образца № 3, содержащего молочные компоненты, кроме этих сигналов при

$\delta_{\text{H}} 1-1.5\text{ м. д.}$ появляется сигнал метильных и метиленовых групп жиров. Молекулы белков и полисахаридов в спектрах не наблюдаются, ввиду малой подвижности их молекул. С ростом температуры интенсивность сигнала воды

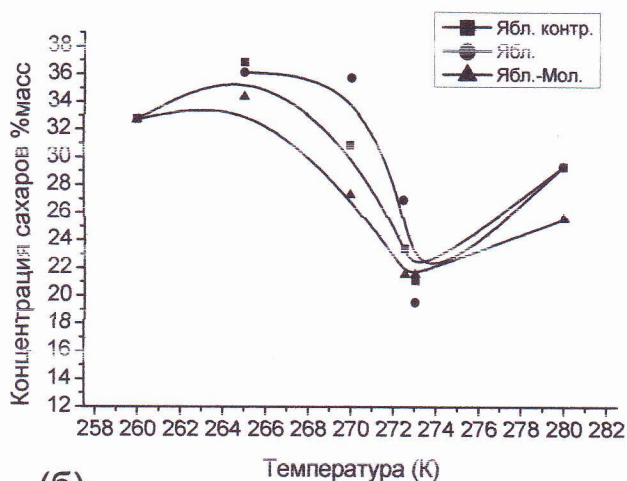
возрастает в соответствии с таянием льда, а при $T=273\text{ K}$ его ширина значительно уменьшается благодаря исчезновению фазы объемного льда. Химический сдвиг сигнала воды при этом смещается в область сильных магнитных полей (меньшей величины химического сдвига) благодаря уменьшению с ростом температуры ассоциированности воды.

Сигнал сахаров (преимущественно сахарозы) наблюдался в спектрах растаявших образцов в виде нескольких сигналов, расположенных справа и на левом крыле сигнала воды, а в замерзших – в виде широких сигналов.

Усредненная величина химических сдвигов определяется средним значением химического сдвига для отдельных гидроксильных протонов. Для образцов № 1 и 2 разрешение сигналов гидроксильных групп при положительных температурах было существенно выше, чем для образца № 3, содержащего жировые шарики (рис. 2). Вероятно, это связано с пространственной неоднородностью эмульсионной системы и ее большей вязкостью, которая во многом определяет параметры молекулярных движений.



(a)



(б)

Рис. 2. Температурные зависимости концентрации незамерзающей воды, сахаров и жира (а) и рассчитанные на их основе зависимости концентрации сахаров в незамерзающей воде (б)

Fig. 2. Temperature dependencies of concentration of non-freezing water, sugars, and fat (a) and derived dependencies of sugar concentration within non-freezing water (б)

На рис. 2а приведены температурные зависимости концентрации воды, сахарозы и жира, рассчитанные по интенсивностям соответствующих сигналов в спектрах ЯМР. При этом концентрации нормировались относительно значений концентрации H_2O , сахаров и жиров, которые для изученных образцов приведены выше. По соотношению концентраций незамерзающей воды и сахаров рассчитывались температурные зависимости концентрации сахаров в незамерзшей фазе (рис. 2б).

Предполагая, что депрессия температуры замерзания воды и изменение свободной энергии Гиббса для льда (ΔG) связаны соотношением $\Delta G = 0.036 \cdot (273 - T)$ [8], на основании зависимостей концентрации незамерзающей воды от температуры, приведенных на рис. 3а, были рассчитаны взаимосвязь между величинами ΔG и концентрация незамерзающей воды, отнесенной к единице массы сахаров и нерастворимых в воде веществ C_{uw} (рис. 3).

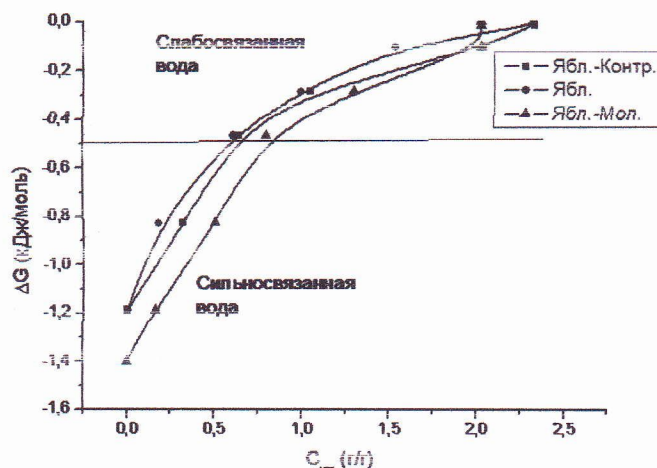


Рис. 3. Зависимости изменения свободной энергии Гиббса от концентрации незамерзающей воды для смесей мороженого, содержащих яблочную компоненту

Fig. 3. Dependencies of changes in Gibbs free energy from concentration of non-freezing water for ice-cream mixes with apple component

Понижение температуры замерзания воды в гетерогенных системах, содержащих добавки низкомолекулярных веществ (сахара, соли, кислоты), обусловлено уменьшением свободной энергии воды, что связано с формированием гидратных оболочек диспергированных частиц (преимущественно биополимеров) и растворенных молекул. Как было показано в [3], в зависимости от эффективности молекулярных взаимодействий гидратная вода может быть сильно- и слабосвязанной. При этом сильносвязанной водой является вода, для которой величина $\Delta G < -0,5$ кДж/моль

(температура замерзания $T < 260$ К). Поскольку в спектрах, приведенных на рис. 1, сигнал незамерзающей воды фиксируется только при температуре $T \geq 250$ К, можно считать, что большая часть воды является слабосвязанной. Разделение воды на сильно и слабосвязанную может быть осуществлено по графикам зависимостей $\Delta G(C_{uw})$ (рис. 4). Параметры разных типов незамерзающей воды и рассчитанная в соответствии с описанной в [3] методикой величина межфазной энергии системы сахар (нерастворимая составляющая) – вода, приведены в таблице.

Таблица. Характеристики слоев незамерзающей воды для смесей мороженого, содержащих яблочную компоненту.

Table. Features of non-freezing water layers for ice-cream mixes with apple component

Смесь	C_{uw}^s , г/г	C_{uw}^w , г/г	ΔG^w , кДж/моль	ΔG^s , кДж/моль	γ^s , Дж/г
№ 1	0,50	1,80	-0,80	-1,20	50
№ 2	0,50	1,8	-0,80	-1,20	42
№ 3	0,75	1,25	-1,0	-1,40	60

Высокая концентрация растворенной в воде сахарозы позволяет предположить, что связывание воды осуществляется путем формирования гидратных комплексов с молекулами сахарозы (рис. 2б). Полное растворение сахаров, присутствующих в смесях мороженого, осуществляется при $T=280$ К, в то время как процесс таяния льда завершается при $T=273$ К (рис. 2а). Поэтому при $T=273$ К наблюдается минимальное значение концентрации сахаров в незамерзающей воде. С понижением температуры концентрация сахаров вновь возрастает, достигая для содержащих яблочное пюре смесей своего максимального значения при $T=266$ К. Рост концентрации сахаров при $T < 273$ К свидетельствует о том, что в этом температурном интервале происходит преимущественная кристаллизация воды. Вероятно, остаточная вода концентрируется вблизи растущих кристаллов (или кристаллитов)

сахарозы, формируя связанные с ними гидраты растворенных молекул сахаров. Для образцов №1 и №2 формы кривых $C_{сах}(T)$ близки. Несколько ниже проходит кривая $C_{сах}(T)$ для образца №3. Соответственно, для образцов №1 и №2 параметры слоев связанной воды практически одинаковы (табл.), хотя величина межфазной энергии несколько различается, что обусловлено различием в форме кривых $C_{ув}(T)$ (рис. 3). В образце №3 содержание сильносвязанной воды несколько больше, что, вероятно, связано с наличием белковой компоненты.

Используя уравнение Гиббса-Томсона для понижения температуры замерзания дисперсных частиц, по зависимостям, приведенным на рис. 2а, могут быть рассчитаны распределения по радиусам кристаллов тающего льда. Соответствующие результаты приведены на рис. 4.

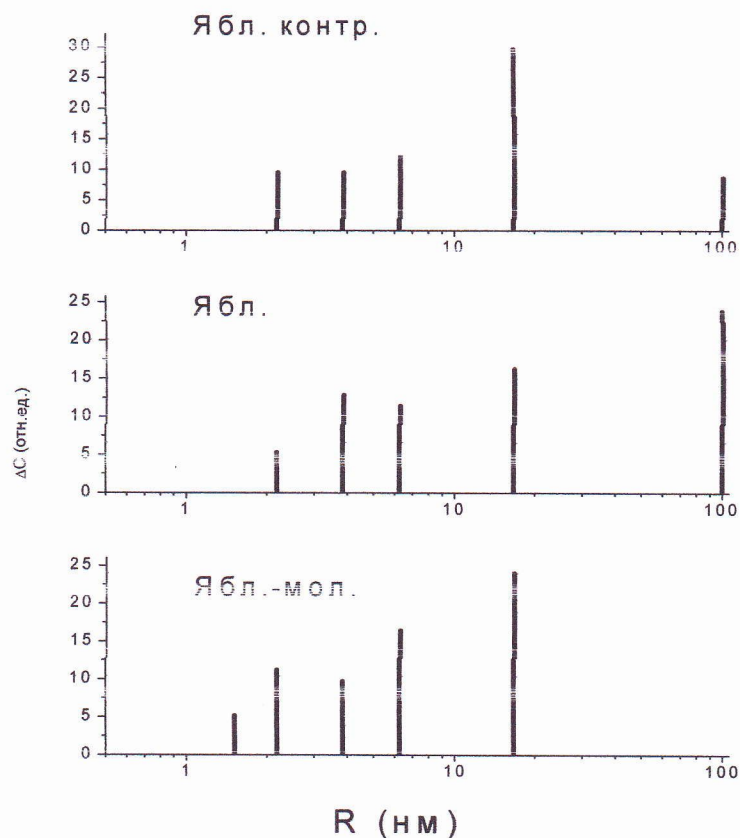


Рис. 4. Распределения по радиусам кристаллов тающего льда, в смесях мороженого, рассчитанные на основании уравнения Гиббса-Томсона

Fig. 4. Radial distribution of melting ice crystals in ice-cream mixes, calculated using the Gibbs-Thomson equation

В образце № 1 максимум распределения отвечает кристаллам с радиусом 16,6 нм. Доля более крупных образований не превышает 10 % от общего количества незамерзающей воды. Для образца № 2, в котором основное отличие рецептуры состоит в отсутствии желатина, доля кристаллов с радиусом 100 нм существенно возрастает и достигает 30 %. В смеси № 3, содержащей молочную компоненту, кристаллы с радиусом 100 нм перестают фиксироваться, но при этом значительно возрастает вклад от кристаллов с радиусом 16,6 нм.

Поскольку для микронных кристаллов льда в соответствии с уравнением Гиббса-Томсона следовало ожидать понижения температуры

размораживания лишь на десятые доли градуса (относительно 0 °С), можно предположить, что полученные распределения отражают размеры кристаллитов, входящих в состав агломератов наноразмерного льда.

Следует отметить, что кристаллизация воды из концентрированных растворов, содержащих биополимерные частицы и (или) микрокапельки жира, осуществляется путем формирования поликристаллических структур, которые могут регистрироваться методами оптической микроскопии. Микроструктура закаленного мороженого на основе изученных смесей после 30 дней хранения при температуре -24 °С, представлена на рис. 5.

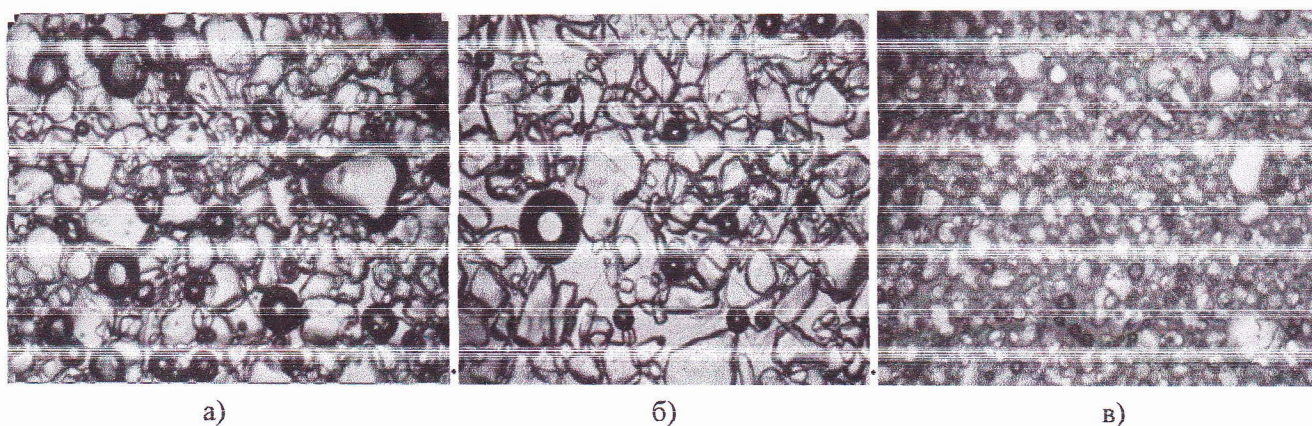


Рис. 5. Кристаллы льда в закаленном мороженом, полученном на основе смесей № 1 (а), № 2 (б) и № 3 (в) при увеличении 10×15

Fig. 5. Ice crystals in hardened ice-cream obtained from mixes No.'s 1 (a), 2 (б), and 3 (в) at 10×15 magnification

На микрофотографиях наблюдаются одиночные пузырьки воздуха с контрастной темной оболочкой на фоне прозрачных кристаллов льда неправильной формы, сформированных вследствие как взаимного сращения, так и контактов с остатками растительных волокон и объемной сеткой, образованной биополимерами (белками и полисахаридами). Средние размеры кристаллов были получены расчетным способом по диаметрам сфер, в которые вписаны эти кристаллы.

Результаты микроструктурного анализа изучаемых образцов позволяют утверждать, что характер изменения размеров кристаллов льда в них в целом соотносится с данными, представленными на рис. 4. Так, в мороженом, изготовленном из смесей № 1 и № 2, средние

размеры кристаллов льда соответственно достигали 54,7 и 68,1 мкм. В мороженом на основе смеси № 3 наблюдались кристаллы льда со средними размерами 39,9 мкм. Превышение размеров кристаллов льда, полученных расчетным путем, по сравнению с реально существующими кристаллическими образованиями объясняется различными условиями вымораживания воды в образцах для ЯМР-спектроскопии и для микроструктурных исследований. В первом случае снижение температуры до 210 К происходило в системах малого объема с высокой скоростью в процессе их подготовки к исследованиям. Во втором случае кристаллизация воды происходила постепенно, в два этапа: 1) в процессе фризирования смесей массой 4 кг при снижении температуры до -4...-6 °С на протяжении 5 мин;

2) в процессе закаливания и хранения мороженого порциями массой по 1 кг при температуре (-24±2) °С в морозильном ларе на протяжении не менее 48 часов. В процессе хранения мороженого кристаллы льда вследствие миграции воды могут значительно возрастать даже при незначительных колебаниях отрицательных температур. Тем не менее, общая тенденция распределения кристаллов вымороженной воды в смесях различного химического состава сохраняется, что подтверждает возможность применения расчетного метода.

Таким образом, очевидным является то, что в смеси № 2 полисахариды яблок не ограничивают в должной степени рост крупных кристаллов льда в отсутствие стабилизатора структуры. Для получения высокого технологического эффекта и предотвращения появления грубокристаллической структуры следует комбинировать в составе смесей молочное и растительное сырье. Яблочно-молочная смесь превосходит по физико-химическим характеристикам не только опытный образец смеси на основе активированного пюре, но и яблочную смесь, содержащую желатин.

Выводы

1. Параметры слоев связанной воды смеси на основе активированного яблочного пюре и смеси с использованием стабилизатора структуры практически одинаковы, однако величина межфазной энергии несколько отличается и составляет соответственно 42 и 50 Дж/г.
2. В образце смеси с молочной компонентой содержание сильно связанной воды больше по сравнению со смесями на основе яблочного пюре за счет присутствия молочного белка.
3. Характер распределения кристаллов льда по размерам зависит от химического состава смесей и обусловлен как величиной связанной воды, так и значением межфазной энергии.
4. Для предотвращения роста крупных кристаллов льда в мороженом при его получении и хранении в условиях низких температур рекомендовано комбинировать углеводо- и белоксодержащие пищевые ингредиенты.

Литература

1. Adapa S., Schmidt K. A., Jeon I. J., Herald T. J., Flores R. A. Mechanisms of ice crystallization and recrystallization in ice cream: A review // *Food Reviews International*. 2000. Vol. 16(3). P. 259–271.
2. Маршалл Р. Т., Гофф Г. Д., Гартел Р. У. Мороженое и замороженные десерты. Перев. с

англ. под ред. В.И. Василевского. Спб.: "Профессия", 2005. 376 с.

3. Туров В. В., Гунько В. М. Кластеризованная вода и пути ее использования Киев: "Наукова думка". 2011. 313 с.
4. Полищук Г. Е., Мацько Л. М., Соколенко А. И. Активация функционально-технологических свойств яблочного пюре при производстве мороженого // *Вестник Могилевского государственного университета продовольствия*. 2012. № 1(12). С. 70–75.
5. Turov V. V., Leboda R. Application of ¹H NMR spectroscopy method for determination of characteristics of thin layers of water adsorbed on the surface of dispersed and porous adsorbents // *Advances in Colloid and Interface Science*. 1999. Vol. 79, No. 2–3. P. 173–211.
6. Gun'ko V. M., Turov V. V., Bogatyrev V. M., Zarko V. I., Leboda R., Goncharuk E. V. et al. Unusual properties of water at hydrophilic/hydrophobic interfaces // *Advances in Colloid and Interface Science*. 2005. Vol. 118, No. 1–3. P. 125–172.
7. Becker E. D. *High Resolution NMR. Theory and Chemical Applications*. London Academic Press, 2000. 424 p.
8. Petrov O. V., Furo I. NMR cryoporometry: Principles, application and potential // *Progress in NMR*. 2009. Vol. 54. P. 97–122.
9. Фролов Ю. Г. Курс коллоидной химии. Поверхностные явления и дисперсные системы. М.: "Химия", 1988. 464 с.

Pateikta spaudai 2013-02

G. Polishchuk, L. Matsko, R. Ramanauskas, T. Krupskaya, V. Turov

STUDY OF THE DEFROSTING PROCESS OF APPLE PUREE ICE – CREAM BY LOW TEMPERATURE ¹H NMR SPECTROSCOPY

Summary

¹H NMR spectroscopy was used to study the defrosting process of the principal components of apple puree ice-cream within the range of -60 °C to 0 °C.

¹H NMR specters were obtained for a standard mix as well as for mixes stabilized with apple puree with an increased content of soluble pectin. It was established that for mixes based on activated apple puree and mixes with structural stabilizer used the ratio of strongly and weakly bound water to the aggregated concentration of dry sugars and biopolymers was virtually identical, with due consideration for certain differences in interfacial energy. Yet the parameters for layers of bound water display a significant difference in the presence of milk proteins, which results in increased content of strongly bound water in milk and apple ice-cream mix. It was established that the radial distribution pattern of ice crystals depends on the chemical composition of the mixes and is influenced both by the quantity of bound water and the value of

interfacial energy. The size of ice crystals decreases in the presence of such efficient moisture retainers as gelatin and milk proteins. Microscopic examination of hardened ice, obtained from the studied mixes, confirmed the general trend detected for distribution of frozen-out water crystals in various mixes.

The results obtained through the studies can be applied to issue recommendations for the use of carbohydrate and protein mixes in production of ice with high water content. The 3D structures formed in such mixes will prevent formation of coarse-grained structures in the products obtained and stored at a low temperature.

Keywords: ice cream, phase composition, NMR spectroscopy.

G. Poliščiuk, L. Macko, R. Ramanauskas, T. Krupskaja, V. Turov

VALGOMŪJŲ LEDŲ SU OBUOLIŲ TYRE TIRPIMO PROCESO TYRIMAS PANAUDOJANT ŽEMOS TEMPERATŪROS ¹H BMR- SPEKTROSKOPIJĄ

Santrauka

¹H BMR-spektroskopijos metodas taikytas valgomųjų ledų su obuolių tyre tirpimo proceso analizei. Tirpimo temperatūra buvo nuo -60 °C iki 0 °C. Tyrimo metu gauti standartinės sudėties obuolių tyrės mišinių ¹H BMR spektrai. Šie mišiniai taip pat analizuoti juos stabilizavus su obuolių tyre. Nustatyta, kad vandens užšalimo taško

mažėjimo kryptis priklauso nuo jo laisvos energijos pokyčio mažėjimo krypties. Pastarasis reiškinys susijęs su disperguotų dalelių hidratacinių apvalkalėlių formavimusi. Analizuotas silpnai ir stipriai sujungto vandens kiekio ir sausųjų medžiagų kiekio santykis. Nustatyta, kad jis nekinta obuolių tyrę sumaišius su struktūros stabilizatoriais. Tačiau vandens sluoksnių hidratacijos parametrai kito pieno baltymų įtakoje. Žymiai padidėjo stipriai sujungto vandens kiekis pieno – obuolių valgomųjų ledų mišinyje. Nustatyta, kad vandens kristalų dydis priklauso nuo mišinio sudėties ir tarpfazinės energijos dydžio. Ledo kristalų dydis mažėja panaudojant tokius efektyvius vandenį sujungiančius agentus, kaip želatina ir pieno baltymai. Norint užtikrinti didelį technologinį efektą ir anuliuoti stambiakristalinę valgomųjų ledų struktūrą būtina parinkti gerą pieno ir augalinės kilmės santykį mišinyje. Užgrūdintų valgomųjų ledų tyrimas mikroskopu patvirtino spektroskopiniu metodu nustatytą užšaldyto vandens kristalų tiesinių parametru charakteristiką įvairios sudėties valgomuosiuose leduose.

Tyrimų pritaikymui praktikoje paruoštos rekomendacijos kombinuotos sudėties valgomųjų ledų gamybai panaudojant mišinius, sudarytus iš angliavandenių ir baltymų. Šių mišinių erdvinė struktūra eliminuoja stambiakristalinių struktūrų susidarymą valgomųjų ledų gamybos ir laikymo metu.

Raktažodžiai: valgomieji ledai, fazinė sudėtis, BMR-spektroskopija.