

УДК 637.073, 637.3.071

UDC 637.073, 637.3.071

ИЗУЧЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ВОДЫ В СТРУКТУРЕ СЛАДКИХ ПЛАВЛЕННЫХ СЫРОВ МЕТОДАМИ ЯМР-РЕЛАКСОМЕТРИИ¹

STUDY OF WATER IN THE STRUCTURE OF SWEET PROCESSED CHEESE BY NMR RELAXOMETRY METHODS¹

Маремшаов Асланбек Борисович
аспирант

Maremshaov Aslanbek Borisovich
postgraduate student

Евдокимов Иван Алексеевич
д.т.н., профессор

Evdokimov Ivan Alekseevich
Dr.Sci.Tech., professor

Гордиенко Людмила Александровна
к.т.н., ст. преподаватель

Gordienko Lyudmila Aleksandrovna
Cand.Tech.Sci, senior lecturer

Шрамко Мария Ивановна
к.б.н., ассистент
*Северо-Кавказский федеральный университет,
Ставрополь, Россия*

Shramko Maria Ivanovna
Cand.Biol.Sci., assistant
North Caucasus federal university, Stavropol, Russia

Лепилкина Ольга Васильевна
д.т.н., профессор
*Государственное научное учреждение
Всероссийский научно-исследовательский
институт маслоделия и сыроделия, Углич, Россия*

Lepilkina Olga Vasileva
Dr.Sci.Tech., professor
*State Scientific Institution All-Russian Scientific
Research Institute of Butter and Cheese, Uglich,
Russia*

Фиалкова Евгения Александровна
д.т.н., профессор
*Вологодская государственная
молочнохозяйственная академия имени Н.В.
Верещагина, Вологда, Россия*

Fialkova Eugenia Aleksandrovna
Dr.Sci.Tech., professor
*Vologda State Milk Industry Academy, VN
Vereshchagin, Vologda, Russia*

В статье определены количественное распределение и качественное состояние воды в структуре плавленых сыров. Обсуждается последовательность внесения компонентов в смесь для плавления при выработке сладких плавленых сыров

The quantitative distribution and condition of the water in the structure of processed cheese are defined in this article. The sequence of entering the components in the mixture to melt in the production of sweet processed cheeses is discussed

Ключевые слова: ПЛАВЛЕННЫЙ СЫР, СМЕСЬ ДЛЯ ПЛАВЛЕНИЯ, МЕТОД ЯДЕРНО-МАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА (ЯМР МЕТОД), МЕТОД АНАЛИЗА СИГНАЛА СВОБОДНОЙ ИНДУКЦИИ ПРОТОНОВ (ССИ МЕТОД)

Keywords: PROCESSED CHEESE, MIXTURE TO MELT, NUCLEAR MAGNETIC RESONANCE METHOD (NMR METHOD), FREE INDUCTION DECAY METHOD (FID METHOD)

В основе технологии плавленого сыра лежит процесс плавления смеси компонентов, во время которого происходят сложные физико-

¹ Работа выполнена в рамках реализации гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых по теме: «Разработка инновационных технологий кисломолочных продуктов с использованием пищевых функциональных ингредиентов» при финансовой поддержке Минобрнауки России (договор № 14.125.13.4342 – МК от 04.02.2013 г.) на базе Северо-Кавказского федерального университета.

химические процессы, ведущие к образованию связной, однородной структуры плавленого сыра.

Особая роль в процессе плавления отводится воде, которая создает необходимые условия для эффективного взаимодействия белковых молекул с солью-плавителем. В водной среде происходит ионизация соли-плавителя и дестабилизация белковых молекул, отчего существенно повышается их реакционная способность. В результате между белком и солью-плавителем протекает реакция ионного обмена: двухвалентный кальций, участвующий в построении четвертичной структуры белка, заменяется на одновалентные ионы натрия соли-плавителя, не способные выполнять роль связующих «мостиков» между субмицеллами в мицеллах белка. Это становится причиной диспергирования мицелл белка с последующим переходом субмицелл в водную среду, где в процессе охлаждения полученного расплава в статических условиях формируется качественно новая структура продукта [1, 2].

Получение плавленого сыра с устойчивой, однородной, гомогенной структурой, во многом, зависит от последовательности внесения компонентов и, в частности, воды в смесь для плавления. При производстве сладких плавленых сыров важное значение имеет и момент внесения в смесь сахарозы – водорастворимого вещества, обладающего высокими гидрофильными свойствами и способного повлиять на активность воды, следовательно, на ход процесса плавления. Результаты наших исследований по последовательности внесения компонентов [3] и практический опыт подсказывает, что вносить сахарозу надо на завершающей стадии плавления смеси компонентов.

С целью обоснования необходимой последовательности закладки компонентов в плавление агрегат при производстве сладких плавленых сыров нами были проведены исследования особенностей формирования структуры и консистенции в зависимости от момента внесения в смесь для

плавления сахарозы и воды [3,4], в которых определены модельные системы. В качестве объектов исследований были использованы 4 модельные системы, предложенные нами ранее [3]: №1(контроль); №2, №3, №4 – образцы, которые готовили путем плавления смеси компонентов, состоящей из нежирного сыра (белковое сырье), воды, сахара-песка и водного раствора натриевой соли-плавителя. Изготовление каждой модельной системы отличалось последовательностью внесения компонентов в смесь.

Модельная система № 1 (контроль) – процесс плавления проводили с учетом сложившейся практики изготовления сладких плавленых сыров: сахар-песок вносили в расплавленную массу в конце плавления, а воду, предусмотренную рецептурой, добавляли по частям перед внесением сахара-песка. Смесь плавилась легко. Частички нежирного сыра полностью расплавились. Консистенция полученного продукта была однородной, нежной, пластичной.

Модельная система № 2 – при плавлении смеси всю воду добавляли сразу вместе с раствором соли-плавителя, сахар-песок вносили в конце процесса. Смесь плавилась хуже, чем в контроле. В продукте осталось много мелких нерасплавленных частиц сыра.

Модельная система № 3 – все компоненты (нежирный сыр, сахар-песок, воду и соль-плавитель) вносили в смесь одновременно. Это значительно затрудняло процесс плавления. Частички нежирного сыра растворялись с трудом. По истечению установленного времени плавления в массе остались набухшие нерасплавленные белковые частицы, более крупные и в большем количестве, чем в образце продукта №2. Консистенция полученного продукта была несвязной.

Модельная система № 4 – вначале в смесь вносили нежирный сыр, сахар-песок, соль-плавитель и в конце процесса плавления добавляли необходимое количество воды, предусмотренное рецептурой. Плавление

этой системы также было затруднено. В продукте присутствовали нерасплавленные частицы нежирного сыра. После охлаждения в системе наблюдалось разделение фаз.

Результаты визуальных наблюдений за процессом плавления и органолептическая оценка консистенции полученных модельных образцов сыра подтверждают необходимость регламентирования последовательности внесения компонентов с целью обеспечения технологичности процесса плавления и получения продукта высокого качества. Одну из главных ролей в формировании структуры плавленого сыра играет вода, которая может находиться в различном состоянии.

Цель исследований – определить количественное распределение и качественное состояние воды в плавленых сырах в зависимости от последовательности внесения компонентов в смесь для плавления.

Интегральной характеристикой, отражающей результат взаимодействия компонентов в исследуемых белково-углеводно-солевых водных системах, является состояние воды, которая может находиться в готовом продукте, как в свободном виде, так и в различной степени связанности со всеми элементами структуры. Оценку состояния воды в полученных образцах проводили методом ядерно-магнитного резонанса (ЯМР-релаксометрии) [5] на импульсном ЯМР-релаксometре "Протон-20" с рабочей частотой для протонов 20 МГц. В образцах анализировали времена спин-спиновой ЯМР-релаксации протонов T_2 и населенность компонент А. Для этого использовали классическую последовательность импульсов Карра-Перселла-Мейбумма-Гилла (КПМГ) [6,7], в основе которой лежит облучение образцов зондирующими импульсами 90° - τ - 180° и регистрация сигналов спинового эха. Величина времени τ в последовательности КПМГ между радиочастотными импульсами равнялась ~ 100 мкс. Диаметр образца – ~ 10 мм, длительность 90° -го импульса – 1,5 мкс.

В дополнение к методу КПМГ в исследованиях использовали анализ сигналов свободной индукции протонов после 90°-го импульса (ССИ). Это давало возможность сравнивать населенности подвижной водной фракции и фракции быстрорелаксирующих протонов. По ССИ - сигналу также оценивали кажущиеся времена релаксации (T_2) отдельных протонных фракций.

Таким образом, ССИ-исследования давали возможность провести первичную оценку каждого из четырех образцов, которая показала, что весь сигнал ССИ может быть аппроксимирован суммой двух экспонент с временами релаксации T_2 , отличающимися друг от друга в 20 и более раз. Поскольку регистрируемые значения T_2 (по крайней мере для самой медленной компоненты) были сравнимы (или близки) к величинам T_2 , наблюдаемым в жидких системах (водных растворах с высокой подвижностью молекул воды), то T_2 - данные ССИ для аналогичных систем носят качественно сравнительный характер и позволяют соотнести, в основном, долю наиболее подвижных протонов в образцах №1-4 с твердой фазой образцов и проследить за ее изменением в зависимости от особенностей процесса изготовления каждого образца, а именно: от последовательности внесения компонентов в смесь при плавлении. Точные же данные о временах спин-спиновой релаксации T_2 протонов в модельных образцах были получены методом КПМГ.

Данные ССИ-исследований, полученные в результате обработки сигналов спада свободной индукции, представлены в таблице 1. Здесь же приведены отношения сигнала протонов подвижной воды (A') к сигналу быстрорелаксирующей протонной фракции (A'').

Таблица 1 – ЯМР-ССИ данные для модельных образцов

№ образца	T_2' , мс	T_2'' , мкс	A'/A''
1 (контроль)	995	26,4	15,00
2	1000	27,0	16,59
3	1028	26,5	14,69
4	922	25,0	18,20

Анализ данных таблицы 1 показывает явные различия в значениях времен релаксации протонов жидкой (T_2') и твердой (T_2'') фазы модельных образцов, свидетельствующие о существенном влиянии момента внесения сахарозы и воды в смесь во время процесса плавления на характер построения структуры плавленого сыра.

Например, осуществление процесса в объеме большого количества водной среды (образец №2) способствует ослаблению взаимодействия между структурными элементами твердой фазы.

Плавление смеси компонентов в условиях высокой концентрации сухих веществ приводит к образованию более прочных структурных связей, о чем свидетельствуют наименьшие времена релаксации протонов как жидкой, так и твердой фаз образца №4. В данном случае возможно образование белково-углеводных гидратированных комплексов, в которых молекулы воды могут быть отнесены как к быстрорелаксирующей (прочно связанная с белком вода), так и к медленнорелаксирующей протонной фракции (вода, связанная с молекулами сахарозы, присоединенными к молекулам белка). Наибольшая по сравнению с другими доля подвижной воды в образце №4 обусловлена небольшой вероятностью непосредственного контакта воды, появившейся в системе в конце процесса, с белком, который к этому времени уже прореагировал с сахарозой.

Образец №3, при изготовлении которого все компоненты вносились в смесь одновременно, характеризуется наибольшим временем релаксации протонов подвижной водной фракции ($T_1=1028$ мс), доля которой, судя по отношению A'/A'' , наименьшая по сравнению с другими исследованными образцами. В данном случае, по-видимому, происходит конкурирующее взаимодействие сахарозы и воды с белком. А на величину параметров, очевидно, оказывают совместное влияние факторы, рассмотренные при характеристиках образцов №2 (разбавление системы водой) и №4

(образование белково-углеводных гидратированных комплексов).

Образец №2, как и контрольный образец №1, по величине соотношения A'/A'' заняли промежуточное положение между образцами №3 и №4. Но отношение A'/A'' в образце №2 было несколько больше, чем в контроле, что связано, вероятно, с избытком воды на начальной стадии процесса плавления.

Как уже отмечалось, все модельные образцы (№2, №3, №4) в отличие от контрольного (№1) обладали явно выраженной гетерогенностью из-за присутствия в структуре нерасплавившихся частиц белковой природы. С целью получения дополнительной информации о возможных связях воды с белковыми частицами или другими компонентами системы нами была предпринята попытка их разделения на отдельные фазы-фракции и последующей оценки ЯМР-релаксационных свойств этих фракций. Для этого образцы центрифугировали в течение 10 мин со скоростью вращения 13000 об/мин.

Поскольку образцы имели достаточно вязкую консистенцию, разделение на фракции в центробежном поле проходило трудно. В осадок уходила небольшая часть образцов, в то время как в надосадочной части оставалась основная масса. Вследствие этого получить дополнительно ЯМР-данные удалось только для надосадочной фракции (таблица 2).

Таблица 2 – ЯМР-ССИ данные для модельных образцов после центрифугирования (надосадочная фракция)

№ образца	$T2'$,мс	$T2''$ мкс	A'/A''
1 (контроль)	951	26,8	16,22
2	910	26,7	15,14
3	1087	28,7	19,70
4	1008	21,7	16,93

Сравнение соотношения A'/A'' , приведенных в таблицах 1 и 2, показывает, что в контроле (образец №1) центрифугирование привело к повышению отношения амплитуд (населенностей), т.е. относительному

увеличению доли подвижной водной фракции. Это вполне объяснимо, поскольку с нормальным распределением тяжелых (плотных, твердых) и легких (жидких, подвижных) частиц центрифугирование, как правило, приводит к скоплению тяжелых частиц компонентов в нижней части центрифужного стакана и, соответственно, к уменьшению их доли в надосадочной фракции.

В образце №2, напротив, произошло снижение отношения A'/A'' после центрифугирования. Поскольку при изготовлении образца №2 воду вводили на начальном этапе процесса плавления, можно предположить, что часть этой воды оказалась прочно связанной с белком (возможно, локализованной в отсеках гетерогенной структуры). По-видимому, при центрифугировании нерасплавленные белковые частицы «уводят» с собой эту воду в осадок.

Возрастание отношения A'/A'' в образце №3 предполагает два взаимоконкурентных процесса. С одной стороны – это процесс, преобладающий в образце №2, т.е. появление «локализованной» или связанной с белком воды, поскольку вода была в начале процесса плавления и длительное время контактировала с белками. С другой стороны, в образце №3 вначале была и сахароза, которая может замещать воду вблизи белка и тем самым изменять его гидратацию. Сахароза, связанная с белком, может «обволакивать» белковые частицы, оставляя в них часть «локализованной» (связанной) воды. Это должно приводить к образованию более крупных частиц, что и наблюдалось нами при изготовлении модельных образцов №3 и №4, в которых сахароза присутствовала с начала процесса плавления. После центрифугирования эти частицы ушли в осадок, а в надосадочной фракции осталась сахароза, растворенная в свободной воде, которая и усилила сигнал ЯМР, о чем свидетельствует возрастание полученного отношения A'/A'' . Образование в образце №4 белково-углеводных гидратированных комплексов, ушедших

в осадок при центрифугировании стало причиной снижения отношения A'/A'' в надосадочной фракции.

Таким образом, ССИ-исследования позволили провести первичную оценку каждого из модельных образцов по соотношению между жидкой и твердой фазами их структуры, а также сделать предположения о характере взаимодействия между основными структурообразующими элементами системы "белок-сахароза-вода" в процессе их термической обработки.

Соотношение свободной и связанной воды в модельных образцах исследовали методом КПМГ, анализируя времена спин-спиновой ЯМР-релаксации протонов (T_2) и населенность компонент (A).

В результате проведенных экспериментов было установлено, что все исследованные модельные образцы характеризуются двумя экспоненциальными кривыми спада сигнала спинового эха (КПМГ- T_2 - спады). Для всех образцов эти компоненты (T_2) отличались между собой в 3-4 раза. Для обсчета кривых использовали математическую модель суммы двух функций вида $y_1=Ae^{-k_1t}$ и $y_2=Ae^{-k_2t}$, где k_1 и k_2 представляют собой тангенсы углов наклона линейных зависимостей в координатах $\ln=\ln A-kt$ и информируют о скоростях спин-спиновой релаксации отдельных компонент $1/T_2'$ и $1/T_2''$.

Результаты исследований модельных образцов методом КПМГ, представленные в таблице 3, дают информацию о распределении воды в двух протонных фракциях.

Таблица 3 – ЯМР-данные, полученные методом КПМГ

№ образца	Модельные образцы				Надосадочная фракция (после центрифугирования)			
	«свободная» вода		«связанная» вода		«свободная» вода		«связанная» вода	
	T_2' ,мс	A' ,%	T_2'' ,мс	A'' ,%	T_2' ,мс	A' ,%	T_2'' ,мс	A'' ,%
1	150	13	35	87	105	20	33	80
2	116	15-17	36	82	105	23	37	77
3	96	30	34	69	100	29	35	70
4	141	18-20	41	83	115	27	43	72

Так, в контрольном образце №1 по сравнению с другими наблюдается самая высокая доля связанной воды (87%) и, соответственно, самая маленькая – свободной (13%). Это свидетельствует о том, что при постепенном добавлении воды во время плавления компонентов создаются наиболее благоприятные условия для гидратирования белка. Влияние сахарозы, внесенной в смесь в конце плавления, на гидратацию белка в данном случае было минимальным.

После центрифугирования доля связанной воды в надосадочной фракции образца №1 уменьшилась до 80%, что может быть объяснено уходом около 7% воды, прочно связанной с белковыми частицами наиболее крупных размеров, которые перешли в осадочную фракцию (см. анализ данных таблиц 1 и 2).

В модельной системе №2, содержащей много мелких нерасплавленных частиц нежирного сыра, по сравнению с контролем наблюдается тенденция к снижению доли связанной воды. Наличие крупнодисперсных частиц белка предполагает снижения общей поверхности контакта белка с водой, что и привело к наблюдаемым результатам. При центрифугировании нерасплавленные белковые частицы нежирного сыра ушли в осадок, по-видимому, уводя с собой около 5% всей связанной воды и отдельные молекулы сахарозы, присоединившиеся к белку через молекулы воды.

В отличие от модельных образцов №1 и №2, при изготовлении которых сахароза добавлялась в смесь в конце плавления и не могла вступить в непосредственный контакт с белком по причине его сильной гидратации, при плавлении смесей образцов №3 и №4 сахароза присутствовала в самом начале процесса. Но в образце №3 изначально присутствовала и вся вода, а в образце №4 – только нежирный сыр (белок) и сахароза, вода была добавлена в конце процесса плавления.

Там, где все компоненты одновременно подвергались

термомеханическому воздействию (образец №3), получилась существенно отличающаяся от других образцов картина распределения свободной и связанной воды. Так, заселенность медленной компоненты (свободная вода) в образце №3 по сравнению с другими образцами наибольшая и составляет 30%, короткой (связанная вода) – наименьшая (70%).

Основываясь на различии механизмов связывания воды сахарами и макромолекулами белков, можно предположить следующую схему взаимодействия компонентов при изготовлении образца №3. Как высокогидрофильное вещество, сахароза преимущественно «связала» большую часть воды, существенно снизив ее подвижность (активность), на что указывает наиболее короткое время релаксации протонов «свободной» воды образца №3 ($T^2=96$ мс). Часть сахарозы вступила во взаимодействие с белком, заблокировав его некоторые гидрофильные функциональные группы, что привело к снижению доли непосредственно связанной с белком воды. Наличие большого количества визуально ощущаемых набухших нерасплавленных белковых частиц в образце №3 подтверждает образование комплексов со сложным распределением в них воды: локализованной в отсеках гетерогенной структуры, связанной как непосредственно с белком, так и через молекулы сахарозы. Молекулы воды, связанные с белком через молекулы сахарозы, обладают медленно релаксирующими протонами и потому в исходном образце (до центрифугирования) сигнал ЯМР от такой воды был отнесен на счет «свободной» воды. Этим можно объяснить тот факт, что после центрифугирования в надосадочной фракции образца №3 практически не изменилось соотношение свободной и связанной воды, т.к. ушедшие в осадок крупные белковые образования увлекли за собой и воду, связанную с белком через молекулы сахарозы. Очевидно, что количество этой воды было пропорционально ушедшей «связанной» и в результате первоначальное соотношение между «свободной» и «связанной» водой

нарушено не было.

В отличие от образца №3 при изготовлении образца №4 вода была добавлена в самом конце плавления после длительного контакта сахарозы с белком. В данном случае можно предположить, что большая часть сахарозы успела связаться с белком. Вода же, главным образом, вступила во взаимодействие с сахарозой (как связанной, так и несвязанной с белком). Это предполагает меньшую вероятность взаимодействия воды непосредственно с белком и, соответственно, большую – с молекулами сахарозы, связанными с белком. Такая вода более подвижна, что и подтверждается полученными данными ЯМР-исследований.

Выводы:

1. Методами ЯМР-релаксометрии установлены структурные различия модельных белково-углеводно-солевых водных систем, обусловленные последовательностью внесения компонентов в смесь в процессе их плавления, и сделаны предположения о характере взаимодействия между основными структурообразующими элементами системы "белок-сахароза-вода" в процессе их термической обработки.

2. Методом анализа сигналов свободной индукции протонов после 90°-го импульса (ССИ) проведена оценка каждого из модельных образцов по соотношению между жидкой и твердой фазами структуры и установлены закономерности этого соотношения от технологических особенностей процесса плавления смеси основных компонентов.

3. В модельных объектах определены времена спин-спиновой релаксации протонов водной фазы и населенность ее компонент, позволяющие судить о количественном распределении и качественном состоянии воды в плавленых сырах в зависимости от последовательности внесения компонентов в смесь для плавления.

4. На основании результатов проведенных исследований установлено, что для получения однородной консистенции сладкого

плавленого сыра необходимо обеспечить условия для максимальной гидратации белка во время плавления, избегая разбавления водой системы, чтобы реакция натрий-кальциевого обмена между солью-плавителем и белком прошла эффективно. Поэтому сахарозу, более активно, чем белок, взаимодействующую с водой, следует вносить в смесь компонентов в конце процесса плавления, а воду – необходимо добавлять по частям, поддерживая постепенный переход диспергированного белка в водную фазу и разбавляя её по мере концентрирования растворимых белковых веществ.

Работа выполнена в рамках реализации гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых по теме: «Разработка инновационных технологий кисломолочных продуктов с использованием пищевых функциональных ингредиентов» при финансовой поддержке Минобрнауки России (договор № 14.125.13.4342 – МК от 04.02.2013 г.) на базе Северо-Кавказского федерального университета.

Литература

1. Захарова Н.П. Физико-химические основы процесса производства плавленых сыров: Автореф. дис. докт. техн. наук. – М., 1992. – 43 с.
2. Захарова Н.П., Лепилкина О.В., Коновалова Т.М., Бухарина Г.Б. Структурообразование в плавленых сырах // Сыроделие и маслоделие. – 2002, №2. – С. 27-28.
3. Лепилкина О.В., Евдокимов И.А., Маремшаов А.Б. Влияние последовательности внесения компонентов на процесс плавления и качество сладких плавленых сыров // Сыроделие и маслоделие. – 2013, №4. – С. 44-46.
4. Лепилкина О.В., Захарова Н.П., Коновалова Т.М. Особенности структурообразования плавленых сыров с сахарозой // Проблемы и перспективы совершенствования производства и промышленной переработки сельскохозяйственной продукции: Материалы науч.-практ. конф. – Волгоград, 2001. – С. 154-157.
5. Farrar T.C., Becker E.D. Pulse and Fourier Transform NMR: Introduction to Theory and Methods. – New York, 1971. – 164 p.
6. Meiboom S., Gill D. Modified spin-echo method for measuring nuclear relaxation times // The Review of Scientific Instruments. – 1958. – vol. 29 (45). – P. 688-691.
7. Carr H. Y., Purcell E. M. Effects of diffusion on free precession in nuclear magnetic resonance experiments // Phys. Rev. – 1954. – vol. 94. – P. 630.

References

1. Zaharova N.P. Fisiko-himicheskie osnovy processa proizvodstva plavlennyh syrov: Avtoref.dis.doct.tehn.nauk. – M., 1992. – 43 s.
2. Zaharova N.P., Lepilkina O.V., Konovalova T.M., Buharina G.B. Strukturoobrazovanie v plavlennyh syrah // Syrodelle i maslodelie. – 2002, №2. – S. 27-28.

3. Lepilkina O.V., Evdokimov I.A., Maremshaov A.B. Vlijanie posledovatel'nosti vnesenija komponentov na process plavlenija i kachestvo sladkih plavlennyh syrov // Syrodelie i maslodelie. – 2013, №4. – S. 44-46.

4. Lepilkina O.V., Zaharova N.P., Konovalova T.M. Ossobennosti strukturoobrazovanija plavlennyh syrov s saharozoj // Problemy i perspektivy sovershenstvovanija proizvodstva i promyshlennoj pererabotki sel'skohozjajstvennoj produkcii: Materialy nauch.-pract. konf. – Volgograd, 2001. – S. 154-157.

5. Farrar T.C., Becker E.D. Pulse and Fourier Transform NMR: Introduction to Theory and Methods. – New York, 1971. – 164 p.

6. Meiboom S., Gill D. Modified spin-echo method for measuring nuclear relaxation times // The Review of Scientific Instruments. – 1958. – vol. 29 (45). – P. 688-691.

7. Carr H. Y., Purcell E. M. Effects of diffusion on free precession in nuclear magnetic resonance experiments // Phys. Rev. – 1954. – vol. 94. – P. 630.