

УДК 664

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВОССТАНОВЛЕНИЯ СУХОЙ МОЛОЧНОЙ СЫВОРОТКИ МЕТОДОМ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КАВИТАЦИИ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ВОДЫ

Лещенко Е. Г., Костенко К. В.

ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет», Ставрополь,
e-mail: lena_leshenkoo@mail.ru

Проведены опытные исследования, позволившие разработать методологию проведения экспериментального изучения процесса восстановления сухой молочной сыворотки на ультразвуковой установке Hielscher UP 400S, а также установить влияния ультразвуковой кавитации на буферность показателя активной кислотности растворов сухой молочной сыворотки. На основе экспериментальных данных основных контролируемых физико-химических свойств восстановленных растворов сухой молочной сыворотки – плотности, вязкости, активной кислотности, активности воды, окислительно-восстановительного потенциала, была разработана нейросетевая модель процесса восстановления и проведено математическое моделирование процесса восстановления сыворотки кавитационной дезинтеграцией. Полученные уравнения регрессии, адекватно описывают процесс восстановления. Результаты данных исследований в дальнейшем будут применены для оптимизации процесса восстановления сухой молочной сыворотки, с целью использования для производства молочных сывороточных десертов.

Ключевые слова: восстановление, сухая сыворотка, ультразвуковая кавитация, электрохимически активированная вода

RESEARCH OF RECOVERY WHEY POWDER BY ULTRASONIC CAVITATION AND ELECTROCHEMICAL TREATMENT OF WATER

Leshchenko E.G., Kostenko K.V.

FSAEI HE «North-Caucasus Federal University» Stavropol, E-mail: lena_leshenkoo@mail.ru

The experimental research was conducted and they allowed to develop methodology for the experimental study of the recovery process whey powder is ultrasonically tested Hielscher UP 400S, and also establish the influence of ultrasonic cavitation on the buffer indicator acidity of whey powder solutions. Basis on experimental data the major controllable physico-chemical properties recovered solutions whey powder - density, viscosity, acidity, water activity, redox potential, was developed neural network model of the recovery process and the mathematical modeling of recovery serum cavitation disintegration. On the basis of experimental data the major controllable physico-chemical properties that was recovered solutions whey powder - density, viscosity, acidity, water activity, redox potential, was developed neural network model of the recovery process and the mathematical modeling of recovery serum cavitation disintegration. The resulting regression equations that adequately describe the recovery process. Results of these studies will be used in future for optimize the process of recovery of whey powder, with the view of using recovery of whey powder in production.

Keywords: recovery, dry whey, ultrasonic cavitation, electrochemically activated water

При производстве некоторых видов молочной продукции, такой как сыры, творог, казеин, остается большое количество побочного продукта – молочной сыворотки.

Получение данного побочного продукта на сегодняшний день достигло действительно колоссальных объемов. Ежегодно в мире после производства сыров, творога и казеина остается более 170 млн. т молочной сыворотки и с годами объемы только растут пропорционально росту переработки молока. До недавнего времени, эти колоссальные объемы достаточно ценного продукта зачастую не использовались, большая часть сыворотки просто сливалась в канализацию или шла на корм скоту. Переработка сыворотки с целью использования в пищу человеком, являлась не рентабельной, и сама природа натуральной сыворотки не позволяла широко использовать в пищевых продуктах.

Стоит отметить одной из основных проблем при использовании молочной сыворотки в производстве продукции является её малые сроки хранения. Молочную сыворотку рекомендуют перерабатывать уже через 1-3 часа после её получения, при этом основным способом переработки является сушка различного вида с последующим получением сухой молочной сыворотки. При промышленной переработке молочной сыворотки на производство сухой сыворотки приходится 60% от всех видов переработки. Данный вид переработки позволяет увеличить сроки хранения сыворотки до полугода, что является достаточным для реализации всего полученного объема сухой молочной сыворотки (СМС).

В связи с этим возникает обратная задача по восстановлению СМС для дальнейшего использования после консервации. При этом промышленность формирует следую-

щие требования к качественным показателям восстановленной молочной сыворотки:

- получение стабильных растворов на основе сухой молочной сыворотки;
- приближенность свойств полученных растворов показателям, присущих натуральной сыворотке, которая была до получения сухого концентрата;
- отсутствие в рецептуре химических стабилизаторов, консервантов;
- получение растворов СМС с требуемыми физико-химическими свойствами, соответствующими конкретным видам готовой продукции, в том числе показателем активной кислотности.

Для соответствия данным требованиям для получения восстановленной сыворотки возможно применить метод ультразвуковой кавитации (КД-обработки) и электрохимической обработки воды и получить восстановленный продукт с необходимыми физико-химическими свойствами, и высокой стабильностью.

Материалы и методы исследования

Для восстановления использовали деминерализованную молочную сыворотку с уровнем деминерализации 50% ГОСТ Р 53492-2009 «Сыворотка молочная сухая». Данная сыворотка наиболее часто встречается в рецептурах напитков повышенной биологической ценности, продуктах детского питания и молочных десертов.

В исследованиях использовалось несколько типов оборудования: ультразвуковой процессор Hielscher UP400S мощностью 400 Вт (Германия, компания Hielscher) и электроактиватор воды «Мелеста» (Россия, ООО «Мелеста»). Католит электроактивированной воды получали путем ее обработки в течение 15 минут в электроактиваторе «Мелеста». Для измерения уровня активной кислотности использовался рН-метр Эксперт-001-1.0.1 лабораторный, укомплектованный комбинированным датчиком измерения рН - ЭСК-10601. Измерения были проведены в соответствии с методикой, разработанной во ВНИИМ им. Д. И. Менделеева: «Методика выполнения измерений рН молока и молочных продуктов» № ВНИМИ -03/98[5]. Уровень концентрации растворов СМС изменяли, начиная с 1 % до значения, при котором дальнейшее увеличение концентрации СМС не приводило к регистрируемому изменению величины рН.

Результаты исследования и их обсуждение

Основным технологическим оборудованием для КД-обработки (кавитационной дезинтеграции), являлся ультразвуковой

процессор Hielscher UP 400S (Рисунок 1) мощностью 400 Вт и частотой колебаний 24 кГц. Данный прибор представляет из себя генератор (источник энергии) и преобразователь (сонотрод). Сонотроды в свою очередь являются тем устройством, которое передает ультразвуковые колебания в обрабатываемую среду.

Методология работы на ультразвуковой установке HielscherUP400S возможно разделить на два этапа, подготовительный и рабочий.

Подготовительный:

1. Установка выбранного сонотрода в ультразвуковой процессор.
2. Подключение к интерфейсу ПК Vox UPCT-L температурного зонда.
3. Подключение к компьютерной рабочей станции по средствам интерфейса ПК Vox UPCT-L

Рабочий:

1. Установка режимов обработки в управляющей программе UPCT-L (время обработки, с.; амплитуда механических колебаний, %; дробность цикла работы установки, от 0 до 1.)
2. Установка образца на предметный столик в звукозащитном боксе установки. (объем, глубина погружения, тип тары)
3. Извлечение обработанного образца.
4. Очистка рабочих поверхностей сонотрода и поверхностей звукозащитного бокса.

Результаты обработки напрямую зависят от выбора сонотродов и режимов работы оборудования. В связи с этим имелаась задача выбора наиболее оптимальной конфигурации оборудования и его режима работы.

Проведя анализ использования ультразвукового оборудования в пищевой промышленности и, исходя из физико-химических свойств исследуемой среды, были установлены следующие критерии для подбора рациональных режимов и комплектации ультразвукового процессора [1, 2, 3, 4, 6, 7]:

- внесение большого количества энергии за меньший промежуток времени;
- минимальное различие температуры от начала обработки до её завершения;
- применимость сонотрода при объемах до 500 мл.

По данным критериям проведено аппаратное исследование ультразвукового процессора с четырьмя различными сонотродами, которые соответствуют установленным выше критериям.

Проведенное аппаратное исследование обладало следующими условиями и порядком:

- при аппаратном исследовании использовались сонотроды Н3, Н7, Н14, Н22
- замеры были произведены при значениях амплитуды 20% и 100% для каждого типа сонотрода;

- время обработки 10 и 120 секунд.
- обрабатываемой средой являлась питьевая вода;
- параметр «Цикл» (пределы регулирования параметра от 0 до 1) во всех замерах был установлен на максимальное значение – 1, что соответствует непрерывной работе установки в течение заданного времени.



Рис. 1. Ультразвуковой процессор HielscherUP400S: 1 – ультразвуковой процессор; 2 – звукозащитный бокс; 3 – соноотрод

Анализ полученных зависимостей позволяет установить, что выделяемая при

ультразвуке энергия не всегда зависит от размера и диаметра соноотрода. На это указывает и тот факт, что при одинаковом времени обработки, которое в данном случае было равно 120 секундам, соноотрод Н14 выделил в систему на 3973,36 Вт·с больше чем соноотрод Н22, хотя соноотрод Н22 имеет больший диаметр, чем Н14.

Результаты данного аппаратного исследования представлены в таблице Таблица 1. Название соноотродов в таблице соответствует их основному геометрическому параметру – диаметру. К примеру, соноотрод Н22 имеет сечение диаметром 22 мм. Данное правило распространяется и на остальные соноотроды в таблице Таблица 1.

Проведенное аппаратное исследование позволило определиться с необходимой комплектацией данного аппарата с учетом заданных критериев. Основным соноотродом был принят соноотрод Н22, так как он обладает максимальными характеристиками вносимой энергии в обрабатываемую среду при кратковременной обработке, а также при его применении не происходит значительного повышения температуры.

Полученные результаты аппаратного исследования были использованы при исследовании влияния ультразвуковой кавитации на буферность показателя активной кислотности растворов сухой молочной сыворотки.

В этом исследовании использовалась вода, активированная различными способами: католит электроактивированной воды (рН=10,5-11,0 ед.), кавитационно-дезинте-

Таблица 1

Результаты аппаратного исследования ультразвукового процессора HielscherUP400S

Соноотрод	Амплитуда (интенсивность), %	Цикл, %	Энергия, Вт·с	Время, с	Начальная температура, тн, °С	Конечная температура, тк, °С	тк- тн
Н22	20	100	911,39	10	22	22,8	0,8
Н22	20	100	9981,15	120	22	31,4	9,4
Н22	100	100	2414,3	10	24,5	25,7	1,2
Н22	100	100	29164,1	120	23,3	45,4	22,1
Н14	20	100	852,26	10	21,1	21,6	0,5
Н14	20	100	14461,7	120	20,7	33,3	12,6
Н14	100	100	2893,66	10	20,5	23,4	2,9
Н14	100	100	33137,5	120	20,4	47	26,6
Н7	20	100	588,28	10	21,1	21,6	0,5
Н7	20	100	7103,22	120	21,6	27,5	5,9
Н7	100	100	1140,8	10	20,7	21,4	0,7
Н7	100	100	12366,4	120	21,4	31	9,6
Н3	20	100	268,9	10	20,8	20,8	0
Н3	20	100	3163,58	120	20,8	22,2	1,4
Н3	100	100	619,31	10	20,3	20,6	0,3
Н3	100	100	7413,78	120	20,6	24,7	4,1

грированная вода (рН=8,00-8,15 ед.) и католит воды, подвергшийся кавитационной дезинтеграции (рН=10,5-11,5 ед.). В качестве контроля использовали питьевую воду (рН=7,85-8,15 ед.).

Основным контролируемым параметром являлся уровень активной кислотности (рН, ед.). По полученным значениям рН построены графики зависимости уровня активной кислотности раствора от процентного содержания в нем сухой молочной сыворотки, приведенные на Рис. 2 и Рис. 3.

На рисунках Рис. 2 и Рис. 3 приведены графические зависимости и уравнения, адекватно описывающие экспериментальные данные. Данные зависимости ближе всего описывает степенная функция с отрицательным степенным значением.

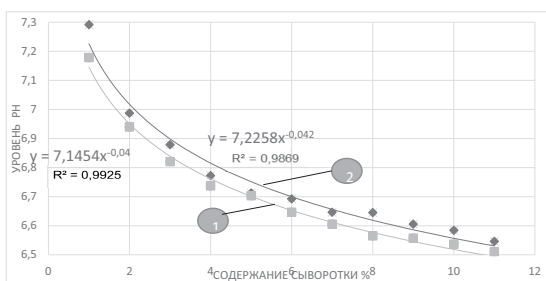


Рис. 2. Зависимость уровня рН от процентного содержания сухой молочной сыворотки: 1) с применением кавитационной дезинтеграции, при использовании питьевой воды 2) без применения кавитационной дезинтеграции, при использовании питьевой воды

Анализ полученных зависимостей позволил установить общую закономерность для всех типов растворов: при увеличении процентного содержания СМС в анализируемых растворах снижается уровень активной кислотности и уменьшается разность уровня рН между близкими значениями процентного содержания СМС, что, предположительно, связано с буферностью получаемой коллоидной системы.

Кроме общей закономерности снижения активной кислотности от процентного содержания СМС, также установлено, что дополнительная активация католита путем кавитационной дезинтеграции приводит к снижению рН раствора в среднем на 0,12 ед. При аналогичной обработке питьевой воды величина рН раствора снижается более интенсивно и составляет, в среднем, 0,5 ед.

Проведенные исследования показали, что применение католита и кавитационно-дезинтегрированного католита взамен питьевой воды для приготовления растворов СМС целесообразно при концентрациях СМС до 8%. Дальнейшее увеличение содержания СМС в растворе приводит к форми-

рованию системы со значениями активной кислотности, близкими к рН =6,5.

В этой связи определённый научный интерес представляет возможность изучения получения растворов молочной сыворотки путем предварительного смешивания СМС и активированной воды с последующей кавитационной дезинтеграции с целью их эффективного смешивания.

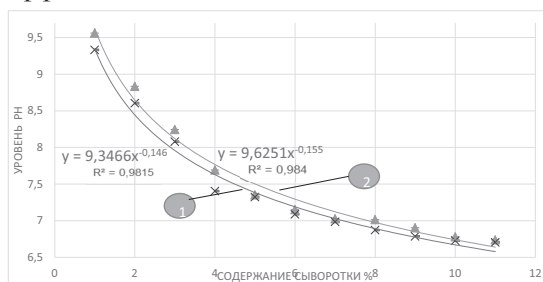


Рис. 3. Зависимость уровня рН от процентного содержания сухой молочной сыворотки: 1) с применением кавитационной дезинтеграции католита 2) без применения кавитационной дезинтеграции католита

Следующим экспериментальным исследованием являлось: исследование по установлению влияния активированных сред на основные параметры восстановленной молочной сыворотки, путем предварительного смешивания СМС и активированной воды с последующей кавитационной дезинтеграции с целью их эффективного смешивания.

Основными контролируемыми физико-химическими свойствами восстановленных растворов молочной сыворотки являлись: активная кислотность (рН, ед.), окислительно-восстановительный потенциал (ОВП, мВ), вязкость (η , мПа), плотность (ρ , кг/м³) и активность воды (a_w , ед.).

В работе применялся следующий порядок получения восстановленной сыворотки. Сухую молочную сыворотку предварительно растворяли в воде в соотношении, определяемом требуемой концентрацией раствора – от 5 до 20% сухой молочной сыворотки от объёма раствора. Значения концентраций растворов были определены по результатам анализа рецептур молочных продуктов, вырабатываемых с применением сухой молочной сыворотки.

Полученные растворы подвергались обработке путем кавитационной дезинтеграции на ультразвуковом процессоре «Hielscher Ultrasound UP-400S» разной интенсивности и временной продолжительности. Интенсивность регулировалась изменением амплитуды, которая задавалась аппаратно от 20 до 100% с учетом технических характеристик аппарата.

Продолжительность обработки устанавливали в пределах от 10 до 90 секунд. Максимальная продолжительность обработки в 90 с обусловлена значительным повышением температуры обрабатываемой среды на 25-30 °С при максимальной интенсивности обработки, что нежелательно для обеспечения высоких качественных показателей восстановленной сыворотки. Кроме того, известно, что при нагревании молочной сыворотки до 50 °С начинается процесс агрегации глобул белка, обусловленный их денатурацией. Денатурированные белки, потеряв устойчивость, при 75-80 °С образуют хлопья, которые медленно оседают. Порог денатурации сывороточных белков находится на уровне 50-65 °С, а их видимая коагуляция наблюдается при 75-80 °С.

При планировании и организации исследования применена методика трехфакторного эксперимента на основе греко-латинских квадратов с дальнейшей обработкой в программном комплексе Statistica 8.0. Для использования метода определены неповторяющиеся сочетания факторов, из которых составлена матрица эксперимента.

Для использования метода определены неповторяющиеся сочетания факторов, из которых составлена матрица эксперимента, представленная в таблице 2.

Основными контролируемыми физико-химическими свойствами восстановленных растворов молочной сыворотки являлись ранее установленные параметры: активная кислотность (рН, ед.), окислительно-восстановительный потенциал (ОВП, мВ), вязкость (η , мПа), плотность (ρ , кг/м³) и активность воды (a_w , ед.)

Таблица 2

Матрица математического планирования эксперимента

№ точки	A, %	τ , с	C, %
	20	10	5
	20	50	12,5
	20	90	20
	60	10	12,5
	60	50	20
	60	90	5
	100	10	20
	100	50	5
	100	90	12,5

Полученные экспериментальные данные были обработаны при помощи построения нейросетевой модели с использованием программного продукта

Таблица 3

Уравнения регрессии изменения физико-химических и свойств обработанных растворов сухой молочной сыворотки

Тип воды	Параметр	Уравнение регрессии
ПВ	Вязкость	$\eta=0,217+8,98 \cdot 10^{-5} \cdot A-5 \cdot 10^{-6} \cdot A^2-0,000106 \cdot \tau-7 \cdot 10^{-6} \cdot \tau^2+5,292 \cdot 10^{-4} \cdot C+4,84 \cdot 10^{-5} \cdot C^2+7 \cdot 10^{-6} \cdot A \cdot \tau-1,1 \cdot 10^{-6} \cdot A \cdot C+3 \cdot 10^{-6} \cdot \tau \cdot C$
ПВ	Активная кислотность	$pH=7,036214-1 \cdot 10^{-3} \cdot A+5 \cdot 10^{-6} \cdot A^2-1,532 \cdot 10^{-3} \cdot \tau+1 \cdot 10^{-5} \cdot \tau^2-0,0754 \cdot C+0,0016 \cdot C^2+5 \cdot 10^{-6} \cdot A \cdot \tau+4,7 \cdot 10^{-5} \cdot A \cdot C+4,3 \cdot 10^{-5} \cdot \tau \cdot C$
ПВ	Плотность	$\rho=1000,858-0,076 \cdot A+8 \cdot 10^{-5} \cdot A^2+0,098 \cdot \tau-3,5 \cdot 10^{-4} \cdot \tau^2+4,023 \cdot C-0,0457 \cdot C^2+2 \cdot 10^{-4} \cdot A \cdot \tau+0,0048 \cdot A \cdot C-6,5 \cdot 10^{-6} \cdot \tau \cdot C$
ПВ	Окислительно-восстановительный потенциал	$ОВП=121,684-0,7275 \cdot A+0,0026A^2-0,0267\tau+0,0016 \cdot \tau^2-6,2740C+0,144C^2-0,0008A \cdot \tau+0,0265A \cdot C-0,0055\tau \cdot C$
ПВ	Активность воды	$a_w=0,9772+1,24 \cdot 10^{-4} \cdot A-1 \cdot 10^{-6} A^2+6,3 \cdot 10^{-5} \tau+1 \cdot 10^{-7} \tau^2-4 \cdot 10^{-7} C-1,8 \cdot 10^{-5} C^2+1 \cdot 10^{-7} A \cdot \tau-4 \cdot 10^{-6} A \cdot C-1 \cdot 10^{-6} \tau \cdot C$
ЩВ	Вязкость	$\eta=0,161+1,68 \cdot 10^{-4} \cdot A-1 \cdot 10^{-6} \cdot A^2-5,8 \cdot 10^{-5} \tau-1 \cdot 10^{-7} \tau^2+0,0162C+1 \cdot 10^{-6} C^2+1 \cdot 10^{-6} A \cdot \tau-2 \cdot 10^{-6} A \cdot C-2 \cdot 10^{-6} \tau \cdot C$
ЩВ	Активная кислотность	$pH=7,31-1,79 \cdot 10^{-3} A+4 \cdot 10^{-6} A^2-4 \cdot 10^{-6} \tau+2 \cdot 10^{-6} \tau^2-0,0953C+2 \cdot 10^{-3} C^2+2 \cdot 10^{-6} A \cdot \tau+6,8 \cdot 10^{-5} A \cdot C+3,1 \cdot 10^{-5} \tau \cdot C$
ЩВ	Плотность	$\rho=997,29-0,038A-2 \cdot 10^{-4} A^2+0,0688\tau-3 \cdot 10^{-4} \tau^2+4,5673C-0,0563C^2+1 \cdot 10^{-4} A \cdot \tau+0,0042A \cdot C-0,001C$
ЩВ	Окислительно-восстановительный потенциал	$ОВП=-210,238-2,5A-0,008A^2+1,737\tau-0,002\tau^2+5,769C-0,111C^2-0,009A \cdot \tau-0,019 \cdot C-0,015\tau \cdot C$
ЩВ	Активность воды	$a_w=0,995-1,24 \cdot 10^{-4} A+1 \cdot 10^{-7} A^2+1 \cdot 10^{-6} \tau-1 \cdot 10^{-7} \tau^2-4,1 \cdot 10^{-3} C+1,43 \cdot 10^{-4} C^2+1 \cdot 10^{-6} A \cdot \tau+1,2 \cdot 10^{-5} A \cdot C+8 \cdot 10^{-6} \tau \cdot C$

StatisticaNeuralNetworks. Построенная нейросетевая модель представляет собой двухслойный персептрон (Рисунок 4). При обучении нейросетевой модели был использован алгоритм обратного распространения. В последующем, полученные данные по результатам обучения персептрона, были обработаны в программном комплексе Statistica 8.0. Данный программный комплекс позволил получить математические модели в виде уравнений регрессии исследуемых свойств восстановленных растворов сухой молочной сыворотки.

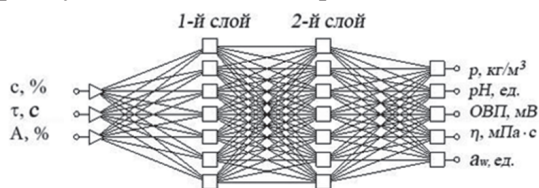


Рис. 4. Двухслойный персептрон нейронной сети: C – концентрации сухой сыворотки в растворе; τ – время обработки, A – интенсивность ультразвукового воздействия; ρ – плотность ($\text{кг}/\text{м}^3$); pH – активная кислотность; ОВП – окислительно-восстановительный потенциал, мВ ; η – вязкость, $\text{мПа} \cdot \text{с}$; a_w – активность воды.

Уравнения регрессии исследуемых растворов представлены в таблице Таблица 3 с учетом типа применяемой воды.

Заключение

Проведенные экспериментальные исследования позволили определиться с комплектацией ультразвукового процессора и установить границы исследования технологических параметров процесса ультразвуковой кавитации: при исследовании процесса восстановления сухой молочной сыворотки – используемый сонотрод для ультразвукового процессора H22; интенсивность от 20 до 100% от технической возможности ультразвукового процессора Hielscher UP 400S, время воздействия от 10 до 120 секунд. Разработана методология работы на ультра-

звуковой установке Hielscher UP 400S используемой для основных лабораторных исследований. Исследования по установлению влияния кавитационной дезинтеграции на буферность показателя активной кислотности растворов сухой молочной сыворотки, позволили определиться с границами процентного содержания сухой молочной сыворотки при котором будет происходить изменение параметра активной кислотности системы – 8% сухих веществ. Установленные уравнения регрессии, адекватно описывают процесс восстановления сухой молочной сыворотки.

Полученные результаты экспериментальных и теоретических исследований позволяют продолжить исследование процесса восстановления и будут в дальнейшем использованы для оптимизации процесса восстановления сухой молочной сыворотки.

Список литературы

1. Артемова, Я. А. Разработка технологии и товарная оценка качества молочных напитков, полученных с применением сонохимической водоподготовки: дис. ... канд. техн. наук - М., 2011. - 136 с.
2. Бахир, В.М. Электрохимическая активация водных растворов и ее технологическое применение в пищевой промышленности: обзорная информация / - Тбилиси: ГрузНИИТИ, 1988. - Вып. 3. - 80 с.
3. Бредихин, С.А. Технология и техника переработки молока / С.А. Бредихин, Ю.В. Космодемьянский, В.Н. Юрин. - М.: Колос, 2003. - 400 с.
4. Голубева, Л.В. Справочник технолога молочного производства / Л.В. Голубева. - СПб.: ГИОРД, 2005. - 272 с.: ил.
5. Методика выполнения измерений рНмолока и молочных продуктов № ВНИМИ – 03/98. Москва. г. 1998
6. Степанова, Л.И. Справочник технолога молочного производства. Технология и рецептуры. В трех томах. Т.1. Цельномолочные продукты / Л.И. Степанова. - СПб: ГИОРД, 1999. - 384 с.
7. Тёпел, А. Химия и физика молока / А.Тёпел. - Пер. с нем. под ред. канд. техн. наук, доц. С.А. Фильчаковой. - СПб.: Профессия, 2012. - 832 с.
8. Храмцов, А.Г. Феномен молочной сыворотки. - СПб.: Профессия, 2011. - 804 с.
9. Шестаков, С.Д. Получение и свойства олеофильных эмульсий на основе подсолнечного масла и их применение для смазки хлебопекарного инвентаря //Хлебопечение России. - 1996. - № 2 - С.20-22.