

Исследование фазовых равновесий в водно-солевых системах, содержащих компоненты молочной сыворотки

Светлана Е. Плотникова	¹	burkovasweta@ya.ru	 0000-0002-6331-554x
Елена М. Горбунова	¹	lobanova8686@gmail.com	 0000-0002-3550-0115
Сабухи И. Нифталиев	¹	niftaliev@mail.com	 0000-0001-7887-3061
Лилия В. Бочарова	¹	hcn_chr@mail.ru	 0009-0006-9266-2651
Анастасия М. Лучко	¹	am.luchko@mail.ru	 0009-0009-5197-4765

¹ Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия

Аннотация. В настоящее время экологичным и перспективным является использование молочной сыворотки для получения лактозы, лактулозы и других ценных продуктов, полезных для здоровья человека. Однако сыворотка содержит достаточно большое количество минеральных солей, что затрудняет процессы переработки. В процессе деминерализации широко применяются нанофильтрационные, катионо- и анионообменные мембраны и др., которые загрязняются образующимися кристаллами солей. Наименее растворимыми из неорганических веществ, присутствующих в сыворотке являются соли кальция, в связи с этим представляет интерес трехкомпонентная система $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ - CaCl_2 - H_2O . Диаграмма состояния системы $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ - CaCl_2 - H_2O при температуре 20 °C содержит информацию о фазовых равновесиях. По точкам, отвечающим составу равновесных жидких фаз, построена линия моновариантного равновесия, под которой находится область ненасыщенных растворов. Методом Скрейнмакера установлено, что в области, прилегающей к стороне $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ - H_2O кристаллизуется моногидрат дигидрофосфата кальция. Для области, примыкающей к вершине CaCl_2 , происходит совместная кристаллизация трех солей: $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ + CaCl_2 + $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. На треугольнике составов присутствуют две области совместного существования раствора и кристаллов L + $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ + $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ и L + $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ + $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. Состав кристаллизующихся твердых фаз подтвержден химическим анализом. Используя полученные данные можно создать условия для предварительной кристаллизации солей, входящих в состав молочной сыворотки, и выделение их из раствора, что уменьшит забивание пор мембран в дальнейшем процессе деминерализации сыворотки.

Ключевые слова: молочная сыворотка, деминерализация, диаграмма состояния, получение лактозы, получение лактулозы.

Research of phase equilibria in water-salt systems containing whey components

Svetlana E. Plotnikova	¹	burkovasweta@ya.ru	 0000-0002-6331-554x
Elena M. Gorbunova	¹	lobanova8686@gmail.com	 0000-0002-3550-0115
Sabukhi I. Niftaliev	¹	niftaliev@mail.com	 0000-0001-7887-3061
Liliya V. Bocharova	¹	hcn_chr@mail.ru	 0009-0006-9266-2651
Anastasiya M. Luchko	¹	am.luchko@mail.ru	 0009-0009-5197-4765

¹ Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia

Abstract. Currently, it is environmentally friendly and promising to use whey to produce lactose, lactulose and other valuable products that are beneficial to human health. However, the serum contains a sufficiently large amount of mineral salts, which complicates the recycling processes. In the process of demineralization, nanofiltration, cation- and anion-exchange membranes, etc., are widely used, which are polluted by the salt crystals formed. The least soluble of the inorganic substances present in the serum are calcium salts, in this regard, the three-component system $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ - CaCl_2 - H_2O is of interest. To study phase equilibria in the $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ - CaCl_2 - H_2O system a diagram of the state at a temperature of 20 °C is constructed. According to the points corresponding to the composition of the equilibrium liquid phases, a monovariant equilibrium line is constructed, under which there is a region of unsaturated solutions. By the method of Screinemakers, it was found that in an area with a calcium chloride content of less than 43%, calcium dihydrogen phosphate monohydrate crystallizes. For the area adjacent to the top of CaCl_2 , three salts crystallize together: $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ + CaCl_2 + $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. On the triangle of compositions there are two areas of joint existence of the solution and crystals of L + $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ + $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ and L + $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ + $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. The composition of crystallizing solid phases has been confirmed by chemical analysis. Using the obtained data, it is possible to create conditions for the preliminary crystallization of the salts that make up the whey and their isolation from the solution, which will reduce the clogging of the pores of the membranes in the further process of serum demineralization.

Keywords: whey, demineralization, state diagram, lactose production, lactulose production.

Для цитирования

Плотникова С.Е., Горбунова Е.М., Нифталиев С.И., Бочарова Л.В., Лучко А.М. Исследование фазовых равновесий в водно-солевых системах, содержащих компоненты молочной сыворотки // Вестник ВГУИТ. 2023. Т. 85. № 4. С. 139–144. doi:10.20914/2310-1202-2023-4-139-144

For citation

Plotnikova S.E., Gorbunova E.M., Niftaliev S.I., Bocharova L.V., Luchko A.M. Research of phase equilibria in water-salt systems containing whey components. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2023. vol. 85. no. 4. pp. 139–144. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2023-4-139-144

Введение

Сыворотка является ценнейшим пищевым продуктом, включающим все необходимые организму аминокислоты, минеральные вещества, витамины, лактозу. Сыворотка содержит более 200 полезных для человека ингредиентов [1]. Включение данного продукта в рацион способствует регулированию функции желудочно-кишечного тракта, улучшает процесс обмена веществ, подавляет аппетит, ускоряет метаболизм и сохраняет мышечную массу при похудении. Кроме того молочная сыворотка улучшает кровообращение, укрепляет стенки кровеносных сосудов и нормализует артериальное давление. Сыворотка способствует выработке глутатиона – антиоксиданта, положительно воздействует на состояние кожных покровов и укрепляет волосяные луковицы. Таким образом, продукты из молочной сыворотки являются важными и принятыми для диетического и лечебного питания [2, 3]. Однако сыворотка содержит достаточно большое количество минеральных солей, что затрудняет использование ее как пищевого продукта и сырья для производства. Поэтому деминерализация молочной сыворотки является актуальной проблемой в настоящее время [4].

В промышленности для деминерализации сыворотки используют 2 основных способа: электродиализная и нанофильтрационная обработка сыворотки [5].

Обессоливание сыворотки методом электродиализа является широко применяемым способом очистки от минеральных солей [6]. Максимальный уровень деминерализации сыворотки при электродиализе может достигать 90%. Получаемая в результате сыворотка имеет высокие органолептические свойства и широкий спектр применения. Однако электродиализная обработка предполагает предварительное проведение сепарирования сыворотки для ее очистки от жира, казеиновой пыли и коагулированных белков, так

как в процессе электродиализа они оседают на поверхности мембран, затрудняя их работу.

Одним из перспективных и современных методов является нанофильтрация [7, 8, 9]. Процесс нанофильтрации занимает по размеру пор мембран промежуточное место между ультрафильтрацией и обратным осмосом. Нанофильтрационные мембраны пропускают воду с растворенными в ней одновалентными минеральными веществами и задерживают основные компоненты сыворотки (лактозу, белок и др). Все мембранные методы, включая нанофильтрацию, требуют предварительной очистки сыворотки от жира и взвешенных частиц. Однако при проведении нанофильтрации возникают проблемы загрязнения пор мембран образующимися кристаллами солей [7].

В состав сыворотки входят следующие элементы, представленные в таблице 1.

Таблица 1.
Содержание основных зольных элементов в составе сыворотки

Table 1.
The content of the main ash elements in the composition of the serum

Элемент Element	Содержание, % Content, %
Калий Potassium	0,09–0,19
Магний Magnesium	0,009–0,02
Кальций Calcium	0,04–0,11
Натрий Sodium	0,03–0,05
Фосфор Phosphorus	0,04–0,10
Хлор Chlorine	0,08–0,11

Минеральные вещества в составе сыворотки представлены в виде солей органических и неорганических кислот. Количественное содержание анионов (5,831 г/л) и катионов (3,323 г/л) в молочной сыворотке аналогично содержанию микроэлементов в цельном молоке [10]. Катионы сыворотки представлены K, Na, Ca, Mg, а анионы – радикалами фосфорной, лимонной и соляной кислот. Соотношение форм производных фосфорной кислоты в воде в зависимости от pH представлено в таблице 2.

Таблица 2.
Соотношение форм производных фосфорной кислоты в воде в зависимости от pH (% молей)

Ratio of forms of phosphoric acid derivatives in water depending on pH (% moles)

Форма Form	pH							
	5	6	7	8	8,5	9	10	11
H_3PO_4	0,1	0,01	-	-	-	-	-	-
$H_2PO_4^-$	97,99	83,67	33,90	4,88	1,6	0,51	0,05	-
HPO_4^{2-}	1,91	16,32	66,10	95,12	98,38	99,45	99,59	99,53
PO_4^{3-}	-	-	-	-	0,01	0,04	0,36	3,47

Поскольку сыворотка имеет pH среды около 5, то можно предположить, что фосфор находится в молочной сыворотке преимущественно в виде дигидрофосфат-иона [10].

Ионы кальция практически не проходят нанофильтрационную мембрану, что объясняется достаточно большим радиусом в гидратированном состоянии [11]. Кроме того, соли калия и натрия хорошо растворимы, кристаллизации

будут подвергаться, в первую очередь, соли кальция. Что определило объект нашего исследования – трехкомпонентную систему хлорид кальция-дигидрофосфат кальция-вода.

Материалы и методы

Для построения фазовой диаграммы трехкомпонентной системы $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ – CaCl_2 – H_2O при заданной температуре методом Скрейнемакенса были изучены смеси компонентов на концентрационном треугольнике Гиббса–Розебома [12, 13]. 3 сечения с различным соотношением дигидрофосфата кальция и воды 5:95 (I сечение); 10:90 (II сечение); 15:85 (III сечение) представлены на рисунке 1.

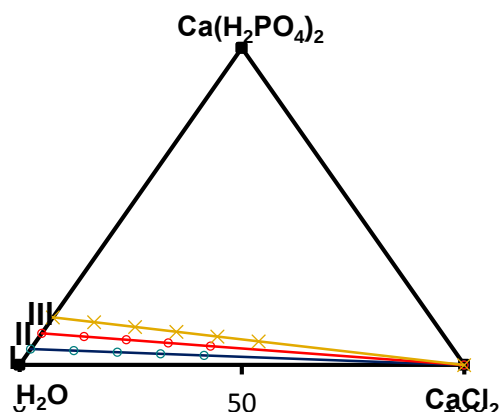


Рисунок 1. Положение разрезов в системе CaCl_2 – $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ – H_2O

Figure 1. The position of the cuts in the CaCl_2 – $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ – H_2O system

Рассчитывали массы навесок и готовили смеси трех компонентов [14]. Растворы термостатировали в течение 2 суток при температуре 20 °С в электрическом суховоздушном термостате ТСО-1/80 СПУ для установления равновесия, аналитическими методами определяли составы раствора и твердой фазы, полученных из исходной смеси. Для каждой точки сечения брали пробу жидкой и кристаллической фазы, взвешивали, растворяли в мерной колбе на 50 см³

и определяли концентрацию ионов Ca^{2+} , Cl^- и ионов фосфорной кислоты.

Все используемые реактивы имеют классификацию х.ч.

Содержание Ca^{2+} в пробах определяли титрованием в присутствии аммиачного буферного раствора (pH = 9,5) с эриохромом черным Т раствором ЭДТА с молярной концентрацией эквивалента 0,01 моль/дм³ [14]. Содержание Cl^- определяли argentометрическим методом с индикатором хроматом калия (применяли раствор нитрата серебра с молярной концентрацией эквивалента 0,01 моль/дм³).

Определение фосфора проводили фотометрическим методом с ванадато-молибдатофосфатом [15]. Для проведения анализа применяли реактив, состоящий из смеси растворов А и Б. Раствор А: 2,5 г ванадата аммония растворяли в 500 мл слабокипящей воде, после охлаждения добавляли 20 мл конц. HNO_3 и разбавляли до 1000 мл. Раствор Б: 100г молибдата аммония растворяли в 500 мл воды при 50° С. Раствор охлаждали, смешивали с 100 мл конц. H_2SO_4 , вновь охлаждали и разбавляли до 1000 мл. К раствору пробы добавляли 10 мл раствора В и при помешивании 10 мл смеси реактивов А и Б, разбавляли водой до 50 мл. Через 5 мин проводили измерение поглощения при 400 нм в кювете 30 мм относительно дистиллированной воды на КФК-2МП. Концентрацию ионов фосфорной кислоты определяли по градуировочному графику (зависимость концентрации от оптической плотности).

Содержание дигидрофосфата кальция определяли по данным фотометрического анализа. Содержание хлорида кальция рассчитывали как среднее арифметическое результатов титриметрического анализа ионов Ca^{2+} и ионов Cl^- (относительная погрешность не превышала 5%).

Результаты и обсуждения

Результаты анализа для некоторых точек представлены в таблице 3.

Таблица 3.

Состав исходной смеси компонентов, равновесной жидкой и твердой фаз

Table 3.

The composition of the initial mixture of components, equilibrium liquid and solid phase

Массовые доли в исходной смеси, % Mass fraction in the initial mixture, %			Фаза Phase	Масса пробы для анализа, г Sample weight for analysis, g	Объем ЭДТА, см ³ Volume of EDTA, cm ³	Объем AgNO_3 , см ³ Volume of AgNO_3 , cm ³	Опти-ческая плотность Optical density	Массовая доля компонентов, % Mass fraction of components, %		
CaCl_2	$\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$	H_2O						CaCl_2	$\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$	H_2O
10	4,5	85,5	ж	0,4810	5,2	9,0	0,441	10,1	4,3	5,6
10	4,5	85,5	т	0,0419	0,8	0,7	0,181	9,5	10,9	9,7
20	4	76	ж	0,4038	8,1	16,5	0,335	22,0	3,5	4,5
20	4	76	т	0,0947	3,0	3,0	0,366	17,6	17,1	5,4
10	9	81	ж	0,3698	4,5	7,0	0,557	10,3	7,6	2,1
10	9	81	т	0,0288	2,5	0,1	0,771	1,6	72,1	6,3
20	8	72	ж	0,4445	9,0	16,5	0,535	20,2	6,0	3,8
20	8	72	т	0,0856	2,3	3,0	0,527	18,4	15,3	6,2

По полученным данным строили ноды – линии, соединяющие точки исходной смеси компонентов, жидкой и твердой фазы (рисунок 2).

Три точки одной ноды должны лежать на одной прямой. Положение фигуративной точки твердой фазы на диаграмме растворимости определяется пересечением двух или нескольких лучей.

Состав жидких насыщенных фаз образует линию моновариантного равновесия. Области под линией отвечает жидкая фаза L. В области над линией образуются гетерогенные фазы, содержащие насыщенный раствор и кристаллы. Ноды направлены к точке, отвечающей составу 92,86% дигидрофосфата кальция, 7,14% воды. Это моногидрат дигидрофосфата кальция, устойчивый при данной температуре [16].

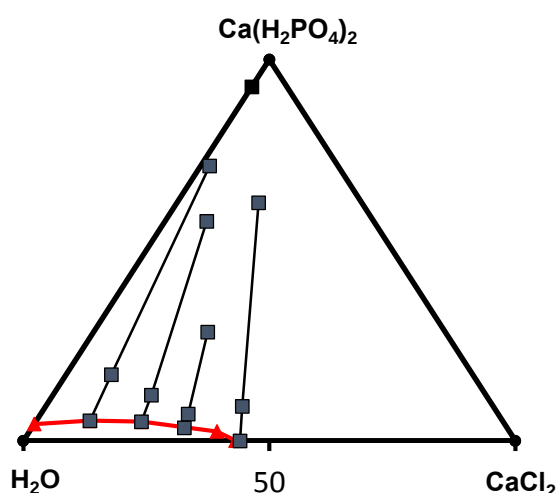


Рисунок 2. Расположение нод в системе $\text{CaCl}_2 - \text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 - \text{H}_2\text{O}$ при 20 °C

Figure 2. Location of nodes in the $\text{CaCl}_2 - \text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 - \text{H}_2\text{O}$ system at a temperature of 20 °C

В соответствии с расположением нод представлено изображение изотермы системы $\text{CaCl}_2 - \text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 - \text{H}_2\text{O}$ при 20 °C (рисунок 3). Известно [17], что при 20 °C хлористый кальций кристаллизуется из водных растворов в виде гексагидрата $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, а дигидрофосфат кальция в виде моногидрата $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$, соответствующие точки нанесены на стороны треугольника составов. На изотерме имеется поле ненасыщенных растворов L, поле кристаллизации моногидрата дигидрофосфата кальция S_1 ($L + \text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$), две области совместного существования раствора и кристаллов S_2 ($L + \text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O} + \text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$) и S_3 ($L + \text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 + \text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), трехфазная область совместного существования кристаллов трех солей S_4 ($\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 + \text{CaCl}_2 + \text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), в которой отсутствует жидкая фаза.

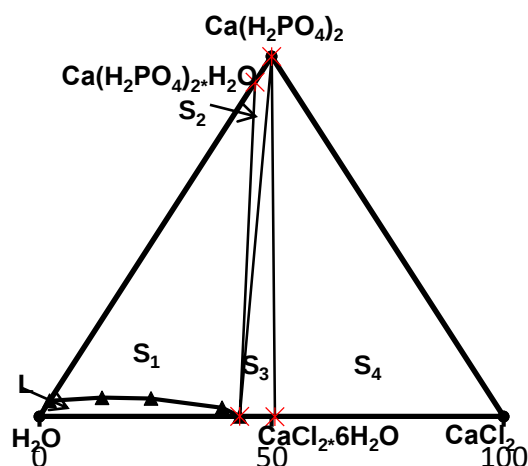


Рисунок 3. Диаграмма состояния системы $\text{CaCl}_2 - \text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 - \text{H}_2\text{O}$ при 20 °C

Figure 3. Diagram of the state of the $\text{CaCl}_2 - \text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 - \text{H}_2\text{O}$ system at a temperature of 20 °C

На диаграмме должно существовать поле кристаллизации гексагидрата хлорида кальция, но в связи с тем, что эта область находится между точкой состава кристаллогидрата (50,7% CaCl_2 , 49,3% H_2O) и точкой, отвечающей растворимости хлорида кальция (56,9% CaCl_2 , 43,1% H_2O), она мала и определить ее экспериментально сложно.

Заключение

Использование молочной сыворотки как ценного пищевого продукта и сырья для получения диетического и лечебного питания осложняется присутствием в сыворотке большого количества минеральных солей. В процессе деминерализации широко применяются нанофильтрационные, катионо- и анионообменные мембраны и др., которые часто загрязняются образующимися кристаллами солей. Наименее растворимыми из неорганических веществ, присутствующих в сыворотке являются соли кальция, в связи с этим представляет интерес трехкомпонентная система хлорид кальция-дигидрофосфат кальция-вода.

В результате полученных экспериментальных данных построена диаграмма состояния трехкомпонентной системы $\text{CaCl}_2 - \text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 - \text{H}_2\text{O}$ при 20 °C и предложен состав кристаллизующихся твердых фаз, подтвержденный химическим анализом.

Используя полученные данные, можно создать условия для предварительной кристаллизации солей, входящих в состав молочной сыворотки, и выделение их из раствора, что уменьшит забивание пор мембран в дальнейшем процессе деминерализации сыворотки.

Литература

- 1 Семенова А.А. Пищевая и биологическая ценность молочной сыворотки // Актуальные исследования. 2023. № 1 (131). С. 10–12. URL: <https://apni.ru/article/5312-pishchevaya-i-biologicheskaya-tsennost-moloch>
- 2 Белякова Т.Н., Печуркина Д.С. Функциональные продукты как тренд XXI века // Молочная промышленность. 2020. № 2. С. 46–47.
- 3 Рыбалова Т.И. Молочная индустрия России в 2018 г. // Молочная промышленность. 2019. № 1. С. 4–9.
- 4 Короткий И.А., Плотников И.Б., Мазеева И.А. Современные тенденции в переработке молочной сыворотки // Техника и технология пищевых производств. 2019. Т. 49. № 2. С. 227–234.
- 5 Сенкевич Т., Ридель К.–Л. Молочная сыворотка, переработка и использование в агропромышленном комплексе. М.: Агропромиздат, 2020. 269 с.
- 6 Золотарева М.С., Володин Д.Н., Бессонов А.С. Электродиализ – наиболее эффективный процесс деминерализации молочной сыворотки // Молочная промышленность. 2014. № 3. С. 37–38.
- 7 Тимкин В.А., Новопашин Л.А. Производство концентрата молочной сыворотки баромембранными методами // Научно-технический вестник технические системы в АПК. 2019. № 3(3). С. 91–98.
- 8 Roman A., Wang J., Csanadi J., Partial demineralization and concentration of acid whey by nanofiltration combined with diafiltration // Desalination. 2009. V. 241. P. 288–295.
- 9 Пат. № 2617940, RU, B01D9/00, B01D61/02, A23C21/00, A23C7/04, A23C1/14. Способ переработки молочной сыворотки / Куленко В.Г., Шевчук В.Б., Славоросова Е.В., Дыкало Н.Я., Фиалкова Е.А.; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВО "Вологодская государственная молочнохозяйственная академия имени Н.В. Верещагина". Заявл. 18.03.2015; Оpubл. 28.04.2017.
- 10 Храмов А.Г. Новации молочной сыворотки. Санкт-Петербург: Профессия, 2016. 424 с.
- 11 Первов А.Г., Ефремов Р.В., Рудакова Г.Я. Прогноз показателей работы нанофильтрационных мембран и выбор оптимальных доз реагентов при эксплуатации мембранных установок для получения питьевой воды // Водоочистка. 2009. № 1–2. С. 16–21.
- 12 Li D., Meng L., Guo Y., Deng T. et al. Chemical engineering process simulation of brines using phase diagram and Pitzer model of the system $\text{CaCl}_2\text{--SrCl}_2\text{--H}_2\text{O}$ // Fluid Phase Equilibria. 2019. № 484. P. 232–238. doi: 10.1016/j.fluid.2018.11.034
- 13 Нифталиев С.И., Плотникова С.Е., Богданова Т.В., Смольянинова В.С. и др. Влияние температуры на фазообразование в тройной системе $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2\text{--H}_2\text{O--n-C}_3\text{H}_7\text{OH}$ // Конденсированные среды и межфазные границы. 2017. Т. 19. № 3. С. 395–399.
- 14 Плотникова С.Е., Перегудов Ю.С., Горбунова Е.М., Нифталиев С.И. Перспективы применения жидких отходов производства кальцинированной соды в качестве хладоносителя на основе тройной системы $\text{CaCl}_2\text{--K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7\text{--H}_2\text{O}$ // Вестник ВГУИТ. 2020. Т. 82. №. 3. С. 233–238.
- 15 ГОСТ 18309–2014. Межгосударственный стандарт. Вода. Методы определения фосфорсодержащих веществ. М.: Стандартинформ. 2014. 24 с.
- 16 Лидин Р.А. и др. Химические свойства неорганических веществ. М.: Химия, 2000. 480 с.
- 17 Киргинцев А.Н., Трушенкова Л.Н., Лаврентьева В.Г. Растворимость неорганических веществ в воде. Л.: Химия, 1972. 248 с.
- 18 Tsaturyan A., Arstamyan L., Sargsyan A., Saribekyan J. et al. Development of an efficient method for obtaining lactose and lactulose from whey // Pharmacia. 2023. V. 70. №. 4. P. 1039-1046.
- 19 Paladii I.V., Vrabie E.G., Sprinchan K.G., Bologa M.K. Whey: Review. Part 2. Treatment Processes and Methods // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2021. V. 57. P. 651-666.
- 20 Hourigan J.A., Lifran E.V., Vu L.T., Listiohadi Y. et al. Lactose: chemistry, processing, and utilization // Advances in dairy ingredients. 2013. P. 21-41.

References

- 1 Semenova A.A. Nutritional and biological value of whey. Current research. 2023. no. 1 (131). pp. 10–12. Available at: <https://apni.ru/article/5312-pishchevaya-i-biologicheskaya-tsennost-moloch> (in Russian).
- 2 Belyakova T.N., Pechurkina. D.S. Functional products as a trend of the 21st century. Dairy industry. 2020. no. 2. pp. 46–47. (in Russian).
- 3 Rybalova T.I. Russian dairy industry in 2018. Dairy industry. 2019. no. 1. pp. 4–9. (in Russian).
- 4 Korotky I.A., Plotnikov I.B., Mazeeva I.A. Modern trends in whey processing. Equipment and technology of food production. 2019. vol. 49. no. 2. pp. 227–234. (in Russian).
- 5 Sienkiewicz T., Riedel K.–L. Whey, processing and use in the agro-industrial complex. M., Agropromizdat, 2020. 269 p. (in Russian).
- 6 Zolotareva M.S., Volodin D.N., Bessonov A.S. Electrodialysis is the most effective process for demineralization of whey. Dairy industry. 2014. no. 3. pp. 37–38. (in Russian).
- 7 Timkin V.A., Novopashin L.A. Production of whey concentrate using baromembrane methods. Scientific and technical bulletin technical systems in the agro-industrial complex. 2019. no. 3(3). pp. 91–98. (in Russian).
- 8 Roman A., Wang J., Csanadi J., Partial demineralization and concentration of acid whey by nanofiltration combined with diafiltration. Desalination. 2009. vol. 241. pp. 288–295.
- 9 Kulenko V.G., Shevchuk V.B., Slavorosova E.V., Dykalo N.Ya. et al. Method for processing whey. Patent RF, no. 2617940, 2017.
- 10 Khramtsov A.G. Whey innovations. St. Petersburg, Profession, 2016. 424 p. (in Russian).
- 11 Pervov A.G., Efremov R.V., Rudakova G.Ya. Forecast of performance indicators of nanofiltration membranes and selection of optimal doses of reagents during the operation of membrane installations for the production of drinking water. Vodoochistka. 2009. no. 1–2. pp. 16–21. (in Russian).

- 12 Li D., Meng L., Guo Y., Deng T. et al. Chemical engineering process simulation of brines using phase diagram and Pitzer model of the system $\text{CaCl}_2\text{--SrCl}_2\text{--H}_2\text{O}$. *Fluid Phase Equilibria*. 2019. no. 484. pp. 232–238. doi: 10.1016/j.fluid.2018.11.034
- 13 Niftaliev S.I., Plotnikova S.E., Bogdanova T.V., Smolyaninova V.S. and others. The influence of temperature on phase formation in the ternary system $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2\text{--H}_2\text{O--n-C}_3\text{H}_7\text{OH}$. *Condensed media and interphase boundaries*. 2017. vol. 19. no. 3. pp. 395–399. (in Russian).
- 14 Plotnikova S.E., Peregudov Yu.S., Gorbunova E.M., Niftaliev S.I. Prospects for the use of liquid waste from the production of soda ash as a coolant based on the ternary system $\text{CaCl}_2\text{--K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7\text{--H}_2\text{O}$. *Proceedings of VSUET*. 2020. vol. 82. no. 3. pp. 233–238. (in Russian).
- 15 GOST 18309–2014. Interstate standard. Water. Methods for determining phosphorus-containing substances. M., Standardinform, 2014. 24 p. (in Russian).
- 16 Lidin R.A. and others. *Chemical properties of inorganic substances*. M., Chemistry, 2000. 480 p. (in Russian).
- 17 Kirgintsev A.N., Trushenkova L.N., Lavrentieva V.G. *Solubility of inorganic substances in water*. L., Chemistry, 1972. 248 p. (in Russian).
- 18 Tsaturyan A., Arstamyan L., Sargsyan A., Saribekyan J. et al. Development of an efficient method for obtaining lactose and lactulose from whey. *Pharmacia*. 2023. vol. 70. no. 4. pp. 1039–1046.
- 19 Paladii I.V., Vrabie E.G., Sprinchan K.G., Bologa M.K. Whey: Review. Part 2. Treatment Processes and Methods. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2021. vol. 57. pp. 651–666.
- 20 Hourigan J.A., Lifran E.V., Vu L.T., Listiohadi Y. et al. Lactose: chemistry, processing, and utilization. *Advances in dairy ingredients*. 2013. pp. 21–41.

Сведения об авторах

Светлана Е. Плотникова к.х.н., доцент, кафедра неорганической химии и химической технологии, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, burkovasweta@ya.ru
<https://orcid.org/0000-0002-6331-554x>

Елена М. Горбунова д.х.н., профессор, кафедра неорганической химии и химической технологии, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, lobanova8686@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-3550-0115>

Сабухи И. Нифталиев д.х.н., профессор, кафедра неорганической химии и химической технологии, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, niftaliev@mail.com
<https://orcid.org/0000-0001-7887-3061>

Лилия В. Бочарова студент, кафедра неорганической химии и химической технологии, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, hcn_chr@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0006-9266-2651>

Анастасия М. Лучко студент, кафедра неорганической химии и химической технологии, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, am.luchko@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0009-5197-4765>

Вклад авторов

Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about authors

Svetlana E. Plotnikova Cand. Sci. (Chem.), associate professor, inorganic chemistry and chemical technology department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, burkovasweta@ya.ru
<https://orcid.org/0000-0002-6331-554x>

Elena M. Gorbunova Cand. Sci. (Chem.), associate professor, inorganic chemistry and chemical technology department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, lobanova8686@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-3550-0115>

Sabukhi I. Niftaliev Dr. Sci. (Chem.), professor, inorganic chemistry and chemical technology department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, niftaliev@mail.com
<https://orcid.org/0000-0001-7887-3061>

Liliya V. Bocharova student, inorganic chemistry and chemical technology department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, hcn_chr@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0006-9266-2651>

Anastasiya M. Luchko student, inorganic chemistry and chemical technology department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, am.luchko@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0009-5197-4765>

Contribution

All authors are equally involved in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 11/10/2023	После редакции 06/11/2023	Принята в печать 28/11/2023
Received 11/10/2023	Accepted in revised 06/11/2023	Accepted 28/11/2023