

Разработка электродиализного аппарата с модернизированными прокладками-спейсерами и оценка экономической эффективности его применения в технологической схеме очистки промышленных растворов ТЭЦ

Сергей И. Лазарев	¹	sergey.lazarev.1962@mail.ru	 0000-0003-0746-5161
Ольга В. Долгова	¹	o.v.dolgova@mail.ru	 0009-0000-9588-4897
Дмитрий Н. Коновалов	¹	kdn1979dom@mail.ru	 0000-0002-9366-8661
Анна А. Антипова	¹	ainolgon@yandex.ru	 0009-0006-1914-1614
Константин К. Полянский	^{2,3}	kaf-kit@vfreu.ru	 0000-0002-7333-4816
Наталья В. Шель	¹	natalyshell@mail.ru	

¹ Тамбовский государственный технический университет, Советская, 106, Тамбов, 392000, Россия

² Воронежский филиал Российского экономического ун-та им. Г.В. Плеханова, Карла Маркса, 67А, Воронеж, 394030, Россия
 Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия

Аннотация. Представлена разработка конструкции электродиализатора с модернизированными прокладками-спейсерами. В отличие от аналогов, включающих катионо- и анионообменные мембраны с гранулами смол и сетчатыми прокладками, а также прототипа с охлаждающими трубками, предложенная конструкция обеспечивает более полное использование объема камер за счет уменьшения количества направляющих-держателей. Это устраняет застойные зоны и увеличивает свободное пространство внутри прокладок-спейсеров. Также реализовано шахматное расположение охлаждающих трубок, что способствует более эффективному теплообмену и изменению направления потока раствора. Представлена технологическая схема очистки промышленных растворов с использованием разработанного электродиализатора. Проведен анализ эксплуатационных затрат, экономической эффективности внедрения и срока окупаемости данного технологического процесса. Предложенные конструктивные решения, реализованные в модернизированных прокладках-спейсерах, позволяют добиться более высокой производительности, улучшенного охлаждения и, как следствие, повышения качества разделяемых растворов.

Ключевые слова: концентрирование, очистка, прокладки-спейсеры, разделение, электродиализ, аппарат.

Development of an electrodialysis apparatus with upgraded spacers and evaluation of its economic efficiency in the process scheme for purifying industrial solutions at a thermal power plant

Sergey I. Lazarev	¹	sergey.lazarev.1962@mail.ru	 0000-0003-0746-5161
Olga V. Dolgova	¹	o.v.dolgova@mail.ru	 0009-0000-9588-4897
Dmitry N. Konovalov	¹	kdn1979dom@mail.ru	 0000-0002-9366-8661
Anna A. Antipova	¹	ainolgon@yandex.ru	 0009-0006-1914-1614
Konstantin K. Polyansky	^{2,3}	kaf-kit@vfreu.ru	 0000-0002-7333-4816
Natalia V. Shel	¹	natalyshell@mail.ru	

¹ Tambov State Technical University, Sovetskaya 106, Tambov, 392000 Russia

² Voronezh branch of the Russian Economic University named after G.V. Plekhanov, Karl Marx, 67A, Voronezh, 394030, Russia
 Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19, Voronezh, 394036, Russia

Abstract. This paper presents a design for an electrodialyzer with upgraded spacer gaskets. Unlike similar designs incorporating cation- and anion-exchange membranes with resin granules and mesh gaskets, as well as a prototype with cooling tubes, the proposed design ensures more complete utilization of the chamber volume by reducing the number of guide holders. This eliminates stagnant zones and increases free space within the spacer gaskets. A staggered arrangement of the cooling tubes also facilitates more efficient heat exchange and changes in the solution flow direction. A process flow diagram for purifying industrial solutions using the developed electrodialyzer is presented. An analysis of operating costs, the economic efficiency of implementation, and the payback period for this technological process are provided. The proposed design solutions, implemented in the upgraded spacer gaskets, enable higher productivity, improved cooling, and, consequently, improved quality of the separated solutions.

Keywords: concentration, purification, spacer pads, separation, electrodialysis, apparatus.

Для цитирования

Лазарев С.И., Долгова О.В., Коновалов Д.Н., Антипова А.А., Полянский К.К., Шель Н.В. Разработка электродиализного аппарата с модернизированными прокладками-спейсерами и оценка экономической эффективности его применения в технологической схеме очистки промышленных растворов ТЭЦ // Вестник ВГУИТ. 2026. Т. 88. № 2. С. 305–314. doi:10.20914/2310-1202-2026-2-305-314

For citation

Lazarev S.I., Dolgova O.V., Konovalov D.N., Antipova A.A., Polyansky K.K., Shel N.V. Development of an electrodialysis apparatus with upgraded spacers and evaluation of its economic efficiency in the process scheme for purifying industrial solutions at a thermal power plant. Vestnik VGUET [Proceedings of VSUET]. 2026. vol. 88. no. 2. pp. 305–314. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2026-2-305-314

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

Введение

Электродиализ – эффективный метод очистки, разделения и концентрации растворов, широко применяемый в химической, нефтегазовой, пищевой и текстильной промышленности. В условиях современного производства важна модернизация оборудования для повышения эффективности и надежности. Новые электродиализаторы с модернизированными прокладками-спейсерами решают проблемы недостаточной турбулизации и охлаждения, улучшая качество продукта и долговечность мембран.

Аппарат направлен на очистку, разделение и концентрирование растворов с использованием электродиализа. Аналогами являются многокамерный электродиализатор глубокой деминерализации [1] и электродиализатор с прижимными плитами [2]. Оба имеют недостатки в виде слабой турбулизации и отсутствия охлаждения, что снижает качество продукта и подвергает мембраны температурной нагрузке.

В устройстве [3], улучшенном с точки зрения турбулизации и охлаждения разделяемого раствора, предусмотрены две прижимные пластины, входы для подачи концентрата, дилуата и растворов для электродов, а также выходы для их удаления. Конструкция включает пакеты чередующихся мембран и прокладок с увеличенной толщиной последних, увеличенной площадью мембран и лабиринтной структурой свободного пространства прокладок для дилуата и концентрата, образованной двумя короткими и двумя длинными направляющими-держателями [4–7].

Охлаждение раствора осуществляется четырьмя прямыми охлаждающими трубками, размещенными в приэлектродных прокладках поперек направления сборки аппарата на расстоянии 16 мм друг от друга и симметрично относительно средней линии прокладки. Кроме того, в прокладках для дилуата и концентрата находятся две прямые трубки на расстоянии 12 мм друг от друга и изогнутые трубки в центральной части под углом 43–45 градусов (верхняя изогнута вверх, нижняя – вниз), расположенные на расстоянии 8 мм от прямых трубок. Толщина плит корпуса уменьшена, а входные и выходные каналы для подачи и вывода раствора размещены на их торцевой поверхности [8–12].

Устройство и принцип работы

На рисунке 1 и 2 представлен электродиализатор с модернизированными прокладками-спейсерами. Работа аппарата осуществляется следующим образом.

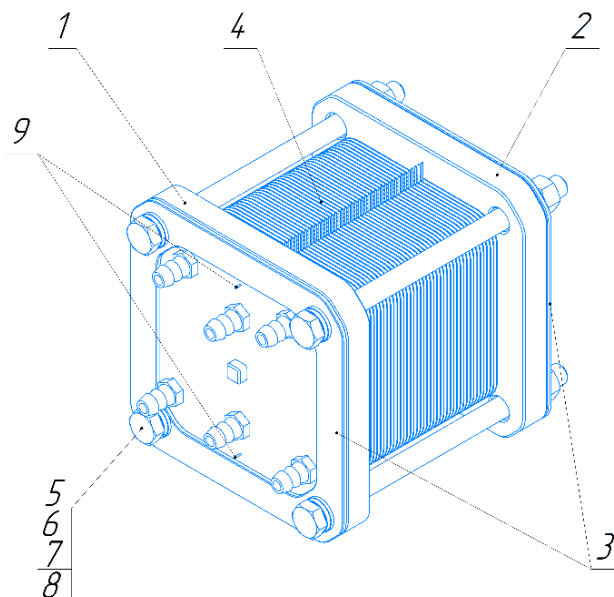


Рисунок 1. Электродиализатор с модернизированными прокладками-спейсерами в собранном состоянии в изометрии: 1 – плита с катодом; 2 – плита с анодом; 3 – металлическая пластина; 4 – пакет чередующихся мембран и прокладок-спейсеров; 5 – болт; 6 – упорная шайба; 7 – шайба; 8 – гайка

Figure 1. Electrodialyzer with upgraded spacer gaskets assembled in isometry: 1 – plate with cathode; 2 – plate with anode; 3 – metal plate; 4 – package of alternating membranes and spacer gaskets; 5 – bolt; 6 – thrust washer; 7 – washer; 8 – nut

Раздельными потоками через два штуцера 11 и два канала 10 для подачи разделяемого раствора – дилуата и через два штуцера 13 и два канала 12 для подачи разделяемого раствора – концентрата в плите корпуса 1 с анодом к ряду полных пакетов 4 чередующихся мембран и прокладок-спейсеров подается разделяемый раствор – дилуат и разделяемый раствор – концентрат соответственно.

Параллельно с потоком разделяемого раствора – дилуата в пакетах 4 чередующихся мембран и прокладок-спейсеров поток разделяемого раствора – концентрата движется через два отверстия 28 для протекания разделяемого раствора – концентрата в прианодной прокладке-спейсере 24, два отверстия 46 для протекания разделяемого раствора – концентрата в нечетной анионообменной мембране 44, два отверстия 37 для протекания разделяемого раствора – концентрата в первой прокладке-спейсере 32 для дилуата, два отверстия 49 для протекания разделяемого раствора – концентрата в нечетной катионообменной мембране 47 и через входные отверстия 41 разделяемый раствор – концентрат попадает в первую прокладку-спейсер 38 для концентрата.

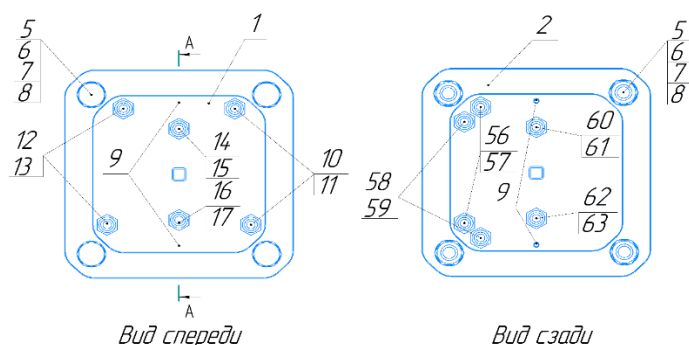


Рисунок 2. Вид спереди и вид сзади: 1 – плита с катодом; 2 – плита с анодом; 5 – болт; 6 – упорная шайба; 7 – шайба; 8 – гайка; 9 – шпилька; 10, 12, 14 – входные каналы; 16, 56, 58, 60, 62 – выходные каналы; 11, 13, 15, 17, 57, 59, 61, 63 – съемные штуцеры; 18 – подложка; 19 – электрод

Figure 2. Front and rear view: 1 – plate with cathode; 2 – plate with anode; 5 – bolt; 6 – thrust washer; 7 – washer; 8 – nut; 9 – stud; 10, 12, 14 – input channels; 16, 56, 58, 60, 62 – output channels; 11, 13, 15, 17, 57, 59, 61, 63 – removable fittings; 18 – substrate; 19 – electrode

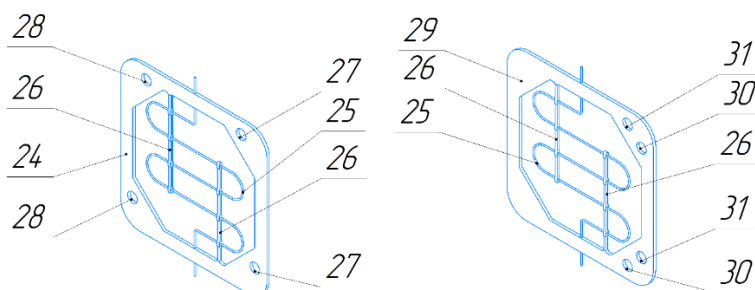


Рисунок 3. Прианодная и прикатодная прокладки-спейсеры в изометрии: 24 – прианодная прокладка-спейсер; 25 – трубка охлаждения; 26 – направляющая-держатель; 27 – отверстие для протекания разделяемого раствора – дилюата; 28 – отверстие для протекания разделяемого раствора – концентрата; 29 – прикатодная прокладка-спейсер; 30 – отверстие для протекания разделяемого раствора – концентрата; 31 – отверстие для протекания разделяемого раствора – дилюата

Figure 3. Near-anode and near-cathode spacer gaskets in isometry: 24 – near-anode spacer gasket; 25 – cooling tube; 26 – guide holder; 27 – hole for flow of separable dilute solution; 28 – hole for flow of separable concentrate solution; 29 – cathode spacer gasket; 30 – hole for the flow of a separable solution – concentrate; 31 – a hole for the flow of a separable dilute solution

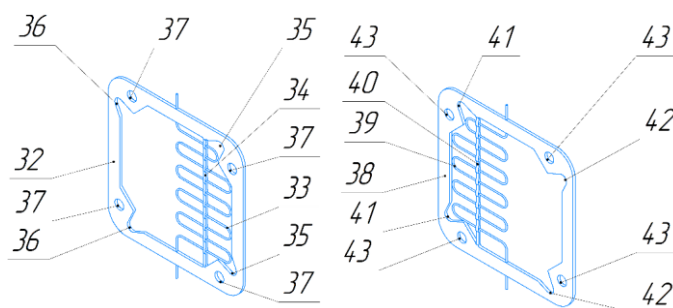


Рисунок 4. Прокладки-спейсеры для дилюата и концентрата в изометрии: 32 – прокладка-спейсер для дилюата; 33, 39 – трубка охлаждения; 34, 40 – направляющая-держатель; 35 – входное отверстие; 36 – выходное отверстие; 37 – отверстие для протекания разделяемого раствора – концентрата; 38 – прокладка-спейсер для концентрата; 41, 42 – входное и выходное отверстия для протекания разделяемого раствора – концентрата; 43 – отверстие для протекания разделяемого раствора – дилюата

Figure 4. Spacer gaskets for diluate and concentrate in isometry: 32 – spacer gasket for diluate; 33, 39 – cooling tube; 34, 40 – guide holder; 35 – inlet; 36 – outlet; 37 – opening for the flow of separable concentrate solution; 38 – gasket spacer for the concentrate; 41, 42 – inlet and outlet openings for the flow of a separable concentrate solution; 43 – a hole for the flow of a separable dilute solution

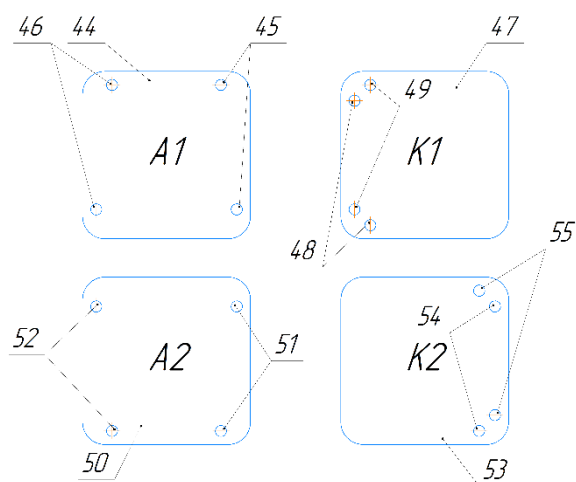


Рисунок 5. Форма ионообменных мембран: 44 – нечетная анионообменная мембрана; 45, 48, 52, 55 – отверстия для протекания разделяемого раствора дилуата; 46, 49, 51, 54 – отверстия для протекания разделяемого раствора – концентрата; 47 – нечетная катионообменная мембрана; 50 – четная анионообменная мембрана; 53 – четная катионообменная мембрана

Figure 5. Shape of ion exchange membranes: 44 – odd anion exchange membrane; 45, 48, 52, 55 – holes for the flow of a separable dilute solution; 46, 49, 51, 54 – holes for the flow of a separable concentrate solution; 47 – odd cation exchange membrane; 50 – even anion exchange membrane; 53 – even cation exchange membrane

Разделяемый раствор – концентрат, двигаясь внутри первой прокладки-спейсера 38 для концентрата в левой части прокладки-спейсера охлаждается, соприкасаясь с трубкой охлаждения 39, зафиксированной направляющей-держателем 40 с отверстиями под трубку охлаждения и меняет направление движения, при этом происходит интенсивное перемешивание раствора. После этого через выходные отверстия 42 в первой прокладке-спейсере 38 для концентрата, два отверстия 51 для протекания разделяемого раствора – дилуата в четной анионообменной мембране 50 и два отверстия 37 для протекания разделяемого раствора – концентрата во второй прокладке-спейсере 32 для дилуата и отверстия 54 протекания разделяемого раствора – концентрата в четной катионообменной мембране 53 разделяемый раствор – концентрат выводится во вторую прокладку-спейсер 38 для концентрата, где через выходные отверстия 42, ставшие в каждой второй прокладке-спейсере 38 для концентрата входными, начинает так же двигаться, интенсивно перемешиваясь и охлаждаясь в левой части прокладки-спейсера при обтекании трубки охлаждения 39, зафиксиро-

ванной направляющей-держателем 40 с отверстиями под трубку охлаждения, и меняет направление движения, при этом происходит интенсивное перемешивание раствора в нижней части прокладки-спейсера. Далее разделяемый раствор – концентрат движется аналогичным образом через все полные пакеты 4 чередующихся мембран и прокладок-спейсеров вплоть до прикатодной прокладки-спейсера 29, где проходит через два отверстия 30 для протекания разделяемого раствора – дилуата, два выходных канала 54 и съемных штуцеров 55 для вывода разделяемого раствора – дилуата и выводится из аппарата [14, 15].

Одновременно с потоками разделяемого раствора – дилуата и разделяемого раствора – концентрата через входные каналы 14 и 60 и штуцеры 15 и 61 в электролизатор с улучшенной турбулизацией и охлаждением разделяемого раствора в приэлектродные камеры поступают анолит и католит соответственно, образующиеся за счет миграции анионов и катионов через крайние нечетную анионообменную 44 и четную катионообменную 53 мембраны к электродам 19 (аноду и катоду соответственно). Выводятся анолит и католит из приэлектродных камер электролизатора с модернизированными прокладками-спейсерами через выходные каналы 16 и 62 и штуцеры 17 и 63 [16, 17].

Изогнутые «змейкой» трубки охлаждения 25, 33 и 39, вставляемые в прианодную и прикатодную прокладки-спейсера 24 и 29, прокладку-спейсер для дилуата 32, прокладку-спейсер для концентрата 37, имеют внешний диаметр 1 мм и толщину стенки 0,25 мм. В прианодной и прикатодной прокладках-спейсерах 24 и 29 расположены изогнутые «змейкой» трубки охлаждения 25 с четырьмя изгибами радиусом 9,25 мм и расстоянием между соседними прямыми участками 17,5 мм, проходящие через направляющие-держатели 26. В прокладке-спейсере для дилуата 32 и прокладке-спейсере для концентрата 38 соответственно расположены изогнутые «змейкой» трубки охлаждения 33 и 39 с девятью изгибами радиусом 4,5 мм и расстоянием между соседними прямыми участками 8 мм, проходящие соответственно через направляющие-держатели 34 и 40 с отверстиями под трубку охлаждения, фиксирующие их в соответствующих прокладках-спейсерах [18].

Две направляющие-держатели 26 с отверстиями под трубку охлаждения в прианодной и прикатодной прокладках-спейсерах 24 и 29

располагается на расстоянии 20 мм по обе стороны от вертикальной средней линии. Направляющая-держатель 34 с отверстиями под трубку охлаждения в прокладке-спейсере для дилюата 32 располагается на расстоянии 25 мм правее вертикальной средней линии прокладок-спейсеров для дилюата 32. Направляющая-держатель 40 с отверстиями под трубку охлаждения в прокладке-спейсере для концентрата 38 располагаются на расстоянии 25 мм левее вертикальной средней линии прокладок-спейсеров для концентрата 38. Направляющие-держатели 26, 34 и 40 имеют ширину 2 мм с профилем толщиной 1 мм и утолщениями размером 4 × 2 мм в местах крепления трубки охлаждения.

За счет уменьшения количества направляющих достигнуто увеличение полезного объема камер обессоливания и концентрирования,

более компактное расположение трубки охлаждения в прокладках-спейсерах позволило увеличить площадь поверхности контакта разделяемого раствора с охлаждающей жидкостью, оптимизация расположения отверстий в анионообменных и катионообменных мембранах и снижение их количества с шести до четырех привели к увеличению производительности электродиализатора за счет устранения застойных зон в местах перетекания разделяемого раствора – концентрата и разделяемого раствора – дилюата из предшествующей камеры разделения в последующую.

Сравнение характеристик предлагаемой конструкции и прототипа представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Сравнительные характеристики.

Table 1.

Comparative characteristics

Параметр Parameter	Данный аппарат This device	Прототип Prototype
Габариты, см Dimensions, cm	164 × 2164 × 220,4	
Ширина одной прижимной плиты, см Width of one pressure plate, cm	18	
Общая ширина пакетов мембран и прокладок, см Total width of membrane and gasket packages, cm	122	
Количество катионообменных мембран, шт. Number of cation exchange membranes, units	24	
Количество анионообменных мембран, шт. Number of anion exchange membranes, units	24	
Суммарная активная площадь анионообменных мембран, см ² Total active area of anion membranes, cm ²	2080,72	1970,98
Суммарная активная площадь катионообменных мембран, см ² Total active area of cation membranes, cm ²	2080,72	1970,98
Количество камер обессоливания, шт. Number of desalination chambers, units	24	
Количество камер концентрирования, шт. Number of concentration chambers, pcs.	23	
Общий полезный объем камер обессоливания, см ³ Total useful volume of desalination chambers, cm ³	405,82	394,20
Общий полезный объем камер концентрирования, см ³ Total useful volume of chambers, cm ³	388,91	377,77
Площадь охлаждающей поверхности в камерах обессоливания, см ² Cooling surface area in desalination chambers, cm ²	374,64	325,72
Площадь охлаждающей поверхности в камерах концентрирования, см ² Cooling surface area in the concentration chambers, cm ²	359,03	312,15
Масса, кг Weight, kg	≤4,5	

Технический результат выражается в повышении производительности электродиализатора вследствие устранения застойных зон в местах перетекания разделяемого раствора – концентрата и разделяемого раствора – дилюата из предшествующей камеры разделения в последующую и увеличения свободного пространства внутри прокладок-спейсеров за счет уменьшения количества направляющих-держателей и в повышении эффективности охлаждения разделяемого раствора и внутренних элементов аппарата вследствие увеличения площади контакта жидкости с охлаждающей поверхностью за счет более компактного размещения трубки охлаждения внутри прокладки-спейсера, шахматный порядок расположения

трубок охлаждения в прокладках-спейсерах поочередно в правой и левой части аппарата приводит к изменению направления движения всего потока разделяемого раствора и обеспечивает более полное и длительное взаимодействие раствора с охлаждающей поверхностью при более интенсивной турбулизации.

Применение электродиализатора в технологической схеме

Электродиализатор с модернизированными прокладками-спейсерами предполагается использовать, в том числе для очистки сточных вод. На рисунке 6 представлена технологическая схема очистки сточных вод регенерации ионов умягчения оборотной воды ТЭЦ.

Ёмкость 1 является накопителем щелочных элюатов – жидкостей, образующихся в результате извлечения из ионообменных смол анионов жёсткости. Представляют собой водный раствор гидроксида, хлорида и сульфата натрия, содержащих взвешенные вещества, захваченные в процессе регенерации частицы

ионообменной смолы. В ёмкости 2 накапливаются жидкости, образующиеся при вытеснении катионов жёсткости из ионообменной смолы. Данные водные растворы состоят из хлоридов натрия, кальция, магния, железа и частичек ионообменной смолы.

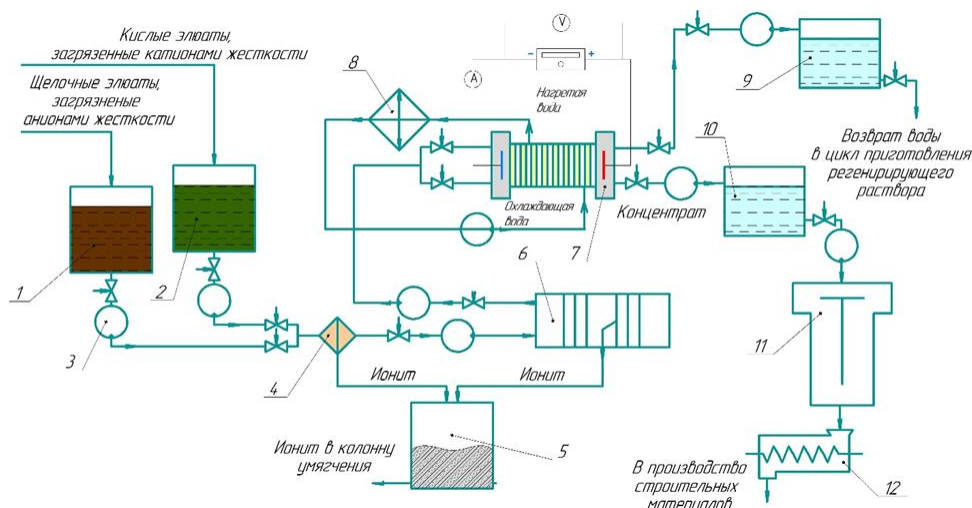


Рисунок 6. Технологическая схема очистки сточных вод регенерации ионитов умягчения оборотной воды ТЭЦ: 1 – ёмкость сбора щелочного элюата; 2 – ёмкость сбора кислого элюата; 3 – насос; 4 – фильтр грубой очистки; 5 – ёмкость сбора уловленного ионита; 6 – фильтр-пресс с вертикальными плитами; 7 – электродиализатор; 8 – теплообменник; 9 – ёмкость сбора очищенной воды; 10 – ёмкость сбора очищенных загрязнений; 11 – выпарной аппарат; 12 – сушилка шнековая

Figure 6. Technological scheme of wastewater treatment for ionite regeneration and softening of recycled water at a CHPP: 1 – alkaline eluate collection tank; 2 – acid eluate collection tank; 3 – pump; 4 – coarse filter; 5 – trapped ionite collection tank; 6 – filter press with vertical plates; 7 – electro-dialyzer; 8 – heat exchanger; 9 – purified water collection tank; 10 – purified pollution collection tank; 11 – evaporator; 12 – screw dryer

Представленная на рисунке 6 технологическая схема работает последовательно, очищаются сточные воды, содержащие или щелочные, или кислые элюаты.

Процесс очистки осуществляется следующим образом. Из ёмкости 1 кислые сточные воды с помощью насоса 3 подаются на фильтр грубой очистки 4, где происходит извлечение из жидкости крупных частиц ионита, захваченных в процессе регенерации. На следующем этапе из загрязнённой воды производится извлечения более мелких частиц ионита на фильтр-прессе с вертикальными плитами 6. Уловленная на стадии механической очистки в аппаратах 4 и 6 ионообменная смола направляется в сборную ёмкость 5, откуда после накопления может быть возвращена в колонну умягчения оборотной воды.

Далее очищенные от взвешенных частиц сточные воды направляются в аппарат электродиализной очистки 7. В данном аппарате раствор разделяется на чистую воду и концентрат

с высоким содержанием ионов металлов. Процесс разделения раствора осуществляется под действием эклектического поля, что приводит к увеличению температуры раствора, как следствие падает скорость разделения и увеличивается время, необходимое для очистки сточной воды. Для предотвращения нагрева очищаемого раствора в аппарате предусмотрена система охлаждения. Охлаждающая вода подаётся внутрь по изолированным трубкам, охлаждая разделяемый раствор, а далее нагретая оборотная вода охлаждается в теплообменнике 8.

На выходе из электродиализатора образуются два раствора. Дилуат, очищенная вода, которая собирается в ёмкости 9 и по мере необходимости направляется в технологический цикл приготовления регенерирующего раствора. Концентрат, высококонцентрированный раствор содержащий ионы металлов, который по мере накопления в ёмкости 10, в предложенной технологической схеме подвергается обезвоживанию. Вода из раствора удаляется в выпарном аппарате 11, досушка с образованием

порошка происходит в шнековой сушилке 12. Высушенный порошок может быть направлен в производство строительных материалов.

Очистка сточных вод, загрязнённых катионами жёсткости, проводится по такой же схеме.

Внедрение в работу ТЭЦ представленной технологической схемы потребует у предприятия инвестиций ориентировочно в размере 7 млн рублей. В эту стоимость включены следующие работы: разработка проектной и исполнительной документации, закупка аппаратов, комплектующих, сборка технологической схемы и вывод на рабочий режим. Срок службы установки 10 лет. Внедрение оборудования считается целесообразным, если период окупаемости менее половины от срока службы установки.

Экономическая оценка технологической схемы

Оценим затраты предприятия на эксплуатацию технологической схемы.

Потребность в электроэнергии. В схеме электроэнергию потребляют: шесть непрерывно работающих насосов (насосы от емкостей 1, 2 работают попеременно), электродиализатор (10 кВт·ч), и вспомогательная электроника на другом оборудовании 1 кВт·ч, режим работы восемь часов в день, двадцать два рабочих дня в месяц. Выпарной аппарат (50 кВт·ч), шнековая сушка (5 кВт·ч) и насос системы сушки работают периодически, по мере накопления концентрата, 4 рабочих дня в месяц.

$$P_3 = (6 \cdot 4 + 1 \cdot 10 + 1) \cdot 8 \cdot 22 + (50 \cdot 1 + 5 + 4) \cdot 8 \cdot 4 = 8048 \text{ кВт} \cdot \text{ч}. \quad (1)$$

Стоимость электроэнергии – 5,34 руб/кВт·ч, в Тамбовской области на 2025 г.

$$Z_{эл.м} = 8048 \cdot 5,34 \text{ руб./кВт} \cdot \text{ч} \approx 42\,977 \text{ р.} \quad (2)$$

Ежемесячные затраты на зарплату персонала с учетом всех положенных премий и отчислений, включая вредность производства, (лаборант зарплата в месяц – 35000 руб., технолог – 45000 руб., слесарь – 35000 руб.):

$$Z_{з.п.м} = 1,315 \cdot (35 + 45 + 35) \cdot 1150 \approx 173909 \text{ р} \quad (3)$$

Ежемесячные затраты на амортизацию оборудования (срок службы оборудования – 10 лет):

$$Z_{ам} = 7\,000\,000 / 120 \approx 58\,333 \text{ руб.} \quad (4)$$

Ежемесячные затраты на техническое обслуживание (предварительная стоимость годового обслуживания оборудования 600 тыс. руб.):

$$Z_{тех.р.} = 600\,000 / 12 = 50\,000 \text{ руб.} \quad (5)$$

Суммарные ежемесячные затраты:

$$Z_m = Z_{эл.м} + Z_{з.п.м} + Z_{ам.} + Z_{тех.р.} = 42977 + 173909 + 58334 + 50000 = 325\,220 \text{ р.} \quad (6)$$

Суммарные затраты на очистку на 1 м³ раствора:

$$Z_{м1} = Z_m / 10\,000 = 325\,220 / 10\,000 \approx 32,5 \text{ р.} \quad (7)$$

Возможный экономический эффект внедрения технологической схемы с периодом использования 10 лет.

Экономия месячного восполнения воды в количестве, эквивалентном сброшенному в канализацию (стоимость холодной воды в Тамбовской области – 40,52 руб./м³):

$$Э_{вм} = 10\,000 \cdot 0,8 \cdot 40,52 = 324\,160 \text{ руб.} \quad (8)$$

Месячная экономия на использовании выделенных из сточных вод порошков солей в строительстве при рыночной цене смеси в 2 руб./кг (исходная концентрация в стоках около 5% (50 кг/м³), экспериментально найденная средняя степень очистки исходного раствора от загрязнителей – 0,97, безвозвратные потери – 15% от исходного количества):

$$Э_{вмм} = 10000 \cdot 50 \cdot 0,97 \cdot (1 - 0,15) \cdot 2 = 824\,500 \text{ р} \quad (9)$$

Месячные затраты на восполнение безвозвратно потерянного в процессе очистки количества воды:

$$Z_{в.м.} = 10\,000 \cdot 0,2 \cdot 40,52 = 81\,040 \text{ р.} \quad (10)$$

Суммарная годовая экономия:

$$\begin{aligned} Э_{сум.г.} &= (Э_{ам} + Э_{вмм} - Z_m - Z_{в.м.}) \cdot 12 = \\ &= (324160 + 824500 - 325220 - 81040) \cdot 12 = 8908800 \text{ руб.} \end{aligned} \quad (11)$$

На следующем этапе необходимо провести расчеты для определения денежного потока, индекса доходности, чистого дисконтированного дохода и периода окупаемости на основе минимальных полученных значений.

Денежный проток равен ежегодной прибыли:

$$ДП = 8\,908\,800 \text{ руб.} \quad (12)$$

Индекс доходности необходимо рассчитывать по следующей формуле:

$$ИД = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^n ДП \frac{1}{(1+E)^j}, \quad (13)$$

где K – инвестированные в проект денежные средства, E – норма дисконта (среднее значение равно 15%).

$$ИД = \frac{1}{7000000} 1 + 0,15j = 6,39.$$

Полученный индекс доходности > 1 , поэтому проект внедрения технологической схемы можно считать рентабельным.

Чистый дисконтированный доход рассчитывали по формуле:

$$ЧД = \sum_{j=1}^n ДП(1+E)^{-j} = 44722176 \text{ р.} \quad (14)$$

Период окупаемости рассчитывается следующим образом:

$$T_{ок} = \frac{ТК}{\sum_{j=1}^n ДП(1+E)^{-j}} = 1,57 \text{ года,} \quad (15)$$

Период окупаемости составил 1,57 года, с учетом срока службы оборудования, входящего в состав установки 10 лет, считается приемлемым.

Заключение

Выполненные исследования по аппаратно-конструктивному оформлению применимости электродиализного аппарата в технологических процессах очистки промышленных растворов, позволяют сформулировать следующие выводы:

1. Предложенный электродиализатор с модернизированными прокладками-спейсерами представляет собой значительное улучшение в области электродиализных технологий. Устранение застойных зон и увеличение свободного пространства внутри прокладок-спейсеров, достигнутые за счет оптимизации конструкции направляющих-держателей, позволяют существенно повысить производительность аппарата. Предложенные конструктивные решения, реализованные в модернизированных прокладках-спейсерах, позволяют добиться более высокой производительности, улучшенного охлаждения и, как следствие, повышения качества разделяемых растворов. Все это делает разработанный электродиализатор перспективным решением для широкого спектра применений

в различных отраслях промышленности, где требуется эффективная очистка, разделение и концентрирование растворов.

2. Внедрение разработанного аппарата в технологические схемы очистки промышленных растворов позволяет получить два раствора. Дилуат, очищенная вода, которая собирается в емкости и направляется в технологический цикл приготовления регенерирующего раствора. Концентрат, высококонцентрированный раствор, очищаемый от ионов металлов, который по мере накопления в емкости по предложенной технологической схеме подвергается обезвоживанию. Вода из раствора удаляется в выпарном аппарате, досушка с образованием порошка происходит в шнековой сушилке. Высушенный порошок может быть направлен в производство строительных материалов.

3. Внедрение в работу ТЭЦ разработанной технологической схемы потребует у предприятия инвестиций ориентировочно в размере 7 миллионов рублей. В эту стоимость включены следующие работы: разработка проектной и исполнительной документации, закупка аппаратов, комплектующих, сборка технологической схемы и вывод на рабочий режим. Срок службы установки 10 лет. Выполненный расчет показал, что период окупаемости составит 1,57 года, с учетом срока службы оборудования, входящего в состав установки 10 лет, что считается вполне приемлемым вариантом.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках проекта «Теоретические и экспериментальные исследования электрокинетических и структурных характеристик полимерных мембран посредством применения искусственных нейронных сетей в процессах электромембранной очистки промышленных растворов, содержащих ионы металлов» (FEMU-2024-0011).

Литература

- 1 Пат. № 2380145 C2, RU, B01D 61/48. Многокамерный электродиализатор глубокой деминерализации / Заболоцкий В.И., Ташлыков Е.И.; заявитель и патентообладатель ООО «Инновационное предприятие Мембранная технология». № 2007146524/15; Заявл. 12.12.2007; Опубл. 27.01.2010.
- 2 Пат. № 2225746 C1, RU, B01D 61/00. Электродиализатор / Пилат Б.В.; заявитель и патентообладатель ООО «Фирма ЭЙКОСЪ». № 2003102224/15А; Заявл. 28.01.2003; Опубл. 20.03.2004.
- 3 Пат. № 2812615 C1, RU, B01D 61/42. Электродиализатор с улучшенной турбулизацией и охлаждением разделяемого раствора / Шестаков К.В., и др.; заявитель и патентообладатель Тамбовский государственный технический университет. № 2022134332; Заявл. 26.12.2022; Опубл. 30.01.2024.
- 4 Семилетова В.А., Шестаков К.В., Лазарев С.И., Полянский К.К. Анализ эффективности электромембранной очистки промышленных растворов от ионов никеля // Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 2. С. 112–120.
- 5 Жилинский В.В., Слесаренко О.А. Электрохимическая очистка сточных вод и водоподготовка: учеб.-метод. пособие для студентов специальности 1–48 01 04 «Технология электрохимических производств». Минск: БГТУ, 2014. 85 с.

- 6 Ермоленко Б.В., Кузин Е.Н. Оптимизация процесса выбора технологий и оборудования для очистки сточных вод гальванического производства // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. 2024. Т. 67. № 2. С. 111–118.
- 7 Dudeja I., Nikhanj P., Singh A. Electrodialysis: A Novel Technology in the Food Industry // Emerging Techniques for Food Processing and Preservation. CRC Press, 2023. P. 25.
- 8 Zheng P., Sun Y. Leakage Circuit Characteristics of a Bipolar Membrane Electrodialyzer with 5 BP-A-C Units // Journal of Membrane Science. 2020. V. 597. Art. 117762.
- 9 Peng Z., и др. Mathematical Model of the External Circuits in a Bipolar Membrane Electrodialysis Stack: Leakage Currents and Joule Heating Effect // Separation and Purification Technology. 2022. V. 290. Art. 120816.
- 10 Джубари М.К., Алексеева Н.В. Эффективность электродиализа при очистке промышленных сточных вод // Вестник технологического университета. 2020. Т. 23. № 7. С. 33–39.
- 11 Фомичев В.Т., Губаревич Г.П., Савченко А.В. Очистка хромосодержащих вод электродиализом в нестационарном режиме // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2020. № 1 (78). С. 190–195.
- 12 Яковлева М.Р., Никулина О.К., Колоскова О.В., Дымар О.В. Сравнительная оценка процессов электродиализа и электродеионизации // Пищевая промышленность: наука и технологии. 2023. Т. 16. № 4. С. 61–68.
- 13 Шестаков К.В. Разработка электродиализного аппарата и виртуального тренажера на его основе для обучения работников промышленных предприятий // Союз машиностроителей России: материалы национальной научно-технической конференции. 2024. № 1. С. 24–27.
- 14 Мавлетов М.Н., Дресвянников А.Ф. Регенерирование электролита никелирования из промывных вод гальванического производства с помощью электродиализа // Успехи в химии и химической технологии. 2023. Т. 37. № 2 (264). С. 125–126.
- 15 Таздинова О.Ю. Применение технологии электродиализа для очистки сточных вод химической водоочистки с применением отечественного оборудования // Тенденции развития науки и образования. 2023. № 97–11. С. 204–207.
- 16 Пат. № 2846574 C1, RU, B01D 61/50. Электродиализатор с модернизированными прокладками-спейсерами / Лазарев С.И., и др.; заявитель и патентообладатель Тамбовский государственный технический университет. № 2024136159; Заявл. 03.12.2024; Опубл. 09.09.2025.
- 17 Шестаков К.В., Лазарев С.И., Крылов А.В., Лазарев Д.С. и др. Влияние исходной концентрации ионов металлов в многокомпонентных растворах на процесс электродиализной очистки // Вестник Технологического университета. 2023. Т. 26. № 3. С. 21–25.
- 18 Пат. № 2756617 C1, RU, B01J 49/00. Способ регенерации элюатов натрий-катионитовых фильтров / Селиванов О.Г., Пикалов Е.С., Смелая Н.Д., Сенцова А.Е.; заявитель и патентообладатель ВлГУ. № 2020134211; Заявл. 17.10.2020; Опубл. 04.10.2021.

References

- 1 Patent no. 2380145 C2, RU, IPC B01D 61/48. Multichamber electrodialyzer for deep demineralization. Zabolotsky V.I., Tashlykov E.I.; applicant and patent holder LLC "Innovation Enterprise Membrane Technology". no. 2007146524/15; filed 12.12.2007; publ. 27.01.2010. (in Russian).
- 2 Patent no. 2225746 C1, RU, IPC B01D 61/00. Electrodialyzer. Pilat B.V.; applicant and patent holder LLC "Firma EIKOS". no. 2003102224/15A; filed 28.01.2003; publ. 20.03.2004. (in Russian).
- 3 Patent no. 2812615 C1, RU, IPC B01D 61/42. Electrodialyzer with improved turbulization and cooling of the separated solution. Shestakov K.V. et al.; applicant and patent holder Tambov State Technical University. no. 2022134332; filed 26.12.2022; publ. 30.01.2024. (in Russian).
- 4 Semiletova V.A., Shestakov K.V., Lazarev S.I., Polyansky K.K. Analysis of the efficiency of electromembrane purification of industrial solutions from nickel ions. Bulletin of VSUET. 2025. vol. 87. no. 2. pp. 112–120. (in Russian).
- 5 Zhilinsky V.V., Slesarenko O.A. Electrochemical wastewater treatment and water preparation: teaching and methodological manual for students of specialty 1-48 01 04 "Technology of Electrochemical Productions". Minsk: BSTU, 2014. 85 p. (in Russian).
- 6 Ermolenko B.V., Kuzin E.N. Optimization of the process of selecting technologies and equipment for wastewater treatment in galvanic production. Proceedings of Higher Educational Institutions. Series: Chemistry and Chemical Technology. 2024. vol. 67. no. 2. pp. 111–118. (in Russian).
- 7 Dudeja I., Nikhanj P., Singh A. Electrodialysis: A Novel Technology in the Food Industry. In: Emerging Techniques for Food Processing and Preservation. CRC Press, 2023. p. 25.
- 8 Zheng P., Sun Y. Leakage Circuit Characteristics of a Bipolar Membrane Electrodialyzer with 5 BP-A-C Units. Journal of Membrane Science. 2020. vol. 597. article 117762.
- 9 Peng Z. et al. Mathematical Model of the External Circuits in a Bipolar Membrane Electrodialysis Stack: Leakage Currents and Joule Heating Effect. Separation and Purification Technology. 2022. vol. 290. article 120816.
- 10 Dzhubari M.K., Alekseeva N.V. Efficiency of electrodialysis in industrial wastewater treatment. Bulletin of Technological University. 2020. vol. 23. no. 7. pp. 33–39. (in Russian).
- 11 Fomichev V.T., Gubarevich G.P., Savchenko A.V. Purification of chromium-containing waters by electrodialysis in non-stationary mode. Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and Architecture. 2020. no. 1 (78). pp. 190–195. (in Russian).
- 12 Yakovleva M.R., Nikulina O.K., Koloskova O.V., Dymar O.V. Comparative evaluation of electrodialysis and electrodeionization processes. Food Industry: Science and Technologies. 2023. vol. 16. no. 4. pp. 61–68. (in Russian).

13 Shestakov K.V. Development of an electrodialysis apparatus and a virtual simulator based on it for training industrial workers. Union of Machine Builders of Russia: Proceedings of the National Scientific and Technical Conference. 2024. no. 1. pp. 24–27. (in Russian).

14 Mavletov M.N., Dresvyannikov A.F. Regeneration of nickel-plating electrolyte from rinse waters of galvanic production using electrodialysis. *Advances in Chemistry and Chemical Technology*. 2023. vol. 37. no. 2 (264). pp. 125–126. (in Russian).

15 Tazdinova O.Yu. Application of electrodialysis technology for wastewater treatment in chemical water purification using domestic equipment. *Trends in the Development of Science and Education*. 2023. no. 97–11. pp. 204–207. (in Russian).

16 Patent no. 2846574 C1, RU, IPC B01D 61/50. Electrodialyzer with modernized gasket-spacers. Lazarev S.I. et al.; applicant and patent holder Tambov State Technical University. no. 2024136159; filed 03.12.2024; publ. 09.09.2025. (in Russian).

17 Shestakov K.V., Lazarev S.I., Krylov A.V., Lazarev D.S. et al. Influence of initial concentration of metal ions in multicomponent solutions on the electrodialysis purification process. *Bulletin of Technological University*. 2023. vol. 26. no. 3. pp. 21–25. (in Russian).

18 Patent no. 2756617 C1, RU, IPC B01J 49/00. Method for regeneration of eluates from sodium cation exchange filters. Selivanov O.G., Pikalov E.S., Smelaya N.D., Sentsova A.E.; applicant and patent holder VSU. no. 2020134211; filed 17.10.2020; publ. 04.10.2021. (in Russian).

Сведения об авторах

Сергей И. Лазарев д.т.н., заведующий кафедрой, кафедра механики и инженерной графики, Тамбовский государственный технический университет, Советская, 106, Тамбов, 392000, Россия, sergey.lazarev.1962@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0003-0746-5161>

Ольга В. Долгова к.т.н., старший преподаватель, кафедра природопользования и защиты окружающей среды, Тамбовский государственный технический университет, Советская, 106, Тамбов, 392000, Россия, o.v.dolgova@mail.ru

<https://orcid.org/0009-0000-9588-4897>

Дмитрий Н. Коновалов к.т.н., доцент, кафедра техники и технологии автомобильного транспорта, Тамбовский государственный технический университет, Советская, 106, Тамбов, 392000, Россия, kdn1979dom@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-9366-8661>

Анна А. Антипова аспирант, кафедра механики и инженерной графики, Тамбовский государственный технический университет, Советская, 106, Тамбов, 392000, Россия, ainolgon@yandex.ru

<https://orcid.org/0009-0006-1914-1614>

Константин К. Полянский д.т.н., профессор, кафедра управления социально-экономическими системами и бизнеса, Воронежский филиал Российского экономического университета имени Г.В. Плеханова, Карла Маркса, 67А, Воронеж, 394030, Россия, профессор-консультант, кафедра технологии продуктов животного происхождения, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036 kaf-kit@vfreu.ru

<https://orcid.org/0000-0002-7333-4816>

Наталья В. Шель д.х.н., профессор, кафедра химии и химических технологий, Тамбовский государственный технический университет, Советская, 106, Тамбов, 392000, Россия, natalyshell@mail.ru

<https://orcid.org/>

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

Sergey I. Lazarev Doctor of Technical Sciences, Head of the Department, Department of Mechanics and Engineering Graphics, Tambov State Technical University, Sovetskaya 106, Tambov, 392000, Russia, sergey.lazarev.1962@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0003-0746-5161>

Olga V. Dolgova Candidate of Technical Sciences, senior lecturer, Department of "Nature Management and Environmental Protection", Tambov State Technical University, Sovetskaya 106, Tambov, 392000, Russia, o.v.dolgova@mail.ru

<https://orcid.org/0009-0000-9588-4897>

Dmitry N. Kononov Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of "Engineering and Technology of Motor Transport", Tambov State Technical University, Sovetskaya 106, Tambov, 392000, Russia, kdn1979dom@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-9366-8661>

Anna A. Antipova graduate student, Department of Mechanics and Engineering Graphics, Tambov State Technical University, Sovetskaya 106, Tambov, 392000, Russia, ainolgon@yandex.ru

<https://orcid.org/0009-0006-1914-1614>

Konstantin K. Polyansky Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of "Commerce and commodity science", Voronezh branch of the Russian Economic University named after G.V. Plekhanov, Karl Marx, 67A, Voronezh, 394030, Russia, consulting professor, technology of animal products department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia kaf-kit@vfreu.ru

<https://orcid.org/0000-0002-7333-4816>

Natalia V. Shel Doctor of Chemical Sciences, Professor, Department of Chemistry and Chemical Technologies, Tambov State Technical University, Sovetskaya 106, Tambov, 392000, Russia, natalyshell@mail.ru

<https://orcid.org/>

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 02/04/2026	После редакции 11/05/2026	Принята в печать 28/05/2026
Received 02/04/2026	Accepted in revised 11/05/2026	Accepted 28/05/2026