



Обзорная статья/Review article

УДК 66.081.6

DOI: 10.36718/1819-4036-2026-1-190-213

Иван Сергеевич Седоплатов<sup>1</sup>, Сергей Владимирович Ковалев<sup>2</sup>✉,  
Никита Александрович Федотов<sup>3</sup>, Ольга Александровна Ковалева<sup>4</sup>,

Денис Александрович Циммер<sup>5</sup>

<sup>1,2,3,4,5</sup>Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина, Тамбов, Россия

<sup>1</sup>sedoplatov2010@yandex.ru

<sup>2</sup>sseedd@mail.ru

<sup>3</sup>fedotov125@yandex.ru

<sup>4</sup>solomina-oa@yandex.ru

<sup>5</sup>denis.tsimm@mail.ru

## АНАЛИЗ АППАРАТУРНОГО ОФОРМЛЕНИЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССА МЕМБРАННОГО КОНЦЕНТРИРОВАНИЯ ЖИДКИХ ПИЩЕВЫХ СИСТЕМ

Цель исследования – анализ динамики развития аппаратурного оформления интенсификации процессов мембранныго концентрирования (разделения) жидких технологических растворов по материалам изобретательской практики для пищевой и перерабатывающей промышленности, а также выявление базовых структурных компонентов и технических результатов, их характеризующих. Объект исследования – аппаратурное оформление мембранныго разделения и концентрирования жидких неоднородных систем в пищевой и перерабатывающей промышленности АПК. Методы исследования – системный анализ динамики развития конструктивных решений и обзор проблемного поля, а также статистический метод количественной оценки интенсивности изобретательской деятельности по совершенствованию мембранных аппаратов концентрирования и разделения жидких сред. Основное внимание уделено сравнительному анализу конструкций, их достоинствам и недостаткам, таким как: материаломость, сложность эксплуатации, гидравлическое сопротивление и др. Проведенный анализ литературных и патентных данных выявил четыре основных класса аппаратов для баромембранныго концентрирования (разделения) растворов при интенсификации процесса наложением постоянной плотности тока: электробаромембранные аппараты плоскорамного (плоскокамерного) типа (ЭБМАПТ), ЭБМАТТ (трубчатого типа), ЭБМАРТ (рулонного типа), ЭБМАКТ (комбинированного типа). Анализ результатов исследования показал: 1) ЭБМАПТ обеспечивают приемлемую для производств производительность, но их использование требует значительных материальных затрат; 2) ЭБМАТТ компактны и эффективны, но сложны в эксплуатации; 3) ЭБМАРТ имеют высокую площадь фильтрования и производительность, но их ремонт является затруднительным; 4) ЭБМАКТ сочетают преимущества аппаратов плоскокамерного и трубчатого типа, но длина их канала разделения велика, что сказывается на гидравлическом сопротивлении. На основе анализа аппаратурного оформления мембранных устройств различных типов для интенсификации мембранныго концентрирования (разделения) жидких пищевых систем предложена схема классификации по конструктивному оформлению.

**Ключевые слова:** мембранные концентрирование (разделение), аппаратурное оформление, процесс разделения, пищевая промышленность

**Для цитирования:** Седоплатов И.С., Ковалев С.В., Федотов Н.А., и др. Анализ аппаратурного оформления интенсификации процесса мембранных концентрирования жидких пищевых систем // Вестник КрасГАУ. 2026. № 1. С. 190–213. DOI: 10.36718/1819-4036-2026-1-190-213.

Ivan Sergeyevich Sedoplatov<sup>1</sup>, Sergey Vladimirovich Kovalev<sup>2</sup>, Nikita Aleksandrovich Fedotov<sup>3</sup>, Olga Aleksandrovna Kovaleva<sup>4</sup>, Denis Aleksandrovich Zimmer<sup>5</sup>

<sup>1,2,3,4,5</sup>Tambov State University named after G.R. Derzhavin, Tambov, Russia

<sup>1</sup>sedoplatov2010@yandex.ru

<sup>2</sup>sseedd@mail.ru

<sup>3</sup>fedotov125@yandex.ru

<sup>4</sup>solomina-oa@yandex.ru

<sup>5</sup>denis.tsimm@mail.ru

## HARDWARE DESIGN ANALYSIS TO INTENSIFY MEMBRANE CONCENTRATION PROCESS IN LIQUID FOOD SYSTEMS

*The objective of the study is to analyze the development dynamics of instrumentation for intensifying membrane concentration (separation) processes for liquid process solutions based on inventive practice in the food and processing industries, as well as to identify the basic structural components and technical results characterizing them. The object of the study is the instrumentation for membrane separation and concentration of liquid heterogeneous systems in the food and processing industries of the agro-industrial complex. The research methods include a systems analysis of the development dynamics of design solutions and a review of the problem field, as well as a statistical method for quantifying the intensity of inventive activity to improve membrane apparatuses for concentrating and separating liquid media. Primary attention is paid to a comparative analysis of designs and their advantages and disadvantages, such as material consumption, operational complexity, hydraulic resistance, etc. The conducted analysis of literary and patent data revealed four main classes of devices for baromembrane concentration (separation) of solutions with the intensification of the process by applying a constant current density: electric baromembrane devices of the flat-frame (flat-chamber) type (EBMAPT), EBMATT (tubular type), EBMART (roll type), EBMAKT (combined type). The analysis of the research results showed: 1) EBMAPT provide the productivity acceptable for production, but their use requires significant material costs; 2) EBMATT are compact and efficient, but difficult to operate; 3) EBMART have a high filtration area and productivity, but their repair is difficult; 4) EBMAKT combine the advantages of flat-chamber and tubular type devices, but the length of their separation channel is large, which affects the hydraulic resistance. Based on an analysis of the hardware design of various types of membrane devices for intensifying membrane concentration (separation) of liquid food systems, a classification scheme based on design is proposed.*

**Keywords:** membrane concentration (separation), hardware design, separation process, food industry

**For citation:** Sedoplatov IS, Kovalev SV, Fedotov NA, et al. Hardware design analysis to intensify membrane concentration process in liquid food systems. *Bulletin of KSAU*. 2026;(1):190-213. (In Russ.). DOI: 10.36718/1819-4036-2026-1-190-213.

**Введение.** Интенсивное развитие экономики промышленного пищевого и перерабатывающего производства АПК базируется на объективных данных о состоянии и перспективах развития материального оснащения предприятия, степени эффективности использования материальных и энергетических ресурсов [1]. В полной мере это относится к отрасли разработки, применения основных процессов и аппаратов

пищевых производств – мембранных концентрирования, разделения жидких неоднородных систем, например в пивоваренной, сахарной, биохимической, крахмалопаточной и других отраслях промышленности [2–4].

Процессы и аппараты мембранных концентрирования, разделения жидких неоднородных систем условно классифицируются на несколько основных классов: баромембранные (БМА),

электромембранные (ЭМА) и электробаромембранные (ЭБМА). Подобные классы отличаются лишь возможностью использования той или иной перегородки (пористой, ионообменной) и наличием движущих сил или их комбинаций (перепада до и после мембраны: концентрации, давления, электрического потенциала и других параметров) в процессе переработки жидких неоднородных систем в пищевой и перерабатывающей промышленности АПК при циркуляции растворов в межмембранных каналах [5–7].

Проектирование и разработка нового оборудования для мембранных концентрирования (разделения) технологических растворов пищевых и агроперерабатывающих производств из растительного сырья необходимо для интенсификации процесса получения и выхода полу-продуктов, готовых продуктов в технологических схемах производства, например сахара, пива, вина, спирта и др. [8–10].

Для решения данной проблемы необходимо: во-первых, предоставить системный подход к разработке научного исследования технологических процессов, а во-вторых, комплексно оценить, с использованием литературных и патентных данных, различные перспективные аппаратурные решения, которые могут применяться для разделения высокомолекулярных соединений и коллоидных частиц (является одним из проблемных моментов мембранныго разделения).

Интенсификация процесса мембранных концентрирования при создании нового технологического оформления должна обеспечивать модульный принцип проектирования и расчета аппаратов для разделения (концентрирования) жидких неоднородных систем, нашедший применение при оценке стоимости элементов (по материалам) конструкций аппаратов.

Доля отечественного мембранныго оборудования на российском рынке пищевого машиностроения остается невысокой, при этом устаревающие решения утратили должную конкурентоспособность в этом секторе рынка. В связи с этим рассмотрение эволюционных особенностей динамики совершенствования, развития аппаратуры и техники российского рынка в РФ, в частности: мембранных, электромембранных, электробаромембранных процессов, дает хорошие возможности повысить отечественный уровень до лучших зарубежных аналогов, а не-редко и превзойти их [11, 12].

**Цель исследования** – анализ динамики развития аппаратурного оформления интенсификации процессов мембранных концентрирования (разделения) жидких технологических систем по материалам изобретательской практики для оценки оптимального выбора лучшего мембранныго аппарата для пищевой и перерабатывающей промышленности, а также выявление базовых структурных компонентов и технических результатов, их характеризующих.

**Задачи:** провести систематизацию классов конструкций аппаратов для интенсификации процессов мембранных концентрирования жидких систем, применяемых в пищевой и перерабатывающей промышленности; проанализировать динамику проектирования (конструирования) и развития аппаратуры для интенсификации процессов мембранных концентрирования жидких пищевых систем с 1991 г. и по первую половину 2025 г.; провести сравнительный анализ аппаратурного оформления для интенсификации процессов мембранных концентрирования (разделения) жидких пищевых систем, позволяющий выявить особенности эксплуатации подобных устройств и критерии выбора оптимальной конструкции; на основе анализа и систематизации аппаратурного оформления мембранных устройств различных типов для интенсификации мембранных концентрирования (разделения) жидких пищевых систем разработать схему классификации по их конструктивному оформлению.

**Объекты и методы.** Объектом исследования являлось аппаратурное оформление мембранных разделения и концентрирования жидких неоднородных систем в пищевой и перерабатывающей промышленности АПК.

В качестве предмета исследования рассматривался анализ динамики развития аппаратурного оформления мембранных разделения и концентрирования растворов и проектирования конструкций различных типов с выявлением базовых структурных компонентов и технических результатов, их характеризующих.

В качестве метода исследования использовался системный анализ динамики развития конструктивных решений и обзор проблемного поля, а также статистический метод количественной оценки интенсивности изобретательской деятельности по совершенствованию мембранных аппаратов концентрирования и разделения жидких сред.

1. Системный анализ позволяет:
  - изучить, как различные конструктивные решения в сфере мембранных аппаратостроения развиваются во времени (изменения в применяемых материалах, используемых технологиях, дизайне и функциональности аппаратов и появление новых классов аппаратов);
  - выявить ключевые проблемы и трудности (недостатки), с которыми сталкиваются разработчики конструкций мембранных аппаратов (вопросы эффективности, устойчивости, стоимостного анализа и других факторов, влияющих на производительность и задерживающей способность устройств с оснащением их мембранами).
2. Статистический метод позволяет:
  - количественно оценить интенсивность изобретательской деятельности при анализе данных о патентах, публикациях и других формах изобретательской активности в области мембранных процессов разделения жидкых технологических растворов. Это поможет определить направления и тренды, имеющиеся в настоящее время в данной области, а также провести оценку активных групп исследователей и компаний с оценкой влияния факторов на уровень инноваций;
  - оценить, какие конструктивные изменения и решения приводят к улучшению характеристик мембранных аппаратов, например качество и эффективность разделения растворов, долговечность и экономичность их использования.

**Результаты и их обсуждение.** Мембранные аппараты должны обладать значительной поверхностью мембран на единицу объема конструкции и быть достаточно легкими в сборке и установке, поскольку мембранам требуется замена при снижении их производительности и задерживающей способности при очистке воды и переработке жидким технологическим раствором пищевых производств [13].

При движении жидкой среды по камерам разделения аппарата существует необходимость равномерного ее распределения по мембранный поверхности и должна обеспечиваться достаточно высокая скорость потока раствора в тонком межмембранным канале (от 1 до 5 мм, а по некоторым данным и до 8–12 мм). Например, при проведении процессов нанофильтрации (электронанофильтрации), электрогиперфильтрации (гиперфильтрации), электродиализа, электродеионизации для минимизации влияния концентрационной поляризации (резкого возрастания концентрации растворенного вещества у поверхности мембранны и проскака исследуемого компонента в пермеате) [14–16].

При этом перепад трансмембранных давления в начале и конце мембранных аппаратов при баромембранных и электробаромембранных концентрировании по его длине должен быть, насколько это возможно, небольшим, так как это может оказаться на проницаемости обрабатываемых жидкостей через мембрану. Необходимо соблюдать требования и меры безопасности операторов, эксплуатирующих подобные аппараты, в части, касающейся работы устройств под избыточным трансмембранным давлением и при постоянной токовой нагрузке. Подобные обстоятельства, в конечном счете, будут влиять на обеспечение механической прочности, герметичности и других характеристик материалов, из которых планируется изготавливать аппарат, и соответственно на оценку стоимости материалов, из которых он изготовлен [17, 18].

Основными материалами, применяемыми для переработки жидким пищевых систем, являются различные прокаты нержавеющих сталей отечественного и иностранного производства: 12Х18Н10Т сварные аппараты и сосуды, водопроводные трубы (аналог – AISI 321, 321Н) с содержанием компонентов в % (Cr – 17–19, Ni – 9–11, Mn – не более 2, Si – не более 0,8, Ti – 0,6–0,8, Cu – не более 0,3, P – не более 0,035, S – не более 0,02) – коррозионностойкая, термостойкая; 12Х18Н12Т детали, работающие в условиях повышенной температуры (с содержанием компонентов в %: Cr – 17–19, Ni – 11–13, Mn – до 2, Si – до 0,8, Cu – до 0,3, С – до 0,12, Р – до 0,035, S – до 0,02, Ti – 0,7, остальное – Fe) – коррозионностойкая, термостойкая; 20Х23Н18 камеры сгорания, хомуты, подвески, бесшовные трубы (аналог – AISI 310) с содержанием компонентов в % (Cr – 22–25, Ni – 17–20, Mn – не более 2, Si – не более 1, Cu – не более 0,3, Ti – не более 0,2, Р – не более 0,035, S – не более 0,02) – термостойкая и другие (10Х18Н10Т, 12Х18Н9Т и т. д.).

**Полимеры и композиты: капролон (полиамид 6) и его модификации.** Материал не токсичен для живых организмов, стоек в водных растворах пищевых сред.

Создание идеального аппарата, который одновременно и полностью удовлетворяет всем перечисленным требованиям, представляется, по всей видимости, невозможным. Ввиду этого выбор оптимального аппарата является важным и ответственным этапом настоящего исследования и достаточно сложным. Первоначально необходимо обработать входную информацию

по имеющимся в настоящее время перспективным конструктивным решениям в этой области, которая связана с ретроспективной исторической по годам публикации подобных технических решений. Нами был проведен предварительный анализ технических решений этой области, а далее проведена оценка непосредственного исполнения конструктивного исполнения этих устройств. Предварительный анализ входной информации выявил множество альтернатив в классах подобных аппаратов, и выбор был обоснован тем, что они универсальны (то есть могут использоваться как баромембранные и электробаромембранные аппараты) и могут применяться в различных сферах пищевой и перерабатывающей промышленности: молочная, сахарная, спиртовая и другие [19–21].

Подобные этим классам аппараты в иностранных работах нами выявлены не были, поэтому было принято решение провести анализ и обработку информации по отечественным разработкам при проведении тематического поиска из баз данных конструктивных решений ФГБУ «Федеральный институт промышленной собственности» и отечественных литературных данных.

Обработка информации, полученной при помощи поискового запроса базы данных ФИПС, проведена в исторической ретроспективе с 1991 по 2025 г. (I полугодие). За этот период запатентовано более 50 конструкций электробаромембранных аппаратов различных классов (рис. 1).

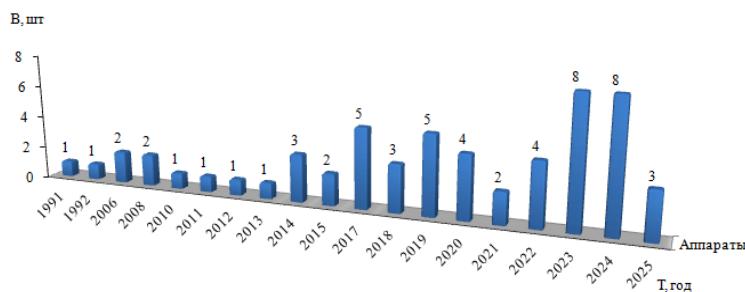


Рис. 1. Суммарное распределение различных классов конструкций ЭБМА по годам их публикации  
*Total distribution of different classes of EBMA designs by year of their publication*

Анализ зависимости суммарного распределения различных классов конструкций ЭБМА по годам их публикации позволил выделить три периода со всплесками публикационной активности: первый – с 1991 по 2011 г.; второй – с 2011 по 2021 г.; третий – с 2021 по 2025 г. (I полугодие). Такая периодичность экспериментальной зависимости количества запатентованных аппаратов от времени их появления объясняется существованием трех поколений ученых, занятых в данной сфере (ориентировано появляющихся в научных коллективах, приходящихся в среднем на 10 лет), за исключением последнего периода (5 лет). При этом можно предположить, что подобная периодичность разбиения будет повторяться и далее. Случайный характер изменения подобной зависимости может проявиться, например, в случае выпадения ведущего ученого или научного руководителя из коллектива по объективным причинам (переход на другое место работы, отъезд из РФ на временное или постоянное жительство в другую страну и др.). При этом стоит отдельно остановиться на коллективах, которые занимаются разработкой подобных классов аппаратов по

данным ФИПС. Основными коллективами являются: Тамбовский государственный технический университет, Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина, ООО «ТМБ-Технологии».

Дальнейшее разбиение на классы аппаратов электробаромембранного концентрирования (разделения) жидких систем можно объяснить перспективностью использования того или иного класса ЭБМА при разбиении на группы. Анализ распределения конструкций аппаратов по классам и годам представлен на рисунке 2.

Все классы имеют свои достоинства и недостатки, некоторые из которых перекрывают предыдущие решения в этой области. Нами проводился аналитический обзор всех конструкций аппаратов в классах и оценивались наиболее перспективные решения (см. рис. 1, 2).

Принятие решений по выбору оптимальной конструкции аппаратов для мембранных разделения и концентрирования жидких технологических растворов является достаточно сложной задачей, при которой необходимо находить решения, учитывающие частные критерии оптимальности для конкретного класса аппаратов.

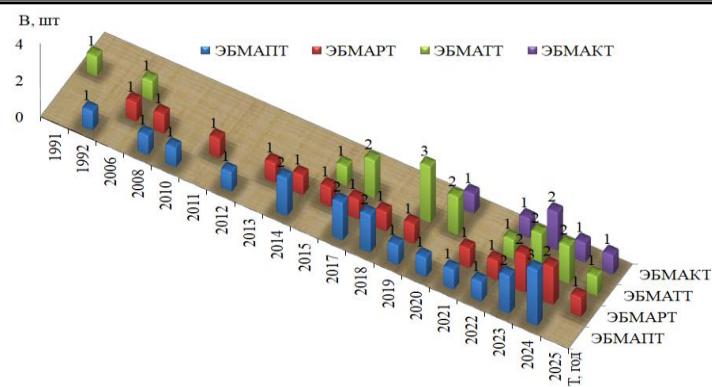


Рис. 2. Распределение ЭБМА в разрезе конструкций по годам их публикации  
The distribution of EBMA by structural types across the years of their publication

Для выбора наилучшей альтернативы из показанных на ресурсе ФИПС и в литературе следует рассмотреть их в зависимости от конструктивного исполнения (классов конструкции) (рис. 3–10), но с обязательным условием использования перед их применением предварительного разделения растворов и суспензий, например при помощи гидроциклонов, центрифуг и т. д. [22–24].

Системный анализ электробаромембранных аппаратов в период времени с 1991 по 2025 г. (I полугодие) позволил выявить различные традиционные классы конструкций (плоскокамерного, трубчатого, рулонного типа) и показал на основе статистических данных (см. рис. 2) их появление, что сформировался новый класс конструкций комбинированных аппаратов (первое появление – 2020 г.).

На основе системного подхода приведем краткий анализ современных конструкций электробаромембранных аппаратов, которые потенциально могут применяться для концентрирования жидких пищевых сред и растворов, содержащих механические включения и коллоидные частицы.

Здесь и далее (рис. 3–10) приведено устройство конструкций проанализированных мембранных аппаратов, для которых подробное описание не рассматривалось, так как оно его загромождает и существенно не влияет на получение технических результатов. Но стоит отметить общий принцип действия подобных устройств мембранного концентрирования и разделения растворов при интенсифицирующем воздействии в виде наложения на систему «рассоль-мембрана» постоянного электрического тока при действии трансмембранного давления и при отсутствии действия тока.

Для технологических жидких потоков пищевых производств, которые содержат соли (с диссоциацией на ионы), сахара и механические включения, коллоидные частицы, при одновременном влиянии избыточного давления (выше осмотического) и электрического тока, схема разделения выглядит следующим образом. Ионы (катионы и анионы) соответственно переносятся к мембранам (прикатодным, прианодным), проникают через поры и отводятся в виде пермеатов (щелочных и кислотных) из аппарата, а ретентат с неэлектролитом, содержащим механические включения, коллоидные частицы, сахара, отводится из аппарата при дальнейшей обработке на промышленном предприятии.

При баромембранным разделении (концентрировании) растворов пищевых и агроперерабатывающих производств жидкая фаза движется между двумя мембранами, через полупроницаемые мембранные только под действием трансмембранного давления (превышающего осмотическое) преимущественно выделяется растворитель в пермеат, а растворенные вещества (например, соли, сахара, механические включения и коллоидные частицы) остаются в ретентате (задерживаются мембранными), которые затем в виде концентрата отводятся из аппарата.

1. Электробаромембранные аппараты плоскорамного (или плоскокамерного) типа (ЭБМАПТ) представляют собой набор плоских мембранных расположенных на диэлектрических камерах, под которыми расположены пористые подложки, монополярно-пористые электроды (катоды, аноды), дренаж. На рисунке 3 представлены ЭБМА без охлаждения растворов горизонтального с одним контуром разделения (а, б, в, г) [25–28]; с двумя контурами разделения (д, е, ж, з) [29–32] и вертикального вида (к) [33].

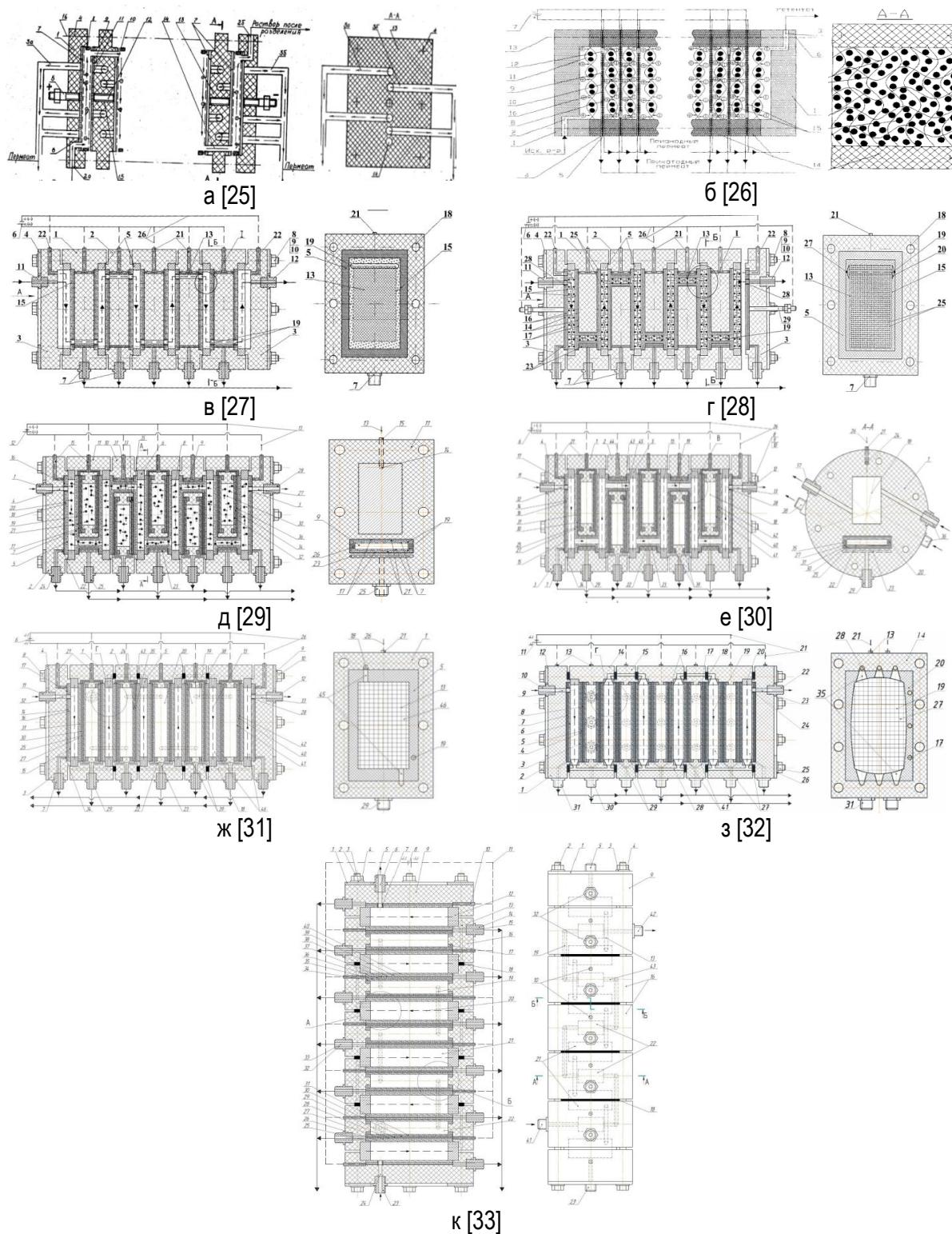


Рис. 3. Электробаромембранный аппарат плоскорамного (плоскокамерного) типа без охлаждения растворов горизонтального (а, б, в, г, д, е, ж, з) и вертикального вида (к)  
*Electrobaromembrane apparatus of the flat-frame (flat-chamber) type without cooling of solutions of horizontal (a) [25], (b) [26], (e) [27], (g) [28], (d) [29], (e) [30], (ж) [31], (з) [32] and vertical type (к) [33]*

На рисунке 4 показаны мембранные аппараты с охлаждением растворов, которые условно можно разделить на устройства с плоской охлаждающей камерой (а, б) [34, 35] и с применени-

ем специальных гнутых, свернутых, спиральных элементов-трубок (в, г) [36, 37]. Технические результаты аппаратурного оформления ЭБМАПТ: повышение производительности и качества

разделения растворов, турбулизации раствора, охлаждение разделляемого (исходного) раствора

и пермеатов, снижение эффекта концентрационной поляризации и другие.

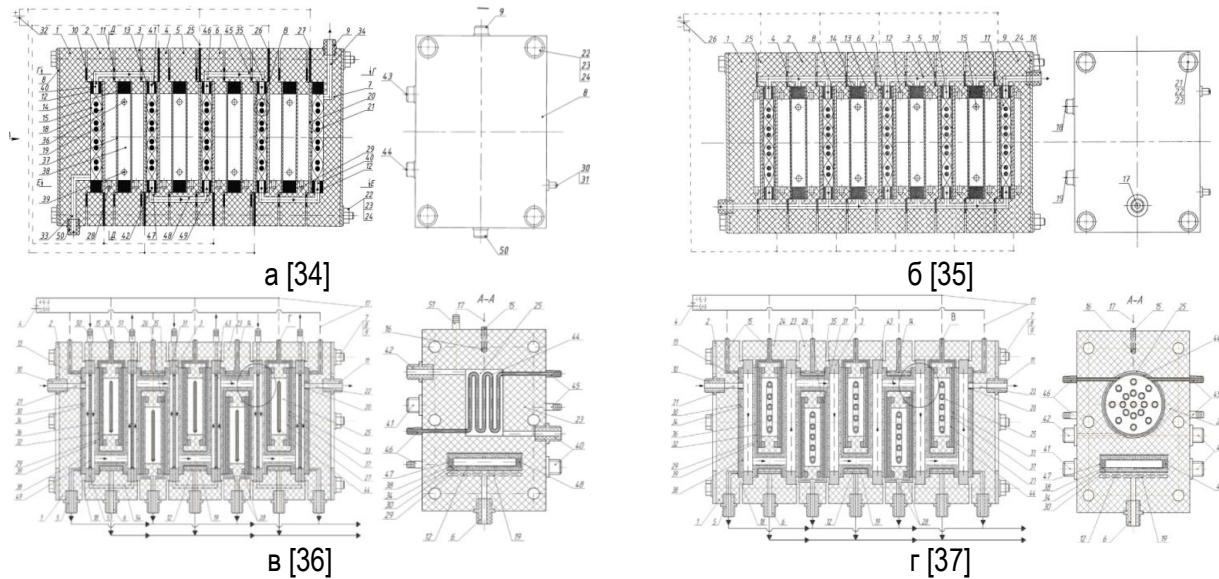


Рис. 4. Электробаромембранный аппарат плоскорамного (плоскокамерного) типа с охлаждением растворов (с плоской охлаждающей камерой – а, б), (со специальными гнутыми, свернутыми, спиральными элементами-трубками – в, г)

*Electrobaromembrane apparatus of the flat-frame (flat-chamber) type with solution cooling (featuring a flat cooling chamber – a, b) and with special bent, coiled, spiral tube elements – в, г)*

Анализ устройств (см. рис. 3, 4) выявляет существенные недостатки указанного класса аппаратуры [30, 36, 37] в виде значительного расхода конструкционного материала, особенно при обеспечении круглых и прямоугольных малых камер разделения, около которых остается неиспользуемым значительный объем материала, что, как следствие, сказывается на значительном перерасходе материальных ресурсов предприятия при изготовлении (особенно, когда в межмембранным канале камер разделения установлены трубы для охлаждения, которые блокируют часть рабочей поверхности мембран [36, 37] для течения растворителя).

Более удачными конструкциями являются аппараты (см. рис. 3, ж) [31] и устройство з [32], обеспечивающие большую площадь разделения (соответственно производительность) по сравнению с ранними аналогами (см. рис. 3, а, е [25–30]. За счет наличия двух контуров разделения (наряду с одним контуром) в мембранных аппаратах горизонтального (см. рис. 3, д, з [29, 32] и вертикального вида к [33] снижается гидравлическое сопротивление по пути циркуляции раствора, в отличие от аппаратов с одним контуром разделения (см. рис. 3, а, г [29–32], примерно в 2 раза (но при этом одноконтурные ап-

параты обеспечивают большую степень концентрирования одного контура по длине).

Конструкции мембранных аппаратов плоскокамерного типа обеспечивают удовлетворительный выходной поток (производительность), коэффициент задержания для полупроницаемых мембран по различным компонентам растворенного вещества (ионам солей), но могут работать также с сахарами, взвешенными веществами, коллоидными частицами, которые сопровождают практически все процессы разделения жидких пищевых систем при образовании динамических мембран.

Имеются и другие конструкции мембранных аппаратов плоскокамерного типа, что подтверждается экспериментальными данными (см. рис. 1, 2), которые могут найти свое применение в пищевой и агроперерабатывающей отраслях промышленности, но уступают рассмотренным ранее по количеству технических результатов при анализе их реализации.

2. Электробаромембранные аппараты с трубчатым типом элементов (ЭБМАТ) или трубчатого типа (см. рис. 5, 6) (аналогично кожухотрубчатым теплообменникам) горизонтального вида состоят из корпуса, крышек (фланцев), трубок с мембранными (размер диаметра,

которых варьируется от 10 до 30 мм), внутри которых размещены токоподводящие цилиндрические щупы [38–41]. Существуют подобные аппараты без охлаждения растворов (рис. 5, а) [38] с одинаковым объемом трубок с мембранами,

(г [41] с различным объемом трубок с мембранными) и с охлаждением растворов (см. рис. 5, в) [39] с цилиндрическими щупами и охлаждающими трубками, г [40] с полыми цилиндрическими щупами).

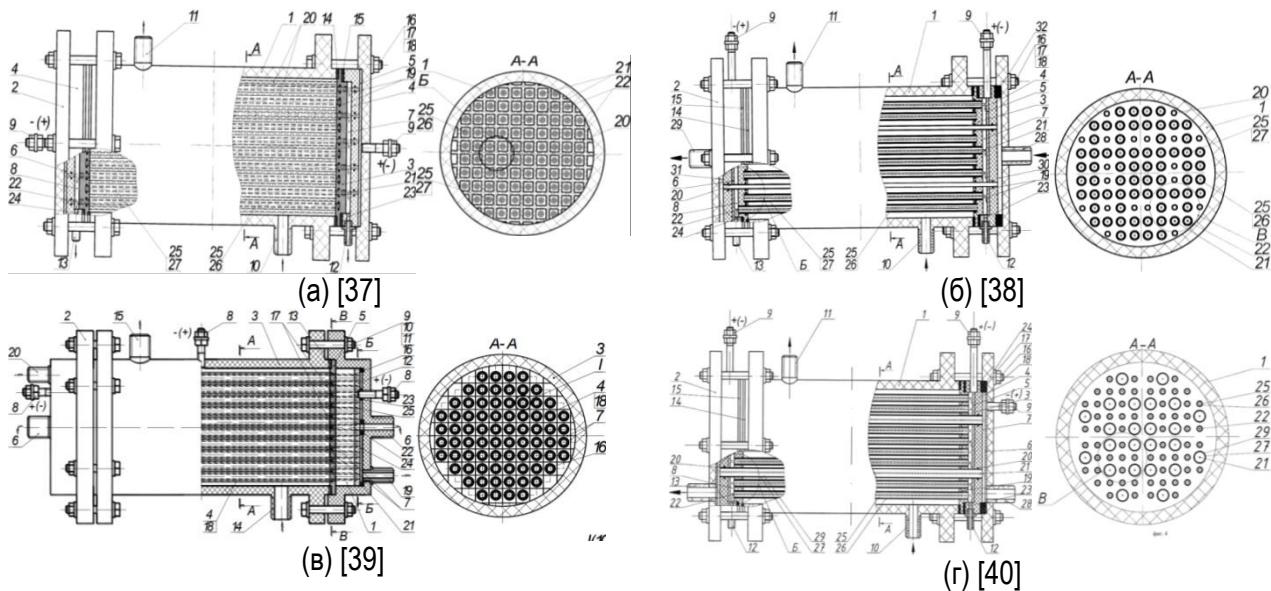


Рис. 5. Электробаромембранный аппарат трубчатого типа горизонтального вида [38–41]  
Electrobaromembrane apparatus of the tubular type with a horizontal configuration [38–41]

Технические результаты аппаратурного оформления ЭБМАТТ (см. рис. 5): повышение производительности и качества разделения растворов, турбулизация раствора, снижение эффекта концентрационной поляризации, охлаждение разделяемого раствора и другие.

Мембранные аппараты трубчатого типа вертикального вида показаны на рисунке 6.

Они состоят из корпуса аппарата, цилиндрической обечайки и центральной трубы, прижимных решеток, плоских торцевых крышек (фланцев), трубок с мембранами, размер диаметра которых варьируется от 10 до 30 мм, а внутри размещены токоподводящие монополярные электроды (см. рис. 6) [42–45]. Существуют подобные аппараты трубчатого типа вертикального вида с горизонтальными трубками без охлаждения растворов: с отсутствием сеток-турбулизаторов (рис. 6 а, б [42, 43], с плоскими горизонтальными сетками-турбулизаторами дискового типа (в) [44] и с цилиндрическими вертикальными сетками-турбулизаторами (г) [45]).

Технические результаты аппаратурного оформления ЭБМАТТ (см. рис. 6): повышение

производительности и качества разделения растворов, повышение турбулизации раствора, снижение застойных явлений при циркуляции (исходного) раствора, снижение эффекта концентрационной поляризации, отвод растворенных газов и другие.

Для подобных устройств (см. рис. 5, 6) плотность упаковки мембран в единице объема является достаточной для осуществления эффективного разделения растворов, особенно при обрастиании взвешенными веществами и коллоидными частицами.

Стоит отметить, что для конструкций мембранных аппаратов (см. рис. 6) отсутствует возможность охлаждения растворов, эту проблему можно решить предварительной установкой теплообменной аппаратуры перед ними в технологических схемах концентрирования (разделения) растворов пищевых и перерабатывающих производств, например кожухотрубчатого, пластинчатого типа, типа «труба в трубе». Основным достоинством можно указать способность быстрого монтажа и демонтажа конструкции для замены трубок из фторопласта с мембранами.

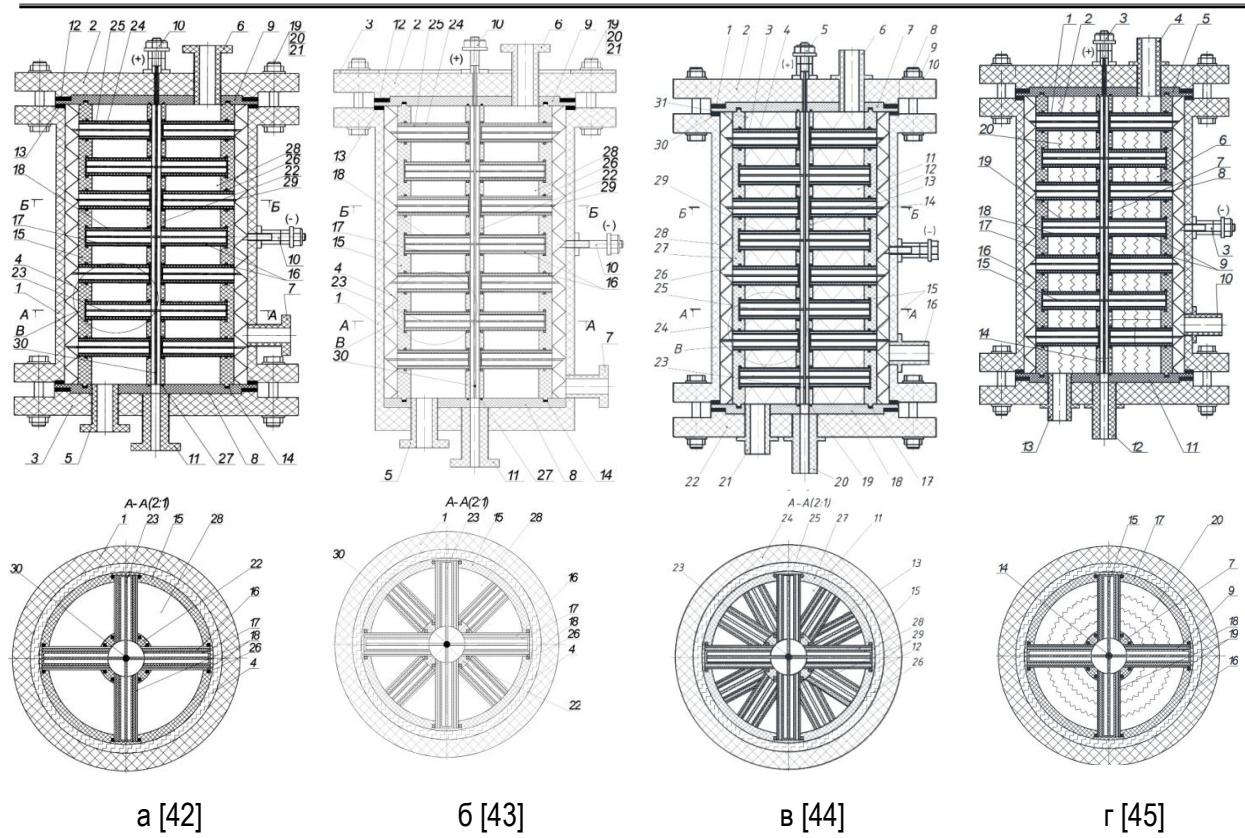


Рис. 6. Электробаромембранный аппарат трубчатого типа вертикального вида [42–45]  
*Electrobaromembrane apparatus of the tubular type with a vertical configuration [42–45]*

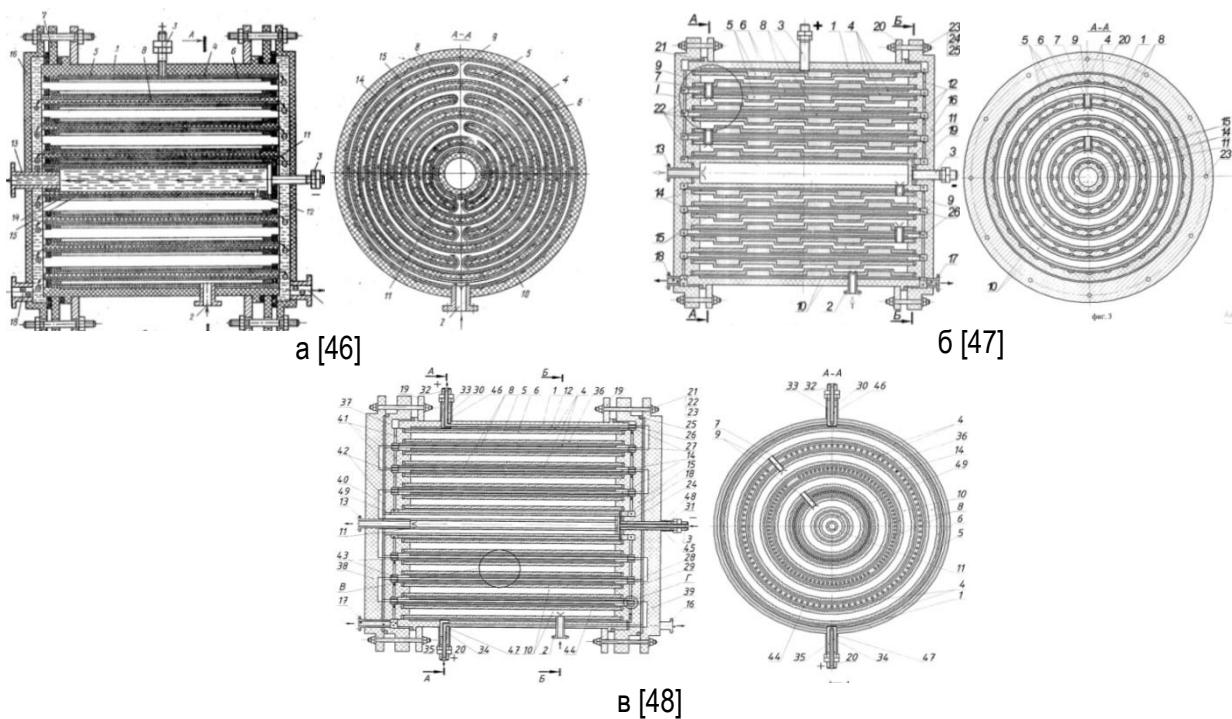
При анализе стоит отметить, что существуют конструкции мембранных аппаратов трубчатого типа горизонтального вида с концентрическими элементами (геометрическими объектами), например, трубок с окружностями разных радиусов. Подобные окружности образованы в поперечном разрезе цилиндрических обечаек-трубок с монополярными электродами размерами более 30 мм.

Мембранные аппараты трубчатого типа горизонтального вида с концентрическими элементами (трубками) существуют в нескольких конструктивных оформлениях (рис. 7): аппараты без охлаждения растворов (с плоскими крышками (а) [46], с плоскими крышками и гофрированными концентрическими элементами (б) [47] и с охлаждением растворов (с плоскими крышками (в) [48]).

Технические результаты аппаратурного оформления ЭБМАТТ (рис. 7): повышение производительности и качества разделения растворов, повышение турбулизации раствора, охлаждение разделяемого (исходного) раствора, снижение эффекта концентрационной поляризации, отвод растворенных газов непосредственно в потоках пермеатов.

Подобные конструкции мембранных аппаратов трубчатого типа (рис. 7) являются более простыми в изготовлении за счет плоских крышек, на которые необходимо затрачивать меньше конструкционного материала, в отличие от аппаратов со сферическими крышками (рис. 8, а [49, 50], б [51]) и со сферическими крышками, газоотводчиками и отводящими пермеат штуцерами (рис. 8, в [52], г [53], д [54], е [55]).

Технические результаты аппаратурного оформления ЭБМАТТ (см. рис. 8): увеличение площади разделения, повышение производительности и качества разделения растворов, повышение турбулизации раствора, охлаждение растворов, снижение эффекта концентрационной поляризации, отвод растворенных газов из пермеатов газоотводчиками, упрощение изготовления элементов аппарата, уменьшение засорительных явлений, материалоемкости в единице объема аппарата.



Анализируя конструктивные элементы аппаратов трубчатого типа (см. рис. 8), стоит отметить монополярные электроды с подложками и мембранами, размещенными на концентрических элементах. Фильтрующие элементы (трубки) могут быть оснащены мембранами, размещенными снаружи или изнутри. В некоторых случаях размещение производится с обеих сторон [53–55].

Анализ устройств (см. рис. 8) выявляет существенные недостатки указанного класса аппаратуры в виде значительного расхода конструкционного материала, особенно при обеспечении круглых (сферических) крышечек [49–51] и выносных газоотводчиков и пермеатоотводящих штуцеров (патрубков) [52–55], около которых остается неиспользуемым значительный объем материала, что, как следствие, сказывается на значительном перерасходе материальных ресурсов предприятия при изготовлении аппаратуры (особенно когда в межмембранным канале камер разделения установлены элементы для охлаждающего раствора, которые блокируют часть рабочей поверхности мембран для течения растворителя).

Более универсальными мембранными аппаратами являются конструкции аппаратов трубчатого типа с плоскими крышками (см. рис. 7). Они обеспечивают такую же плотность упаковки мембран, как и конструкции аппаратов, представленных на рисунке 8.

Плотность самой упаковки мембран является небольшой, но обеспечивается приемлемая площадь фильтрации.

Данные аппараты способны работать долгий период, не подвергаясь замене (или промывке) при обраствании взвешенными веществами и коллоидными частицами, но уступают своей проницаемостью (производительностью) и задерживающей способностью другим типам конструкций, например, рулонным (см. рис. 9).

3. Электробаромембранные аппараты рулонного типа (ЭБМАРТ) представляют собой один или несколько последовательно вставленных в полимерный (или стальной для электробаромембранных работающих без токовой нагрузки) корпус рулонных модулей, каждый из которых представляет собой две склеенные между собой мембранны, разделенные пористым дренажным слоем, по которому движется пермеат.

Плотность упаковки мембран является существенной. Подобные аппараты сложны в из-

готовлении и не имеют возможности замены отдельных мембран, если они запаяны в полимерной обечайке.

Мембранные аппараты рулонного типа представлены на рисунке 9.

Подобные устройства по конструктивному оформлению можно условно разделить (рис. 9) на аппараты с плоскими крышками: с одной секционированной перфорированной пермеатоотводящей трубкой (а) [56, 57] и одной полой перфорированной пермеатоотводящей трубкой (б) [58].

Аппараты с плоскими крышками, одной полой (или секционированной) перфорированной щелевой трубкой и полуцилиндрами корпуса аппарата (без охлаждения (см. рис. 9, в, г, д [59–61]) и с охлаждением растворов (горизонтального и вертикального типов (см. рис. 9, е, ж [62, 63])); с фланцами, вспомогательными трубками (для подачи, отвода разделяемого раствора), охлаждающим контуром (см. рис. 9, з [64]) и с фланцами, вспомогательными трубками (для подачи, отвода разделяемого раствора), турбулизирующим модулем типа «улитка» (см. рис. 9, и, к [65, 66]).

Технические результаты аппаратурного оформления ЭБМАРТ (рис. 9): повышение производительности и качества разделения растворов, турбулизация раствора, охлаждение растворов, снижение эффекта концентрационной поляризации и др.

Наиболее сложными в исполнении являются аппараты со специальными турбулизирующими модулями типа «улитка» (см. рис. 9, и, к [65, 66]). Более простыми являются конструкции устройств с плоскими крышками и одной секционированной перфорированной пермеатоотводящей трубкой (или полой пермеатоотводящей трубкой), (см. рис. 9, а [56, 57], б [58]), так как на них затрачивается мало материала при изготовлении.

Промежуточное положение между теми и другими занимают аппараты с плоскими крышками, одной полой (или секционированной) трубкой и полуцилиндрами корпуса аппарата (без охлаждения (см. рис. 9, в, г, д [58–60]) и с охлаждением растворов горизонтального и вертикального типов (см. рис. 9, е, ж [61, 62]), а также аппараты с фланцами, вспомогательными трубками (для подачи, отвода разделяемого раствора), охлаждающим контуром (см. рис. 9, з [63]), но при этом требуется тщательная герметизация охлаждающего контура.

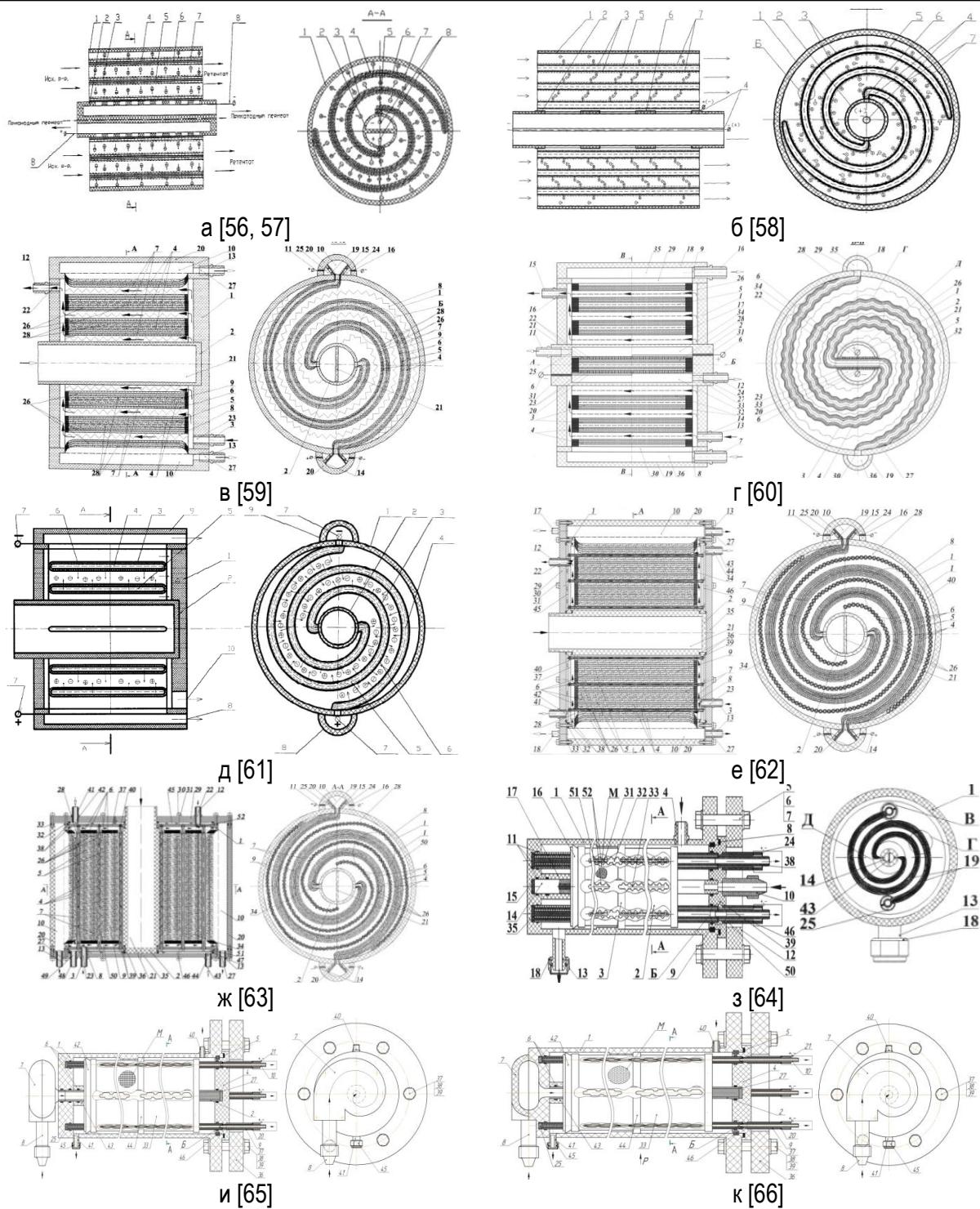


Рис. 9. Электробаромембранный аппарат рулонного типа [56–66]  
Electrobaromembrane apparatus of the roll type [56–66]

Плотность упаковки мембран в рулонных аппаратах является значительной (см. рис. 9), аппараты занимают мало места в цеху (или на производстве) и обеспечивают большую площадь фильтрации.

Сочетание преимуществ различных аппаратов отмечается в конструкциях аппаратов комбинированного типа.

4. Электробаромембранные аппараты комбинированного типа (ЭБМАКТ) являются относительно новым классом конструкций аппаратов, которые появились как класс впервые в 2020 г. В их основу легли подобные аппараты комбинированного типа, но только работающие чисто как баромембранные, которые могут использоваться для концентрирования и очистки

технологических растворов, например конструкция, представленная в работе [67]. Отличительной особенностью аппаратов этого типа является их форма – тор.

Приведем некоторые конструкции электробаромембранных аппаратов комбинированного типа с короткими (рис. 10, а [68]) и длинными трубками для концентрирования (разделения) растворов (см. рис. 10, б [69]).

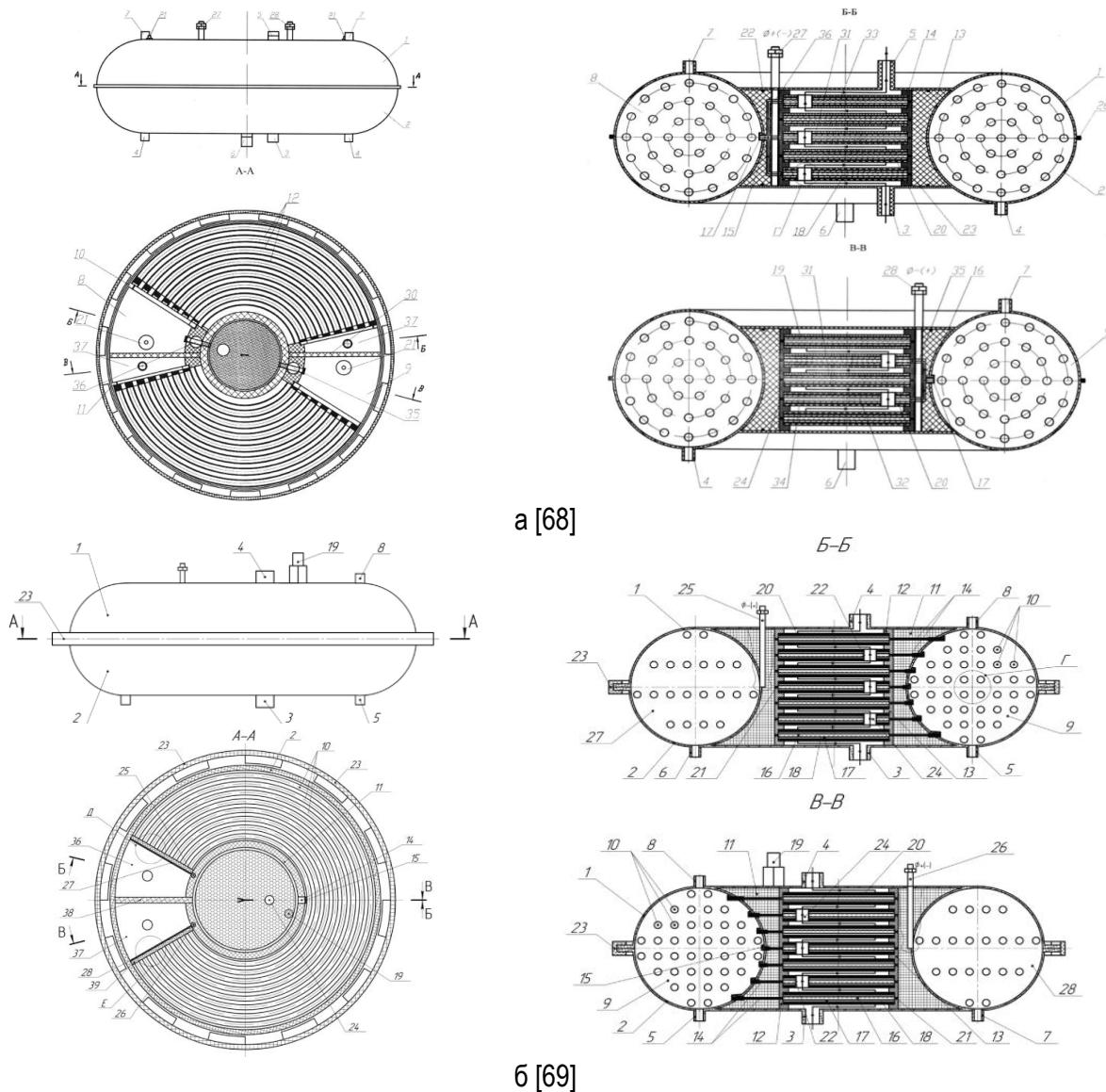


Рис. 10. Электробаромембранный аппарат комбинированного типа  
Electrobaromembrane apparatus of the combined type

Технический результат анализируемых конструкций мембранных аппаратов комбинированного типа заключается в увеличении поверхности разделения плоскокамерного элемента для первой ступени и для трубчатого модуля второй ступени концентрирования, повышении качества и эффективности концентрирования растворов, снижении гидравлического сопротивления в каналах для отвода пермеата первой ступени плоскокамерного модуля, но увеличении ее во второй ступени.

Эти конструкции аппаратов представляют собой совокупность плоскокамерных и трубчатых модулей, интегрированных в одной конструкции. Данные технические устройства содержат в себе все положительные стороны своих предшественников, но в то же время сложность и объемность конструкции несет некоторые издержки для внедрения на производстве.

Наличие торOIDальной формы конструкции комбинированного электробаромембранного аппарата обеспечивает хорошие прочностные ха-

рактеристики, что подтверждается данными работ [70, 71].

Сложностью изготовления аппаратов данного типа является высокое гидравлическое сопротивление, особенно в аппаратах с длинными трубками для разделения или концентрирования растворов.

На основе проведенного анализа и обобщения конструктивного оформления интенсификации процесса мембранных концентрирования (разделения) жидких систем предложена схема классификации подобных аппаратов (рис. 11).

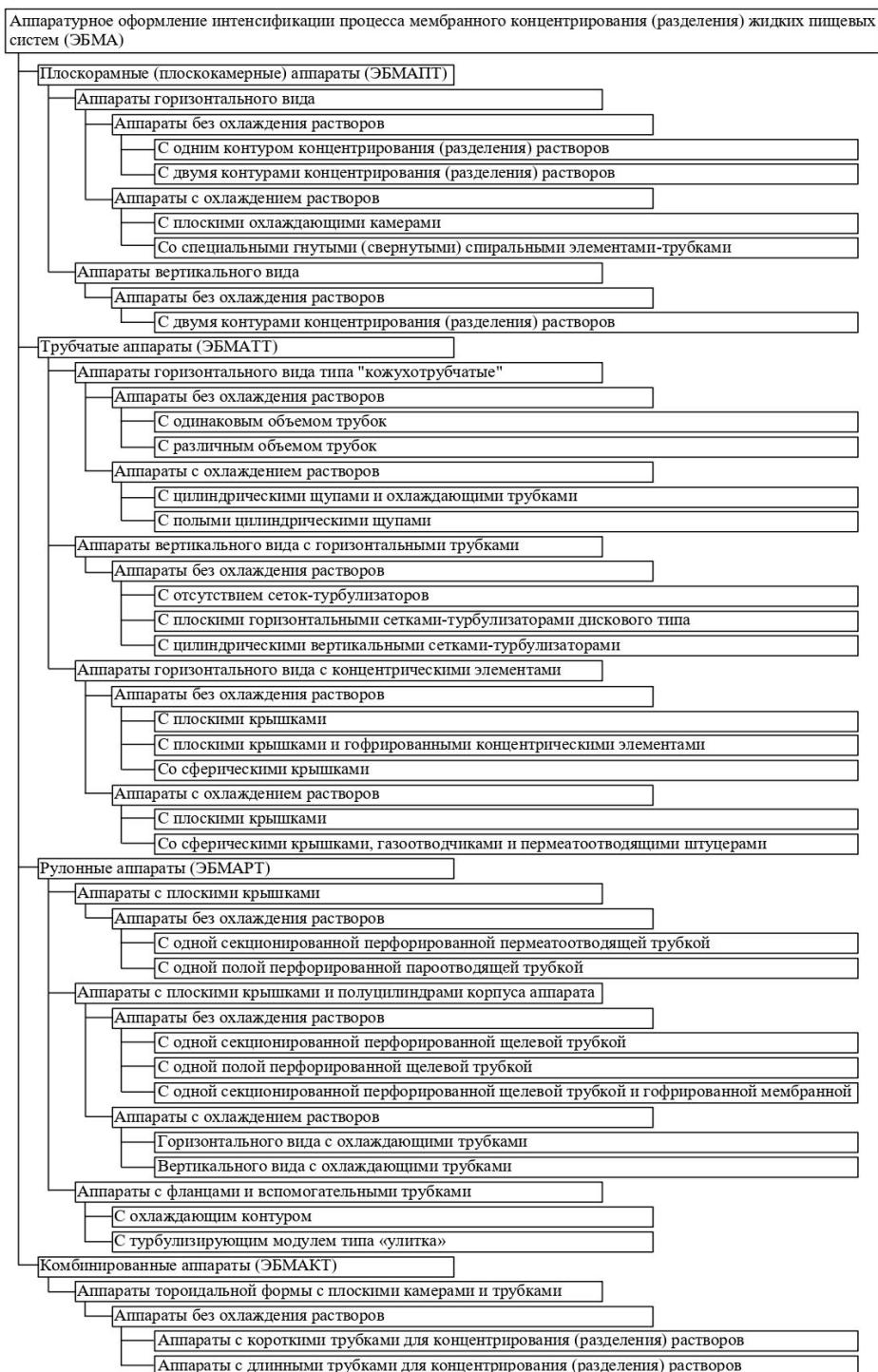


Рис. 11. Схема классификации мембранных аппаратов при интенсификации процесса концентрирования (разделения) жидких пищевых систем по конструктивному оформлению  
*Classification scheme of membrane devices for intensification of the concentration (separation) process of liquid food systems according to their design*

Рассматриваемое обобщение аппаратурного оформления мембранных устройств различных типов для интенсификации мембранных концентрирования (разделения) жидких систем позволило разработать схему структуры классификации по конструктивному оформлению (см. рис. 11). Подобная структура классификации по конструктивному оформлению мембранных аппаратов позволяет обоснованно подходить к выбору лучшей альтернативы единицы устройства для проведения процессов обработки жидких пищевых и перерабатывающих производств на производстве.

**Заключение.** В работе систематизированы четыре класса аппаратов для интенсификации мембранных концентрирования (разделения) жидких систем (ЭБМАПТ, ЭБМАТТ, ЭБМАРТ, ЭБМАКТ), которые могут использоваться в пищевой и перерабатывающей промышленности.

Проанализирована динамика проектирования (конструирования) и развития аппаратуры для интенсификации процессов мембранных концентрирования жидких пищевых систем начиная с 1991 г. и по первую половину 2025 г. При этом выявлены три характерных периода активизации изобретательской активности, что объясняется существованием трех поколений ученых, занятых в данной сфере (ориентировочно появляющихся в научных коллективах, приходящихся в среднем на 10 лет), за исключением последнего периода (5 лет).

Сравнительный анализ аппаратурного оформления для интенсификации процессов мембранных концентрирования (разделения) жидких пищевых систем позволил выявить следующие особенности эксплуатации подобных устройств:

– ЭБМАПТ обеспечивают высокую производительность и простоту замены мембран, но требуют больших материальных затрат на их изготовление и ввод в эксплуатацию;

– ЭБМАТТ компактны и эффективны при концентрировании растворов пищевых производств (особенно при наличии механических включений и коллоидных частиц), но сложны в изготовлении;

– ЭБМАРТ обладают высокой плотностью упаковки мембран и производительностью, вы-

сокой площадью фильтрации в единице конструкции, но их сложно ремонтировать, особенно если аппараты выполнены с запайкой торцевых крышек;

– ЭБМАКТ (появившиеся в 2020 г. как модификации баромембранных аппаратов подобного класса) сочетают достоинства аппаратов плоскокамерного и трубчатых элементов, но по длине канала разделения имеют высокое гидравлическое сопротивление.

Критериями при выборе оптимальной конструкции мембранных концентрирования жидких пищевых сред являются:

– для относительно вязких сред предпочтительными являются аппараты плоскокамерного типа;

– для серийного производства перспективными являются аппараты трубчатого типа, так как замена их элементов является относительно простой;

– для компактных технологических решений применимы рулонные аппараты, так как они обеспечивают большую площадь фильтрации и производительность;

– для увеличения долговечности основных элементов аппаратов (корпусов и крышек (фланцев)) необходимо применять перспективные материалы (полимеры и композиты) или решения, сочетающие как полимеры, так и металлы (нержавеющая сталь, платинированный титан и др.);

– для улучшения гидродинамики мембранных концентрирования – обеспечение как можно большей скорости фильтрования.

На основе анализа аппаратурного оформления мембранных устройств различных типов для интенсификации мембранных концентрирования (разделения) жидких пищевых систем предложена схема классификации по конструктивному оформлению. Разработанная схема классификации по конструктивному оформлению мембранных аппаратов позволяет обоснованно подходить к выбору лучшей альтернативы единицы устройства для проведения процессов обработки жидких пищевых и перерабатывающих систем на производстве.

Список источников

1. Карпенко Д. В., Дышекова М.М. Напитки на основе продуктов переработки сахарного тростника // Хранение и переработка сельхозсырья. 2021. № 1. С. 138–156. DOI: 10.36107/spfp.2021.197. EDN: WBPPKQ.
2. Лукин Н.Д., Кудряшов В.Л. Области применения, эффективность и перспективы использования баромембранных процессов в АПК // Хранение и переработка сельхозсырья. 2017. № 12. С. 44–52. EDN: YMTCVF.
3. Кудряшов В.Л. Нанофильтрация – перспективный способ подготовки воды для производства спирта // Производство спирта и ликероводочных изделий. 2011. № 3. С. 24–27. EDN: OIEAZ.
4. Ковалева О.А., Ковалев С.В. Разделение послеспиртовой мелассной барды на пористых мембранах УФМ-50®, УПМ-50М®, ОПМН-П® и ОФАМ-К® // Мембранные технологии. 2017. Т. 7, № 3. С. 213–224. DOI: 10.1134/S221811721703004X. EDN: YTFQUF.
5. Ковалева О.А. Концентрирование сахарного раствора различных производителей нанофильтрационными мембранами ОФАМ-К и ОПМН-П // Сахар. 2017. № 7. С. 24–27. EDN: ZBIVHR.
6. Ковалева О.А., Лазарев С.И. Исследование процесса обратноосмотического разделения технологических растворов производств кукурузного крахмала // Техника и технология пищевых производств. 2016. № 4 (43). С. 110–115. EDN: XELEQB.
7. Ключников А.И., Казарцев Д.А., Жуковская С.В., и др. Адаптация процесса микрофильтрации к технологическим процессам фильтрования пива // Агропромышленные технологии Центральной России. 2023. № 4 (30). С. 20–30. DOI: 10.24888/2541-7835-2023-30-20-30. EDN: IHDBKL.
8. Ключников А.И. Развитие мембранный техники, реализующей гидродинамическую неустойчивость на межфазной границе «мембрана – исходный раствор» // Агропромышленные технологии Центральной России. 2023. № 3 (29). С. 99–115. DOI: 10.24888/2541-7835-2023-29-99-115. EDN: LSZDUF.
9. Никулина О.К., Яковлева М.Р., Колоскова О. В., и др. Разработка способа получения сахара на основании научно-технологических аспектов очистки полупродуктов сахарного производства с использованием электромембранный обработки // Пищевая промышленность: наука и технологии. 2024. Т. 17, № 3 (65). С. 17–23. EDN: CJSJWD.
10. Никулина О.К., Яковлева М.Р., Колоскова О.В. Разработка способа получения сахара с использованием метода электродиализа в целях повышения эффективности работы сахарных предприятий // Пищевая промышленность: наука и технологии. 2024. Т. 17, № 4 (66). С. 27–34. EDN: URYCXA.
11. Никулина О.К., Дымар О.В., Колоскова О.В., и др. Применение комбинации баро- и электромембранных методов обработки для очистки диффузионного сока // Сахар. 2022. № 3. С. 22–26. DOI: 10.24412/2413-5518-2022-3-22-26. EDN: FNVSPM.
12. Никулина О.К., Дымар О.В., Колоскова О.В., и др. Применение электромембранных методов обработки для очистки густых полупродуктов сахарного производства // Сахар. 2022. № 4. С. 26–31. DOI: 10.24412/2413-5518-2022-4-26-31. EDN: VHOORH.
13. Лазарев В.А., Тимакова Р.Т., Тихонов С.Л., и др. Централизованная переработка сыворотки // Молочная промышленность. 2021. № 10. С. 30–32. DOI: 10.31515/1019-8946-2021-10-30-32. EDN: DBEYBG.
14. Кастьючик А.С., Шапошник В.А. Деионизация воды электродиализом с ионообменными мембранами, гранулами и сетками // Сорбционные и хроматографические процессы. 2009. Т. 9, № 1. С. 51–57. EDN: KBXNHF.
15. Васильева В.И., Шапошник В.А., Акберова Э.М., и др. Концентрационное поле в растворе на границе с ионообменными мембранами при нестационарном электродиализе // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Химия. Биология. Фармация. 2011. № 1. С. 15–20. EDN: OBLOUJ.
16. Козадерова О.А., Шапошник В.А., Шапошник Д.А. Колебательная неустойчивость концентрационного поля в сопряженных секциях концентрирования и обессоливания при интенсивных

режимах электродиализа // Сорбционные и хроматографические процессы. 2009. Т. 9, № 3. С. 345–353. EDN: KNVSPH.

17. Змиевский Ю.Г. Определение критических давлений в процессе мембранный дистилляции // Мембранные и мембранные технологии. 2015. Т. 5, № 1. С. 57. DOI: 10.1134/S2218117215010113. EDN: TFVTBT.

18. Змиевский Ю.Г., Киричук И.И., Мирончук В.Г., и др. Химическая очистка нанофильтрационных мембран после разделения молочной сыворотки // Мембранные и мембранные технологии. 2014. Т. 4, № 2. С. 149. DOI: 10.1134/S2218117214020102. EDN: SAJCWX.

19. Мирончук В.Г., Грушевская И.О., Кучерук Д.Д., и др. Экспериментальное исследование влияния высокого давления на эффективность процесса нанофильтрации молочной сыворотки при использовании мембран ОПМН-П // Мембранные и мембранные технологии. 2013. Т. 3, № 1. С. 3. DOI: 10.1134/S2218117212040062. EDN: PNSZBR.

20. Котов В.В., Перегончая О.В. Разделение сульфо-хлоридных смесей электродиализом с анионообменными мембранами, сорбировавшими пектин // Сорбционные и хроматографические процессы. 2015. Т. 15, № 4. С. 502–507. EDN: VWHSJH.

21. Бодякина И.М., Котов В.В., Нетесова Г.А., и др. Электродиализ пектинсодержащих растворов хлороводородной кислоты с ионообменными мембранами // Электрохимия. 2013. Т. 49, № 3. С. 328–331. DOI: 10.7868/S0424857013030055. EDN: PUXWUT.

22. Семенов Е.В., Славянский А.А. Анализ процесса разделения суспензии в гидроциклоне (на примере крахмалопаточного производства) // Хранение и переработка сельхозсырья. 2016. № 7. С. 52–57. EDN: WKTZQH.

23. Семенов Е.В., Славянский А.А., Макарова С.А., и др. Моделирование процесса разделения суспензии в роторе шнековой фильтрующей центрифуги // Хранение и переработка сельхозсырья. 2016. № 5. С. 42–48. EDN: WDNVTV.

24. Семенов Е.В., Славянский А.А., Лебедева Н.Н. Особенности разделения суспензии в роторе центрифуги периодического действия // Хранение и переработка сельхозсырья. 2016. № 2. С. 49–52. EDN: VOUHPR.

25. Лазарев С.И., Коробов В.Б., Коновалов В.И. Мембранный аппарат с плоскими фильтрующими элементами. Авторское свидетельство № 1745284 А1. 21.03.1989. Бюл. 25. EDN: AVUXHP.

26. Лазарев С.И., Вязовов С.А., Рябинский М.А. Электробаромембранный аппарат плоскокамерного типа. Патент РФ на изобретение № 2324529 С2. 10.01.2006. Бюл. 14. EDN: ZJMXKH.

27. Ковалев С.В., Лазарев С.И., Чепеняк П.А., Данилов А.Ю., Лазарев К.С. Электробаромембранный аппарат плоскокамерного типа. Патент РФ № 2403957 С1. 11.03.2009. Бюл. 32. EDN: RKYUGD.

28. Ковалев С.В., Лазарев С.И., Казаков В.Г. Электробаромембранный аппарат плоскокамерного типа. Патент РФ № 2528263 С1. 11.04.2013. Бюл. 18. EDN: ZFRHCH.

29. Лазарев С.И., Ковалев С.В., Коновалов Д.Н. Электробаромембранный аппарат плоскокамерного типа. Патент РФ № 2689617 С1. 06.08.2018. Бюл. 16. EDN: DINZWZ.

30. Коновалов Д.Н., Лазарев С.И., Ломакина В.А. Электробаромембранный аппарат плоскокамерного типа. Патент РФ № 2832310 С1. 27.06.2024. Бюл. 36. EDN: XDZOTS.

31. Лазарев С.И., Ковалев С.В., Коновалов Д.Н., Луа П., Котенев С.И. Электробаромембранный аппарат плоскокамерного типа. Патент РФ № 2718402 С1. Бюл. 10. EDN: TKQDTT.

32. Ковалев С.В., Ковалева О.А., Седоплатов И.С. Электробаромембранный аппарат плоскокамерного типа. Патент РФ № 2820720 С1. 07.12.2023. Бюл. 16. EDN: DDRWEK.

33. Лазарев С.И., Ковалев С.В., Коновалов Д.Н., Ковалева О.А., Левин А.А. Электробаромембранный аппарат плоскокамерного типа. Патент РФ № 2744408 С1. 07.07.2020. Бюл. 7. EDN: LFBBLY.

34. Лазарев С.И., Ковалев С.В., Вязовов С.А., Богомолов В.Ю. Электробаромембранный аппарат с плоскими фильтрующими элементами. Патент РФ № 2532813 С1. 07.05.2013. Бюл. 31. EDN: ZZULKG.

35. Богомолов В.Ю., Лазарев С.И., Ковалев С.В., Вязовов С.А. Электробаромембранный аппарат с плоскими охлаждающими камерами. Патент РФ № 2624695 С1. 13.03.2017. Бюл. 19. EDN: ZTXXUL.

36. Лазарев С.И., Коновалов Д.Н., Крылов А.В. Лазарев Д.С., Коновалов Д.Д. Электробаромембранный аппарат плоскокамерного типа. Патент РФ № 2806446 С1. 20.04.2023. Бюл. 31. EDN: XFQAQG.
37. Коновалов Д.Н., Лазарев С.И., Ломакина В.А., Коновалов Д.Д., Долгова О.В., Абоносимов М.О. Электробаромембранный аппарат плоскокамерного типа. Патент РФ № 2821449 С1. 25.01.2024. Бюл. 18. EDN: ZOGEQL.
38. Ковалева О.А., Лазарев С.И., Ковалев С.В., Кочетов В.И., Лазарев Д.С. Электробаромембранный аппарат трубчатого типа. Патент РФ № 2625669 С1. 10.03.2016. Бюл. 17. EDN: XGLACJ.
39. Лазарев С.И., Ковалев С.В., Родионов Д.А. Электробаромембранный аппарат трубчатого типа. Патент РФ № 2685091 С1. 06.08.2018. Бюл. 11. EDN: ZDTAQX.
40. Ковалев С.В. Классификация электробаромембранных аппаратов // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. 2015. Т. 20, № 1. С. 245–251. EDN: UZAWUR.
41. Лазарев С.И., Хорохорина И.В., Ковалев С.В., Михайлин М.И. Электробаромембранный аппарат трубчатого типа. Патент РФ № 2716121 С1. 27.06.2019. Бюл. 7. EDN: UTOVRI.
42. Лазарев С.И., Ковалев С.В., Хохлов П.А., Шестаков К.В. Электробаромембранный аппарат трубчатого типа. Патент РФ № 2700333 С1. 23.01.2019: Бюл. 26. EDN: UQZDFZ.
43. Лазарев С.И., Ковалев С.В., Хохлов П.А., Левин А.А. Электробаромембранный аппарат трубчатого типа. Патент РФ № 2718037 С1. 13.12.2019. Бюл. 10. EDN: YRKMPZ.
44. Ковалев С.В., Седоплатов И.С., Ковалева О.А. Электробаромембранный аппарат трубчатого типа. Патент РФ № 2803966 С1. 25.09.2023. EDN: HUXKCW.
45. Седоплатов И.С., Ковалева О.А., Ковалев С.В. Системный подход к проектированию и математическому описанию конструкции электромембранного аппарата трубчатого типа. В сб.: XXXIV Международная научно-практическая конференция «Приоритетные направления развития науки и технологий». Тула, 30 мая 2024 г. Тула, 2024. С. 9–11. EDN: GZQRIY.
46. Лазарев С.И., Коробов В.Б., Коновалов В.И. Мембранный аппарат. Авторское свидетельство № 1681926 А1. 24.05.1989. Бюл. 37. EDN: VGPFNW.
47. Ковалев С.В., Лазарев С.И., Головашин В.Л., Лавронченко А.А., Абоносимов Д.О. Электробаромембранный аппарат трубчатого типа. Патент РФ № 2540363 С1. 13.08.2013. Бюл. 4. EDN: ZFEUYX.
48. Лазарев С.И., Ковалев С.В., Стрельников А.Е., Попов Р.В., Ковалева О.А., Лазарев Д.С., Вязовов С.А. Электробаромембранный аппарат трубчатого типа. Патент РФ № 2625116 С1. 09.03.2016. Бюл. 20. EDN: ZTYBIT.
49. Лазарев С.И., Головашин В.Л., Мамонтов В.В. Электробаромембранный аппарат трубчатого типа. Патент РФ № 2273512 С2. 07.06.2004. Бюл. 10. EDN: SYNKFU.
50. Лазарев С.И., Котельникова И.В., Лавренченко А.А., и др. Применение электробаромембранного аппарата трубчатого типа в процессе очистки и утилизации сточных вод // Наука и бизнес: пути развития. 2012. № 4 (10). С. 45–47. EDN: OYFNFX.
51. Лазарев С.И., Котельникова И.В., Головашин В.Л. Электробаромембранный аппарат трубчатого типа. Заявка на изобретение № 2012111234. 23.03.2012.
52. Лазарев С.И., Коновалов Д.Н., Малин П.М., Брянкин К.В., Пудовкина П.А. Электробаромембранный аппарат трубчатого типа. Патент РФ № 2812596 С1. 04.07.2023. Бюл. 4. EDN: EXHYGT.
53. Лазарев С.И., Коновалов Д.Н., Галкин П.А., Малин П.М., Стрельников А.М. Электробаромембранный аппарат трубчатого типа. Патент РФ № 2798919 С1. 01.12.2022. Бюл. 19. EDN: IESKJH.
54. Коновалов Д.Н., Лазарев С.И., Долгова О.В., Истомина М.А., Коновалов Д.Д. Электробаромембранный аппарат трубчатого типа. Патент РФ № 2826557 С1. 05.02.2024. Бюл. 26. EDN: MGSXZM.
55. Лазарев С.И., Коновалов Д.Н., Антилова А.А., Пудовкина Т.А. Электробаромембранный аппарат трубчатого типа. Патент РФ № 2838235 С1. 30.09.2024. Бюл. 11. EDN: DJMEMO.
56. Лазарев С.И., Горбачев А.С., Абоносимов О.А. Электробаромембранный аппарат рулонного типа. Патент РФ № 2268085 С2. 22.03.2004. Бюл. 2. EDN: MOPERB.

57. Лазарев С.И., Горбачев А.С., Кормильцин Г.С., и др. Кинетика электробаромембранного разделения водных сульфатсодержащих растворов // Конденсированные среды и межфазные границы. 2008. Т. 10, № 1. С. 29–34. EDN: JSIRHF.
58. Лазарев С.И., Ковалев С.В., Абоносимов О.А., Ансимова З.А., Лазарев К.С. Электробаромембранный аппарат рулонного типа. Патент РФ № 2411986 С2. 13.10.2008. Бюл. 11. EDN: ZKTLUL.
59. Ковалев С.В., Лазарев С.И., Соломина О.А., Лазарев К.С. Электробаромембранный аппарат рулонного типа. Патент РФ № 2487746 С1. 01.06.2012. Бюл. 20. EDN: RLWAES.
60. Ковалев С.В., Лазарев С.И., Абоносимов О.А., Соломина О.А., Лазарев К.С. Электробаромембранный аппарат рулонного типа. Патент РФ № 2522882 С1. 15.04.2013. Бюл. 20. EDN: SAJAAG.
61. Лазарев С.И., Абоносимов О.А., Рябинский М.А. Электробаромембранный аппарат рулонного типа. Патент РФ № 2326721 С2. 31.07.2006. Бюл. 17. EDN: ELAXXA.
62. Ковалев С.В., Лазарев С.И. Электробаромембранный аппарат рулонного типа. Патент РФ № 2553859 С1. 12.03.2014. Бюл. 17. EDN: OMCPZR.
63. Лазарев С.И., Ковалев С.В., Михайлин М.И., Хохлов П.А. Электробаромембранный аппарат рулонного типа. Патент РФ № 2752479 С1. 29.12.2020. Бюл. 22. EDN: RBPFEW.
64. Лазарев С.И., Ковалев С.В., Родионов Д.А., Ковалева О.А., Рыжкин В.Ю., Лазарев Д.С., Богослов В.Ю. Электробаромембранный аппарат рулонного типа с низким гидравлическим сопротивлением. Патент РФ № 2671723 С1. 13.12.2017. Бюл. 31. EDN: AAVAQO.
65. Коновалов Д.Н. Электробаромембранный аппарат рулонного типа. Патент РФ № 2826576 С1. 28.11.2023: Бюл. 26. EDN: FBDEZW.
66. Коновалов Д.Н., Лазарев С.И. Электробаромембранный аппарат рулонного типа. Патент РФ № 2838328 С1. 19.12.2024. Бюл. 11. EDN: BVMKBO.
67. Кочетов В.И., Лазарев С.И., Попов В.Ю. Мембранный аппарат комбинированного типа. Патент РФ № 2496560 С1. 10.04.2012. Бюл. 30. EDN: VVMRFD.
68. Лазарев С.И., Хорохорина И.В., Ковалев С.В., Михайлин М.И., Лазарев Д.С. Электробаромембранный аппарат комбинированного типа. Патент РФ № 2712599 С1. 09.07.2019. Бюл. 4. EDN: XVDWJQ.
69. Лазарев С.И., Коновалов Д.Н., Шель Н.В., Малин П.М., Коновалов Д.Д., Игнатов Н.Н. Электробаромембранный аппарат комбинированного типа. Патент РФ № 2804723 С1. 06.03.2023. Бюл. 28. EDN: CGTARA.
70. Кочетов В.И., Лазарев С.И., Попов В.Ю., и др. Расчет и проектирования мембранных агрегатов для очистки сточных вод // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. 2014. Т. 19, № 6. С. 1883–1888. EDN: THEUKJ.
71. Лазарев С.И., Ломакина О.В., Буланов В.Е., и др. Расчет на прочность элементов баромембранного аппарата комбинированного типа // Вестник машиностроения. 2022. № 10. С. 3–8. DOI: 10.36652/0042-4633-2022-10-3-8. EDN: XCHQKI.

## References

1. Karpenko DV, Dyshekova MM. Napitki na osnove produktov pererabotki sakharnogo trostnika. *Khranenie i pererabotka sel'khozsyrya*. 2021;(1):138-156. (In Russ.). DOI: 10.36107/spfp.2021.197. EDN: WBPPKQ.
2. Lukin ND, Kudryashov VL. Oblasti primeneniya, effektivnost' i perspektivnye ispol'zovaniya baromembrannikh protsessov v APK. *Khranenie i pererabotka sel'khozsyrya*. 2017;(12):44-52. (In Russ.). EDN: YMVKF.
3. Kudryashov VL. Nanofiltratsiya – perspektivnyy sposob podgotovki vody dlya proizvodstva spirta. *Proizvodstvo spirta i likerovodochnykh izdeliy*. 2011;(3):24-27. (In Russ.). EDN: OIIEAZ.
4. Kovaleva OA, Kovalev SV. Razdelenie poslespirtovoy melassnoy bardy na poristykh membranakh UFM-50®, UPM-50M®, OPMN-P® i OFAM-K®. *Membrany i membrannye tekhnologii*. 2017;7(3):213-224. (In Russ.). DOI: 10.1134/S221811721703004X. EDN: YTFQUF.
5. Kovaleva OA. Kontsentrirovanie sakharnogo rastvora razlichnykh proizvoditelei nanofiltratsionnymi membranami OFAM-K i OPMN-P. *Sakhar*. 2017;(7):24-27. (In Russ.). EDN: ZBIVHR.

6. Kovaleva OA, Lazarev SI. Issledovanie protsessa obratnoosmoticheskogo razdeleniya tekhnologicheskikh rastvorov proizvodstv kukuruznogo krakhmala. *Tekhnika i tekhnologiya pishchevykh proizvodstv*. 2016;4:110-115. (In Russ.). EDN: XELEQB.
7. Klyuchnikov AI, Kazartsev DA, Zhukovskaya SV, et al. Adaptatsiya protsessa mikrofiltratsii k tekhnologicheskim protsessam fil'trovaniya piva. *Agroprovyshlennye tekhnologii Tsentral'noi Rossii*. 2023;4(30):20-30. (In Russ.). DOI: 10.24888/2541-7835-2023-30-20-30. EDN: IHDBKL.
8. Klyuchnikov AI. Razvitiye membrannoi tekhniki, realizuyushchei gidrodinamicheskuyu neustoichivost' na mezhfaznoi granitse "membrana – iskhodnyi rastvor". *Agroprovyshlennye tekhnologii Tsentral'noi Rossii*. 2023;3(29):99-115. (In Russ.). DOI: 10.24888/2541-7835-2023-29-99-115. EDN: LSZDUF.
9. Nikulina OK, Yakovleva MR, Koloskova OV, et al. Razrabotka sposoba polucheniya sakhara na osnovanii nauchno-tehnologicheskikh aspektov ochistki poluproduktov sakharnogo proizvodstva s ispol'zovaniem elektromembrannoi obrabotki. *Pishchevaya promyshlennost': nauka i tekhnologii*. 2024;17(3):17-23. (In Russ.). EDN: CJSJWD.
10. Nikulina OK, Yakovleva MR, Koloskova OV. Razrabotka sposoba polucheniya sakhara s ispol'zovaniem metoda elektrodializa v tselyakh povysheniya effektivnosti raboty sakharnykh predpriyatiy. *Pishchevaya promyshlennost': nauka i tekhnologii*. 2024;17(4):27-34. (In Russ.). EDN: URYCXA.
11. Nikulina OK, Dymar OV, Koloskova OV, et al. Primenenie kombinatsii baro- i elektromembrannikh metodov obrabotki dlya ochistki diffuzionnogo soka. *Sakhar*. 2022;(3):22-26. (In Russ.). DOI: 10.24412/2413-5518-2022-3-22-26. EDN: FNVSPM.
12. Nikulina OK, Dymar OV, Koloskova OV, et al. Primenenie elektromembrannikh metodov obrabotki dlya ochistki gustykh poluproduktov sakharnogo proizvodstva. *Sakhar*. 2022;(4):26-31. (In Russ.). DOI: 10.24412/2413-5518-2022-4-26-31. EDN: VHOORH.
13. Lazarev VA, Timakova RT, Tikhonov SL, et al. Tsentralizovannaya pererabotka syvorotki. *Molochnaya promyshlennost'*. 2021;(10):30-32. (In Russ.). DOI: 10.31515/1019-8946-2021-10-30-32. EDN: DBEYBG.
14. Kastychik AS, Shaposhnik VA. Deionizatsiya vody elektrodializom s ionoobmennymi membranami, granulami i setkami. *Sorbtionnye i khromatograficheskie protsessy*. 2009;9(1):51-57. (In Russ.). EDN: KBXNHF.
15. Vasil'eva VI, Shaposhnik VA, Akberova EM, et al. Kontsentratsionnoe pole v rastvore na granitse s ionoobmennymi membranami pri nestatsionarnom elektrodialize. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Khimiya. Biologiya. Farmatsiya*. 2011;(1):15-20. (In Russ.). EDN: OBLOUJ.
16. Kozaderova OA, Shaposhnik VA, Shaposhnik DA. Kolebatel'naya neustoichivost' kontsentratsionnogo polya v sopryazhennykh sektsiyakh kontsentrirovaniya i obessolivaniya pri intensivnykh rezhimakh elektrodializa. *Sorbtionnye i khromatograficheskie protsessy*. 2009;9(3):345-353. (In Russ.). EDN: KNVSPH.
17. Zmievskii YG. Determination of critical pressure in membrane distillation process. *Membranes and membrane technologies*. 2015;5(1):57. (In Russ.). DOI: 10.1134/S2218117215010113. EDN: TFVTBT.
18. Zmievskii YG, Kirichuk II, Mironchuk VG, et al. Chemical Cleaning of Nanofiltration Membranes after Whey Separation. *Membranes and membrane technologies*. 2014;4(2):149. (In Russ.). DOI: 10.1134/S2218117214020102. EDN: SAJCWX.
19. Mironchuk VG, Grushevskaya IO, Kucheruk DD, et al. Experimental study of the effect of high pressure on the efficiency of whey nanofiltration process using an OPMN-P membrane. *Membranes and membrane technologies*. 2013;3(1):3. (In Russ.). DOI: 10.1134/S2218117212040062. EDN: PNSZBR.
20. Kotov VV, Peregondchaya OV. Razdelenie sul'fo-khloronykh smesei elektrodializom s anionobmennymi membranami, sorbirovavshimi pektin. *Sorbtionnye i khromatograficheskie protsessy*. 2015;15(4):502-507. (In Russ.). EDN: VWHSJH.
21. Bodyakina IM, Kotov VV, Netsesova GA, et al. Elektrodializ pektinsoderzhashchikh rastvorov khlorovodorodnoi kisloty s ionoobmennymi membranami. *Elektrokhimiya*. 2013;49(3):328-331. (In Russ.). DOI: 10.7868/S0424857013030055. EDN: PUXWUT.

22. Semenov EV, Slavianskii AA. Analysis of the suspension of the separation process in the hydrocyclone (for example, starch treacle production). *Storage and Processing of Farm Products*. 2016;(7):52-57. (In Russ.). EDN: WKTZQH.
23. Semenov EV, Slavianskii AA, Makarova SA, Deshevaia IY. Simulation of process of separation of the suspension in rotor auger filtering centrifuge. *Storage and Processing of Farm Products*. 2016;(5):42-48. (In Russ.). EDN: WDNVTW.
24. Semenov EV, Slavianskii AA, Lebedeva NN. Especially the separation centrifuge rotor suspension of periodic action. *Storage and Processing of Farm Products*. 2016;(2):49-52. (In Russ.). EDN: VOUHPR.
25. Lazarev SI, Korobov VB, Konovalov VI. Membrannyi apparat s ploskimi fil'truyushchimi elementami. Avtorskoe svidetel'stvo № 1745284 A1. 21.03.1989. Byul. 25. (In Russ.). EDN: AVUXHP.
26. Lazarev SI, Viazovov SA, Riabinskii MA. Elektrobarmembrannyi apparat ploskokamernogo tipa. Patent RF № 2324529 C2. 10.01.2006. Byul. 14. (In Russ.). EDN: ZJMXKH.
27. Kovalev SV, Lazarev SI, Chepeniak PA, Danilov AYu, Lazarev KS. Elektrobarmembrannyi apparat ploskokamernogo tipa. Patent RF № 2403957 C1. 11.03.2009. Byul. 32. (In Russ.). EDN: RKYUGD.
28. Kovalev SV, Lazarev SI, Kazakov VG. Elektrobarmembrannyi apparat ploskokamernogo tipa. Patent RF № 2528263 C1. 11.04.2013. Byul. 18. (In Russ.). EDN: ZFRHCH.
29. Lazarev SI, Kovalev SV, Konovalov DN. Elektrobarmembrannyi apparat ploskokamernogo tipa. Patent RF № 2689617 C1. 06.08.2018. Byul. 16. (In Russ.). EDN: DINZWZ.
30. Konovalov DN, Lazarev SI, Lomakina VA. Elektrobarmembrannyi apparat ploskokamernogo tipa. Patent RF № 2832310 C1. 27.06.2024. Byul. 36. (In Russ.). EDN: XDZOTS.
31. Lazarev SI, Kovalev SV, Konovalov DN, Lua P, Kotenev SI. Elektrobarmembrannyi apparat ploskokamernogo tipa. Patent RF № 2718402 C1. 2020. Byul. 10. (In Russ.). EDN: TKQDTT.
32. Kovalev SV, Kovaleva OA, Sedoplatov IS. Elektrobarmembrannyi apparat ploskokamernogo tipa. Patent RF № 2820720 C1. 07.12.2023. Byul. 16. (In Russ.). EDN: DDRWEK.
33. Lazarev SI, Kovalev SV, Konovalov DN, Kovaleva OA, Levin AA. Elektrobarmembrannyi apparat ploskokamernogo tipa. Patent RF № 2744408 C1. 07.07.2020. Byul. 7. (In Russ.). EDN: LFBBLY.
34. Lazarev SI, Kovalev SV, Viazovov SA, Bogomolov VY. Elektrobarmembrannyi apparat s ploskimi fil'truyushchimi elementami. Patent RF № 2532813 C1. 07.05.2013. Byul. 31. (In Russ.). EDN: ZZULKG.
35. Bogomolov VY, Lazarev SI, Kovalev SV, Viazovov SA. Elektrobarmembrannyi apparat s ploskimi okhlazhdayushchimi kamerami. Patent RF № 2624695 C1. 13.03.2017. Byul. 19. (In Russ.). EDN: ZTXXUL.
36. Lazarev SI, Konovalov DN, Krylov AV, Lazarev DS, Konovalov DD. Elektrobarmembrannyi apparat ploskokamernogo tipa. Patent RF № 2806446 C1. 20.04.2023. Byul. 31. (In Russ.). EDN: XFQAQG.
37. Konovalov DN, Lazarev SI, Lomakina VA, Konovalov DD, Dolgova OV, Abonosimov MO. Elektrobarmembrannyi apparat ploskokamernogo tipa. Patent RF № 2821449 C1. 25.01.2024. Byul. 18. (In Russ.). EDN: ZOGEQL.
38. Kovaleva OA, Lazarev SI, Popov RV, Kochetov VI, Lazarev DS. Elektrobarmembrannyi apparat trubchatogo tipa. Patent RF № 2625669 C1. 10.03.2016. Byul. 17. (In Russ.). EDN: XGLACJ.
39. Lazarev SI, Kovalev SV, Rodionov DA. Elektrobarmembrannyi apparat trubchatogo tipa. Patent RF № 2685091 C1. 06.08.2018. Byul. 11. (In Russ.). EDN: ZDTAQX.
40. Kovalev SV. Klassifikatsiya elektrobarmembrannikh apparatov. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya: Estestvennye i tekhnicheskie nauki*. 2015;20(1):245-251. (In Russ.). EDN: UZAWUR.
41. Lazarev SI, Khorokhorina IV, Kovalev SV, Mikhailin MI. Elektrobarmembrannyi apparat trubchatogo tipa. Patent RF № 2716121 C1. 27.06.2019. Byul. 7. (In Russ.). EDN: UTOVRI.
42. Lazarev SI, Kovalev SV, Khokhlov PA, Shestakov KV. Elektrobarmembrannyi apparat trubchatogo tipa. Patent RF № 2700333 C1. 23.01.2019: Byul. 26. (In Russ.). EDN: UQZDFZ.
43. Lazarev SI, Kovalev SV, Khokhlov PA, Levin AA. Elektrobarmembrannyi apparat trubchatogo tipa. Patent RF № 2718037 C1. 13.12.2019. Byul. 10. (In Russ.). EDN: YRKMPZ.
44. Kovalev SV, Sedoplatov IS, Kovaleva OA. Elektrobarmembrannyi apparat trubchatogo tipa. Patent RF № 2803966 C1. 25.09.2023. (In Russ.). EDN: HUXKCW.

45. Sedoplatov IS, Kovaleva OA, Kovalev SV. Sistemnyi podkhod k proektirovaniyu i matematicheskому opisaniiu konstruktsii elektromembrannogo apparata trubchatogo tipa. In: XXXIV Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya "Prioritetnye napravleniya razvitiia nauki i tekhnologii", Tula, 30 May 2024. Tula; 2024. P. 9–11. (In Russ.). EDN: GZQRIY.

46. Lazarev SI, Korobov VB, Konovalov VI. Membrannyi apparat. Avtorskoe svidetel'stvo № 1681926 A1. 24.05.1989. Бюл. 37. (In Russ.). EDN: VGPFW.

47. Kovalev SV, Lazarev SI, Golovashin VL, Lavronchenko AA, Abonosimov DO. Elektrobarmembrannyi apparat trubchatogo tipa. Patent RF № 2540363 C1. 13.08.2013. Byul. 4. (In Russ.). EDN: ZFEUYX.

48. Lazarev SI, Kovalev SV, Strel'nikov AE, Popov RV, Kovaleva OA, Lazarev DS, Vyazovov SA. Elektrobarmembrannyi apparat trubchatogo tipa. Patent RF № 2625116 C1. 09.03.2016. Byul. 20. (In Russ.). EDN: ZTYBIT.

49. Lazarev SI, Golovashin VL, Mamontov VV. Elektrobarmembrannyi apparat trubchatogo tipa. Patent RF № 2273512 C2. 07.06.2004. Byul. 10. (In Russ.). EDN: SYNKFU.

50. Lazarev SI, Kotel'nikova IV, Lavrenchenko AA, et al. Primenenie elektrobarmembrannogo apparata trubchatogo tipa v protsesse ochistki i utilizatsii stochnykh vod. *Nauka i biznes: puti razvitiia*. 2012;4(10):45-47. (In Russ.). EDN: OYFNFX.

51. Lazarev SI, Kotel'nikova IV, Golovashin VL. Elektrobarmembrannyi apparat trubchatogo tipa. Zayavka na izobretenie RF № 2012111234 A. 23.03.2012. (In Russ.).

52. Lazarev SI, Konovalov DN, Malin PM, Bryankin KV, Pudovkina PA. Elektrobarmembrannyi apparat trubchatogo tipa. Patent RF № 2812596 C1. 04.07.2023. Byul. 4. (In Russ.). EDN: EXHYGT.

53. Lazarev SI, Konovalov DN, Galkin PA, Malin PM, Strel'nikov AM. Elektrobarmembrannyi apparat trubchatogo tipa. Patent RF № 2798919 C1. 01.12.2022. Byul. 19. (In Russ.). EDN: IESKJH.

54. Konovalov DN, Lazarev SI, Dolgova OV, Istomina MA, Konovalov DD. Elektrobarmembrannyi apparat trubchatogo tipa. Patent RF № 2826557 C1. 05.02.2024. Byul. 26. (In Russ.). EDN: MGSXZM.

55. Lazarev SI, Konovalov DN, Antipova AA, Pudovkina TA. Elektrobarmembrannyi apparat trubchatogo tipa. Patent RF № 2838235 C1. 30.09.2024. Byul. 11. (In Russ.). EDN: DJMEMO.

56. Lazarev SI, Gorbachev AS, Abonosimov OA. Elektrobarmembrannyi apparat rulonnogo tipa. Patent RF № 2268085 C2. 22.03.2004. Byul. 2. (In Russ.). EDN: MOPEPB.

57. Lazarev SI, Gorbachev AS, Kormil'tsin GS, et al. Kinetika elektrobarmembrannogo razdeleniya vodnykh sul'fatsoderzhashchikh rastvorov. *Kondensirovannye sredy i mezhfaznye granitsy*. 2008;10(1):29-34. (In Russ.). EDN: JSIRHF.

58. Lazarev SI, Kovalev SV, Abonosimov OA, Ansimova ZA, Lazarev KS. Elektrobarmembrannyi apparat rulonnogo tipa. Patent RF № 2411986 C2. 13.10.2008. Byul. 11. (In Russ.). EDN: ZKTLUL.

59. Kovalev SV, Lazarev SI, Solomina OA, Lazarev KS. Elektrobarmembrannyi apparat rulonnogo tipa. Patent RF № 2487746 C1. 01.06.2012. Byul. 20. (In Russ.). EDN: RLWAES.

60. Kovalev SV, Lazarev SI, Abonosimov OA, Solomina OA, Lazarev KS. Elektrobarmembrannyi apparat rulonnogo tipa. Patent RF № 2522882 C1. 15.04.2013. Byul. 20. (In Russ.). EDN: SAJAAG.

61. Lazarev SI, Abonosimov OA, Riabinskii MA. Elektrobarmembrannyi apparat rulonnogo tipa. Patent RF № 2326721 C2. 31.07.2006. Byul. 17. (In Russ.). EDN: ELAXXA.

62. Kovalev SV, Lazarev SI. Elektrobarmembrannyi apparat rulonnogo tipa. Patent RF № 2553859 C1. 12.03.2014. Byul. 17. (In Russ.). EDN: OMCPZR.

63. Lazarev SI, Kovalev SV, Mikhailin MI, Khokhlov PA. Elektrobarmembrannyi apparat rulonnogo tipa. Patent RF № 2752479 C1. 29.12.2020. Byul. 22. (In Russ.). EDN: RBPFEW.

64. Lazarev SI, Kovalev SV, Rodionov DA, Kovaleva OA, Ryzhkin VYu, Lazarev DS, Bogomolov VYu. Elektrobarmembrannyi apparat rulonnogo tipa s nizkim gidravlicheskim soprotivleniem. Patent RF № 2671723 C1. 13.12.2017. Byul. 31. (In Russ.). EDN: AAVAQO.

65. Konovalov DN. Elektrobarmembrannyi apparat rulonnogo tipa. Patent RF № 2826576 C1. 28.11.2023: Byul. 26. (In Russ.). EDN: FBDEZW.

66. Konovalov DN, Lazarev SI. Elektrobarmembrannyi apparat rulonnogo tipa. Patent RF № 2838328 C1. 19.12.2024. Byul. 11. (In Russ.). EDN: BVMKBO.

67. Kochetov VI, Lazarev SI, Popov VY. Membrannyi apparat kombinirovannogo tipa. Patent RF № 2496560 C1. 10.04.2012. Byul. 30. (In Russ.). EDN: VVMRFD.

68. Lazarev SI, Khorokhorina IV, Kovalev SV, Mihajlin MI, Lazarev DS. Elektrobarmembrannyi apparat kombinirovannogo tipa. Patent RF № 2712599 C1. 19.12.2024. Byul. 11. (In Russ.). EDN: XVDWJQ.
69. Lazarev SI, Konovalov DN, Shel' NV, Malin PM, Konovalov DD, Ignatov NN. Elektrobarmembrannyi apparat kombinirovannogo tipa. Patent RF № 2804723 C1. 06.03.2023. Byul. 28. (In Russ.). EDN: CGTAPA.
70. Kochetov VI, Lazarev SI, Popov VY, et al. Raschet i proektirovaniya membrannogo agregata dlya ochistki stochnykh vod. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya: Estestvennye i tekhnicheskie nauki.* 2014;19(6):1883-1888. (In Russ.). EDN: THEUKJ.
71. Lazarev SI, Lomakina OV, Bulanov VE, et al. Raschet na prochnost' elementov baromembrannogo apparata kombinirovannogo tipa. *Vestnik mashinostroeniia.* 2022;(10):3-8. (In Russ.). DOI: 10.36652/0042-4633-2022-10-3-8. EDN: XCHQKI.

Статья принята к публикации 26.09.2025 / The article accepted for publication 26.09.2025.

Информация об авторах:

**Иван Сергеевич Седоплатов**, аспирант кафедры математического моделирования и информационных технологий

**Сергей Владимирович Ковалев**, профессор кафедры математического моделирования и информационных технологий, доктор технических наук, доцент

**Никита Александрович Федотов**, аспирант кафедры математического моделирования и информационных технологий

**Ольга Александровна Ковалева**, профессор кафедры математического моделирования и информационных технологий, доктор технических наук, доцент

**Денис Александрович Циммер**, аспирант кафедры математического моделирования и информационных технологий

Information about the authors:

**Ivan Sergeevich Sedoplatov**, Postgraduate student at the Department of Mathematical Modeling and Information Technology

**Sergey Vladimirovich Kovalev**, Professor at the Department of Mathematical Modeling and Information Technology, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor

**Nikita Aleksandrovich Fedotov**, Postgraduate student at the Department of Mathematical Modeling and Information Technology

**Olga Aleksandrovna Kovaleva**, Professor at the Department of Mathematical Modeling and Information Technology, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor

**Denis Aleksandrovich Zimmer**, Postgraduate student at the Department of Mathematical Modeling and Information Technology