

Научная статья/Research article

УДК 66.081.6

DOI: 10.36718/1819-4036-2025-10-230-247

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

<sup>1,2,3,4</sup>Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина, Тамбов, Россия<sup>1</sup>sseedd@mail.ru

## КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД ПРОЕКТИРОВАНИЯ И РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОБАРОМЕМБРАННЫХ АППАРАТОВ ДЛЯ РАЗДЕЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РАСТВОРОВ ПИЩЕВЫХ ПРОИЗВОДСТВ

Цель исследования – разработка комплексного подхода проектирования и расчета электробаромембранных аппаратов для разделения технологических растворов пищевых производств. Объект исследования – комплексный подход проектирования и расчета электробаромембранных аппаратов для разделения технологических растворов пищевых производств. Метод исследования – аналитическое описание и оценка конструктивных параметров исследуемой системы: общая поверхность (площадь) мембран, объем конструкционного материала, масса. В качестве экономического параметра изучаемого комплексного подхода выступает стоимость составляющих элементов конструкции аппарата. Для эффективного внедрения процессов электробаромембранного разделения жидких технологических растворов пищевых производств необходима разработка универсальных конструкций аппаратов, которая базируется на следующих основных этапах: проектирование устройства многокамерного аппарата; описание его принципа действия с подтверждением технических результатов; изучение условий промышленной применимости с оценкой конструктивных и экономического параметров (площади поверхности мембран, объема конструкционного материала, веса (массы материалов), стоимости; оценка конструктивных и экономического параметров при программной реализации на ЭВМ (на языке программирования Delphi/Object Pascal) для автоматизации процесса расчета элементов конструкции. Получены аналитические выражения для расчета площади поверхности мембран, объема конструкционного материала, веса (массы материалов) на примере расчета электробаромембранных и баромембранных аппаратов плоскокамерного типа. На основе предложенного комплексного подхода и проведенного расчета эффективной площади поверхности, объема и массы элементов аппарата доказано, что наибольшую стоимость для изготовления имеет БМАПТ (13 479 руб.), выполненный из материала (марка стали – 12Х18Н10Т), далее следует ЭБМАПТ (3 925 руб.), выполненный из материала ПА-6 (капролон). Перспективными вариантами на основе стоимостного анализа конструкций аппаратов подобного типа являются устройства двух типов, так как они позволяют работать с различными пищевыми средами.

**Ключевые слова:** процессы и аппараты, пищевые производства, разделение и концентрирование растворов, комплексный подход, электробаромембранное разделение

**Для цитирования:** Ковалев С.В., Седоплатов И.С., Федотов Н.А., и др. Комплексный подход проектирования и расчета электробаромембранных аппаратов для разделения технологических растворов пищевых производств // Вестник КрасГАУ. 2025. № 10. С. 230–247. DOI: 10.36718/1819-4036-2025-10-230-247.

Sergey Vladimirovich Kovalev<sup>1✉</sup>, Ivan Sergeevich Sedoplatov<sup>2</sup>,  
Nikita Aleksandrovich. Fedotov<sup>3</sup>, Olga Aleksandrovna Kovaleva<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Derzhavin Tambov State University, Tambov, Russia<sup>1</sup>sseedd@mail.ru

## INTEGRATED APPROACH TO DESIGN AND CALCULATION OF ELECTROBAROMEMBRANE DEVICES TO SEPARATE FOOD PRODUCTION TECHNOLOGICAL SOLUTIONS

*The objective of the study is to develop an integrated approach to the design and calculation of electric baromembrane units for the separation of process solutions in food production. The object of the study is an integrated approach to the design and calculation of electric baromembrane units for the separation of process solutions in food production. The research method is an analytical description and evaluation of the design parameters of the system under study: total surface (area) of membranes, volume of structural material, weight. The economic parameter of the studied integrated approach is the cost of the constituent elements of the device design. For the effective implementation of the processes of electric baromembrane separation of liquid process solutions in food production, it is necessary to develop universal designs of devices, which is based on the following main stages: design of the multi-chamber device; description of its operating principle with confirmation of the technical results; study of the conditions of industrial applicability with evaluation of the design and economic parameters (membrane surface area, volume of structural material, weight (mass of materials), cost; evaluation of the design and economic parameters during software implementation on a computer (in the Delphi/Object Pascal programming language) to automate the process of calculating the design elements. Analytical expressions for calculating the membrane surface area, the volume of structural material, and the weight (mass) of materials are obtained using the example of calculating flat-chamber electrobaromembrane and electrobaromembrane devices. Based on the proposed integrated approach and the calculation of the effective surface area, volume, and mass of the device elements, it is proven that the BMAPT made of 12Kh18N10T steel has the highest manufacturing cost (RUB 13,479), followed by the EBMAPT made of PA-6 (caprolon) (RUB 3,925). Based on the cost analysis of device designs for this type, two types of devices are promising options, as they can handle a variety of food media.*

**Keywords:** processes and devices, food production, separation and concentration of solutions, integrated approach, electrobaromembrane separation

**For citation:** Kovalev SV, Sedoplatov IS, Fedotov NA, et al. Integrated approach to design and calculation of electrobaromembrane devices to separate food production technological solutions. *Bulletin of KSAU*. 2025;(10):230-247. (In Russ.). DOI: 10.36718/1819-4036-2025-10-230-247.

**Введение.** В России и странах СНГ существует значительное количество промышленных пищевых производств, использующих воду, и в том или ином виде технологические пищевые растворы, которые необходимо перерабатывать и использовать вторично на предприятии. К ним относятся, в частности, крупные предприятия Тамбовской области (Россия) по производству спирта, работающие как на зерновом сырье, так и на свеклосахарной мелассе (АО «Амбер Талвис», пос. Новая Ляда; АО «Биохим», г. Рассказово, и др.); по получению сахара, сахарной пудры и других продуктов на основе свекловичного сырья, тростникового сахара-сырца (группа компаний «Русагро»: ОАО «Сахарный завод «Жердевский», г. Жердевка; ООО «Никифоровский сахарный завод», Никифоровский район, р.п. Дмитриевка; ОАО «Знаменский сахарный завод», Знаменский район, р.п. Знаменка, и др.); по выработке крахмала и других продуктов, которые могут работать на различном сырье: картофель, кукуруза и другие продукты растение-

водства (ОАО «Хоботовское предприятие «Крахмалопродукт»), Первомайский район, пос. Заводской).

Отличительной особенностью таких пищевых производств является наличие большого количества промежуточных и готовых технологических жидкостей (зерновая бражка, мелассная бражка, диффузионный сок сахарной свеклы и др.); вторичных растворов, содержащих ионы природных неорганических соединений (калий, кальций, фосфор, азот и др.) и нерастворимых веществ, которые могут находиться в технологическом растворе в виде взвесей, оседающих при действии на частицу силы тяжести, коллоидов – очень мелких частиц, несклонных к выпадению в осадок.

Для разделения подобных растворов на предприятиях пищевой промышленности применяются конструкции разделительных аппаратов, например отстойники, гидроциклоны, фильтры, пресс-фильтры, вакуум-фильтры, центрифуги,

электрофилтры, мембранные аппараты и другое оборудование [1, 2].

Отстойники, гидроциклоны и различные варианты фильтров используются в основном для разделения жидких технологических растворов, содержащих нерастворимые вещества продуктов перерабатываемого сырья [2]. Основная масса подобных жидких технологических растворов содержит электронейтральные взвешенные вещества (компоненты) перерабатываемого сырья (природные полисахариды (крахмал), обрывки дрожжей, дрожжи, частички жома и другие компоненты), которые хорошо поддаются отделению от жидкостей в виде осадка. В это же время в технологическом сырье и растворах присутствуют бактериальные и запасные полисахариды. Одним из бактериальных полисахаридов является декстран, который синтезируется видом молочнокислых бактерий *Leuconostoc mesenteroides* в исходном сырье при низких температурах (например при обработке сахарной свеклы на полях), а другим запасным полисахаридом микробного происхождения является леван. Эти полисахариды присутствуют в растворах, например, содержащих сахарозу, на предприятиях, перерабатывающих сахарную свеклу. Подобные вещества увеличивают вязкость коллоидных технологических растворов, а дополнительное присутствие ионов кальция приводит в сахарной промышленности к образованию отложений на теплообменной аппаратуре при выпарке технологических растворов, что, как следствие, приводит к уменьшению выхода готового продукта – сахара, сахарной пудры и других компонентов. Этот специфический аспект переработки подобных технологических растворов является существенной проблемой при производстве пищевых полупродуктов и продуктов на предприятиях.

Мембранные процессы и аппараты используются в том случае, когда необходимо получить концентрированный в заданных пределах поток технологического раствора (ретентат) и разделенный поток раствора (фильтрат (пермеат)) [3–5] в зависимости от требуемого целевого показателя промышленного производства. Процессы и конструкции мембранных [5, 6], баромембранных [7], электромембранных аппаратов плоскокамерного, трубчатого, рулонного, половолоконного типа [8–10] и других комбинаций мембранных процессов [11, 12] и описание особенностей мембранных процессов, например при

переработке молочных продуктов с применением полимерных мембран и получении соответствующих потоков сырья, представлены в работах [13, 14].

Проведенный анализ процессов мембранного разделения, концентрирования пищевых технологических растворов выявил, что хорошо исследованными при обработке жидких пищевых систем являются различные процессы и аппараты для электромембранного разделения [8–10, 12], но подобные технологии не являются универсальными и не могут обеспечить применение их конструктивного оформления в широком диапазоне разделяемых растворов, содержащих низкомолекулярные вещества ( $10^{-4}$ – $10^{-3}$  мкм), высокомолекулярные вещества ( $10^{-2}$ – $10^{-1}$  мкм) и различные микрочастицы (1,0–10 мкм), что по отдельности могут обеспечить следующие процессы: обратный осмос (гиперфильтрация), нанофильтрация, ультрафильтрация и микрофильтрация.

Развивающееся в последнее время перспективное направление процессов электробаромембранного разделения растворов нашло широкое применение в основном для химических и машиностроительных [15–17] и других производств [18, 19], а исследований, посвященных электромембранному разделению жидких пищевых растворов с наложением на систему «раствор – мембрана» трансмембранного давления, практически нет, за исключением редких работ [20, 21], в которых описан только один из электробаромембранных процессов (электроультрафильтрация) при использовании однокамерных лабораторных аппаратов.

Отмечается, что при ответственном проектировании в НИИ и вузах универсальных аппаратов для электрогиперфильтрации, электронанофильтрации, электроультрафильтрации, электромикрофильтрации на базе процессов электробаромембранного разделения технологических растворов и их расчете с дальнейшим применением на производстве (например в сахарной, биохимической, молокоперерабатывающей промышленности и др.) необходимо обеспечить широкий диапазон их использования для нужд пищевой и перерабатывающей промышленности в широком диапазоне различных видов, концентраций технологических растворов подобных производств.

Реализация процессов электробаромембранного разделения жидких пищевых систем нап-

равлена на уменьшение отрицательных особенностей течения процесса обработки растворов: тепловыделение в системе «раствор – мембрана», концентрационная поляризация и осадкообразование (при наложении постоянного электрического поля). Уменьшение подобных сопутствующих явлений при электробаромембранном разделении растворов достигается за счет принудительного охлаждения через теплопередающую стенку или поддержания постоянной скорости циркуляции разделяемого раствора (или ее увеличения) в межмембранных каналах аппарата. Наиболее востребованными на производстве являются электробаромембранные аппараты плоскокамерного типа, так как они интуитивно понятны обслуживающему персоналу, легко могут быть демонтированы и монтированы обратно в технологическую линию пищевого предприятия, но при этом могут работать без наложения электрического тока, как баромембранные аппараты (БМА). Оценка стоимости вновь спроектированных конструкций электробаромембранных аппаратов (ЭБМА) и расчет затрат на производстве по конструкционным материалам (капролон (ПА-6), нержавеющая сталь (12Х18Н10Т)) всегда являются необходимыми процедурами при оценке материальных вложений предприятия.

**Цель исследования** – разработка комплексного подхода проектирования и расчета электробаромембранных аппаратов для разделения технологических растворов пищевых производств.

**Объекты и методы.** Объектом исследования является комплексный подход проектирования и расчета электробаромембранных аппаратов для разделения технологических растворов пищевых производств. В качестве метода исследования применяются аналитическое описание и оценка конструктивных параметров исследуемой системы: общая поверхность (площадь) мембран, объем конструкционного материала, масса. В качестве экономического параметра изучаемого комплексного подхода выступает стоимость составляющих элементов конструкции аппарата.

**Результаты и их обсуждение.** Комплексный подход проектирования, расчета стоимости многокамерных электробаромембранных аппаратов (или элементов общей системы) при обработке технологических растворов различных пищевых производств основан на следующих этапах (рис. 1):

1. Проектирование устройства многокамерного аппарата, отличного от выявленных в реальном времени аналогов Федерального института промышленной собственности (сопоставление конструктивных решений с имеющимися перспективными прототипами рассматриваемой области) при помощи систем автоматизированного проектирования (AutoCAD или Компас-3D) с необходимыми видами (главный вид, вид сверху, вид слева) (см. рис. 1), разрезами (фронтальный разрез, профильный разрез), выносными элементами (для надежного уяснения принципа действия конструкции) и позициями (рис. 1–6) [22].

2. Описание принципа действия спроектированной конструкции многокамерного электробаромембранного аппарата с подтверждением технических результатов подробно представлено в [22].

3. Для изучения условий промышленной применимости многокамерного электробаромембранного аппарата для разделения жидких пищевых технологических растворов необходимо знать оценку его площади поверхности, веса (массы материалов), стоимости при учете геометрии конструктивных элементов рассматриваемого устройства. Для снижения негативного воздействия осадкообразования использована конструктивная геометрия аппарата (форма камер при разделении в виде отличительного элемента параллелепипеда со специальными сегментами) для уменьшения гидравлического сопротивления устройства в каналах аппарата и повышения скорости циркуляции раствора. Для этого производится расчет общей поверхности мембран и объема материала (см. рис. 1).

4. По расчетным характеристикам объема конструкционного материала оценивается масса элементов конструкции аппарата и производится оценка стоимости элементов устройства в целом.

5. Оценка конструкционных (общая поверхность (площадь) мембран, объем конструкционного материала, масса) и экономического параметров (стоимость составляющих элементов устройств) при проектировании и расчете электробаромембранных аппаратов для разделения технологических растворов пищевых предприятий производится при программной реализации на ЭВМ на языке программирования Delphi/Object Pascal.

Универсальный принцип действия аппарата (см. рис. 1) заключается в том, что он может работать при совместном наложении постоянного электрического тока и трансмембранного давления на систему «аппарат – мембрана – рас-

твор» (осуществлять, таким образом, электробаромембранное разделение), а также применяться отдельно с использованием этих движущих сил процесса.

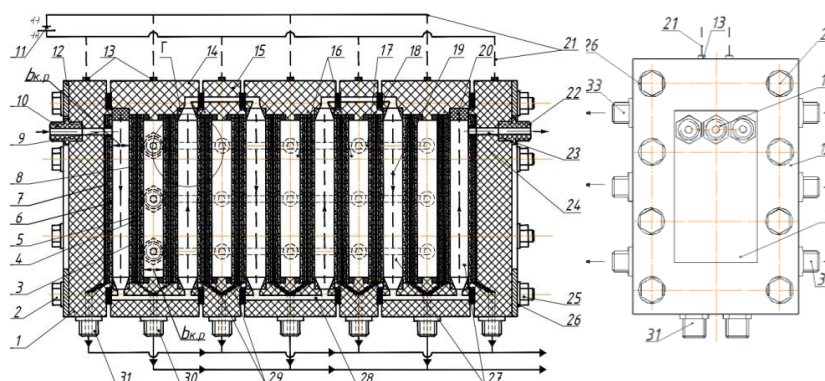


Рис. 1. Электробаромембранный аппарат плоскокамерного типа: 1 – фланец корпуса; 2 – болт; 3 – прианодная мембрана; 4 – пористая подложка из ватмана; 5 – монополярно-пористый электрод-анод; 6 – прикатодная мембрана; 7 – монополярно-пористый электрод-катод; 8 – дренажная сетка; 9 – канал ввода разделяемого раствора; 10 – штуцер ввода разделяемого раствора; 11 – устройство для подвода постоянного электрического тока; 12 – металлическая пластина; 13 – полимерный компаунд; 14 – чередующаяся диэлектрическая камера корпуса с «впадиной»; 15 – чередующаяся диэлектрическая камера корпуса с «выступом»; 16, 27 – камеры разделения; 17 – переточный канал; 18 – прокладка (с отверстиями); 19 – сетки-турбулизаторы; 20 – прокладка; 21 – электрический провод; 22 – штуцер вывода разделяемого раствора; 23 – канал вывода разделяемого раствора; 24 – полимерная композиция; 25 – гайка; 26 – шайба; 28 – переточный канал; 29 – малая прокладка; 30 – штуцер для отвода прианодного пермеата; 31 – штуцер для отвода прикатодного пермеата; 32 – камерный штуцер ввода раствора; 33 – камерный штуцер вывода ретентата

Flat-chamber type electrobaromembrane apparatus: 1 – housing flange; 2 – bolt; 3 – anode membrane; 4 – porous substrate made of Whatman paper; 5 – monopolar-porous electrode-anode; 6 – near-cathode membrane; 7 – monopolar-porous electrode-cathode; 8 – drainage mesh; 9 – channel for inlet of the solution to be separated; 10 – nozzle for inlet of the solution to be separated; 11 – device for supplying direct electric current; 12 – metal plate; 13 – polymer compound; 14 – alternating dielectric chamber of the housing with a “depression”; 15 – alternating dielectric chamber of the housing with a “protrusion”; 16, 27 – separation chambers; 17 – transfer channel; 18 – gasket (with holes); 19 – turbulator mesh; 20 – gasket; 21 – electric wire; 22 – nipple for output of separated solution; 23 – channel for output of separated solution; 24 – polymer composition; 25 – nut; 26 – washer; 28 – overflow channel; 29 – small gasket; 30 – nipple for output of near-anode permeate; 31 – nipple for output of near-cathode permeate; 32 – chamber nipple for input of solution; 33 – chamber nipple for output of retentate

При отсутствии наложения постоянного электрического тока и действия трансмембранного давления используется баромембранное разделение растворов пищевых производств, которое заключается в том, что жидкая среда перекачивается между двумя мембранами (образующими межмембранный канал), при этом через пористые мембраны под действием избыточного давления (превышающего осмотическое) преимущественно выделяется раствори-

тель в виде пермеата, а растворенные вещества (соли), механические включения и коллоидные частицы остаются в ретентате, т. е. задерживаются мембранами, которые далее в потоке ретентата выводятся из аппарата.

Для растворов пищевых производств, содержащих соли (в которых происходит диссоциация на ионы), в присутствии механических включений и коллоидных частиц, при совместном действии постоянного электрического тока

и трансмембранного давления (выше осмотического) ионы (катионы и анионы) мигрируют к соответствующим мембранам, проникают через их поры в пермеат и отводятся в виде щелочных и кислотных пермеатов из аппарата в виде кислотных и щелочных потоков, а ретентат с неэлектролитом (механические включения, коллоидные частицы) отводятся в тракте ретентата из аппарата для дальнейшей обработки.

Учитывая то, что подобные аппараты используются на производстве, существует необходимость расчета конструктивных и экономического параметров этих устройств для условий промышленной применимости.

Общая площадь поверхности мембран

$$S_{\text{общ}} = S_{\text{сумм}}^{+} + S_{\text{сумм}}^{-} - S_{\text{отв}}.$$

Площадь поверхности прикатодных (прианодных) мембран:

$$S_{\text{сумм}}^{+} = m^{+} S_{\text{прямоуг}}^{+} + m^{+} n S_{\text{д}}^{+} + m^{+} n S_{\text{ш}}^{+} = m^{+} (S_{\text{прямоуг}}^{+} + n(S_{\text{д}}^{+} + S_{\text{ш}}^{+})),$$

$$S_{\text{сумм}}^{-} = m^{-} S_{\text{прямоуг}}^{-} + m^{-} n S_{\text{д}}^{-} + m^{-} n S_{\text{ш}}^{-} = m^{-} (S_{\text{прямоуг}}^{-} + n(S_{\text{д}}^{-} + S_{\text{ш}}^{-})),$$

где  $S_{\text{отв}} = k\pi R^2 = 6\pi R^2$  – площадь поверхности для отверстия каналов соответственно ввода/вывода обрабатываемого раствора, м<sup>2</sup>;  $k = 6$  – количество отверстий размещенных в мембранах;  $R = 0,003$  – радиус для отверстия каналов соответственно ввода/вывода обрабатываемого раствора, м;  $n = 2$  – число сегментов;  $m = 10$ ,  $m^{+} = 12$  – число прикатодных, прианодных полу-

проницаемых мембран;  $S_{\text{прямоуг}}^{+,-}$  – площадь поверхности для прианодной, прикатодной полупроницаемых мембран без учета соответствующих сегментов, м<sup>2</sup>;  $S_{\text{д}}^{+,-}$ ,  $S_{\text{ш}}^{+,-}$  – площадь поверхности сегмента прианодной, прикатодной мембран по длине (рис. 2, а) и ширине (рис. 2, б), м<sup>2</sup>.

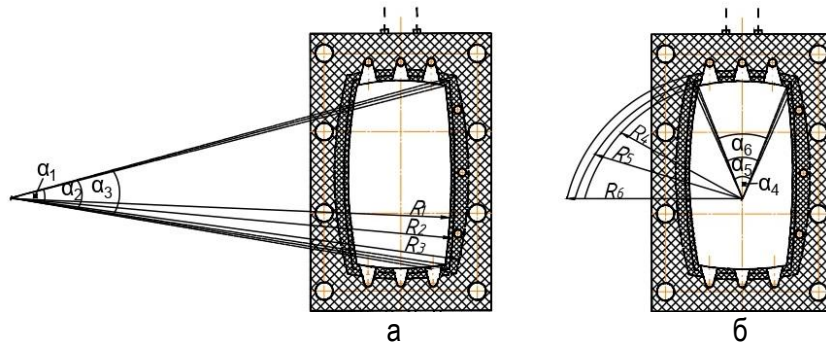


Рис. 2. Разрез камеры разделения электробаромембранного аппарата плоскокамерного типа:

а – со схемой расчета по длине сегмента; б – со схемой расчета по ширине сегмента

Sectional view of the separation chamber of a flat-chamber type electrobaromembrane apparatus:

а – with a calculation scheme for the length of the segment; б – with a calculation scheme for the width of the segment

Поверхности прикатодных, прианодных мембран (1), (2) при отсутствии экранирования и при экранировании прокладкой (3), (4):

$$S_{\text{сумм}}^{+} = 12(a_{\text{п.м}} h_{\text{п.м}} + 2(\frac{1}{2} R_2^2 (\frac{\pi\alpha_2}{180^\circ} - \sin\alpha_2) + \frac{1}{2} R_5^2 (\frac{\pi\alpha_5}{180^\circ} - \sin\alpha_5))) = 12(a_{\text{п.м}} h_{\text{п.м}} + 2 \cdot \frac{1}{2} (R_2^2 (\frac{\pi\alpha_2}{180^\circ} - \sin\alpha_2) + R_5^2 (\frac{\pi\alpha_5}{180^\circ} - \sin\alpha_5))) = 12(a_{\text{п.м}} h_{\text{п.м}} + R_2^2 (\frac{\pi\alpha_2}{180^\circ} - \sin\alpha_2) + R_5^2 (\frac{\pi\alpha_5}{180^\circ} - \sin\alpha_5)) \quad (1)$$

$$S_{\text{сумм}}^{-} = 10(a_{\text{п.м}} h_{\text{п.м}} + 2(\frac{1}{2} R_2^2 (\frac{\pi\alpha_2}{180^\circ} - \sin\alpha_2) + \frac{1}{2} R_5^2 (\frac{\pi\alpha_5}{180^\circ} - \sin\alpha_5))) = 12(a_{\text{п.м}} h_{\text{п.м}} + 2 \cdot \frac{1}{2} (R_2^2 (\frac{\pi\alpha_2}{180^\circ} - \sin\alpha_2) + R_5^2 (\frac{\pi\alpha_5}{180^\circ} - \sin\alpha_5))) = 10(a_{\text{п.м}} h_{\text{п.м}} + R_2^2 (\frac{\pi\alpha_2}{180^\circ} - \sin\alpha_2) + R_5^2 (\frac{\pi\alpha_5}{180^\circ} - \sin\alpha_5)) \quad (2)$$

$$S_{\text{сумм}}^+ = 12(a_{\text{к.р}} h_{\text{к.р}} + 2(\frac{1}{2} R_1^2 (\frac{\pi \alpha_1}{180^\circ} - \sin \alpha_1) + \frac{1}{2} R_4^2 (\frac{\pi \alpha_4}{180^\circ} - \sin \alpha_4))) = 12(a_{\text{к.р}} h_{\text{к.р}} + 2 \cdot \frac{1}{2} (R_1^2 (\frac{\pi \alpha_1}{180^\circ} - \sin \alpha_1) + R_4^2 (\frac{\pi \alpha_4}{180^\circ} - \sin \alpha_4))) = 12(a_{\text{к.р}} h_{\text{к.р}} + R_1^2 (\frac{\pi \alpha_1}{180^\circ} - \sin \alpha_1) + R_4^2 (\frac{\pi \alpha_4}{180^\circ} - \sin \alpha_4)) \quad (3)$$

$$S_{\text{сумм}}^- = 10(a_{\text{к.р}} h_{\text{к.р}} + 2(\frac{1}{2} R_1^2 (\frac{\pi \alpha_1}{180^\circ} - \sin \alpha_1) + \frac{1}{2} R_4^2 (\frac{\pi \alpha_4}{180^\circ} - \sin \alpha_4))) = 10(a_{\text{к.р}} h_{\text{к.р}} + 2 \cdot \frac{1}{2} (R_1^2 (\frac{\pi \alpha_1}{180^\circ} - \sin \alpha_1) + R_4^2 (\frac{\pi \alpha_4}{180^\circ} - \sin \alpha_4))) = 10(a_{\text{к.р}} h_{\text{к.р}} + R_1^2 (\frac{\pi \alpha_1}{180^\circ} - \sin \alpha_1) + R_4^2 (\frac{\pi \alpha_4}{180^\circ} - \sin \alpha_4)) \quad (4)$$

где  $a_{\text{п.м}} = 0,075$  и  $h_{\text{п.м}} = 0,153$  – длина и ширина прямого участка мембраны, м;  $a_{\text{к.р}} = 0,069$  и  $h_{\text{к.р}} = 0,137$  – ширина и высота камеры разделения раствора, м;  $R_1 = 0,34$ ,  $R_2 = 0,343$ ,  $R_4 = 0,106$ ,  $R_5 = 0,119$  – радиусы окружности сегмента, м;  $\alpha_2 = 18,5$ ,  $\alpha_5 = 30$  – углы между радиусами по границам сегмента по длине, шири-

не с вырезом под пакет мембран, град.;  $\alpha_1 = 17,3$ ,  $\alpha_4 = 28$  – углы между радиусами по границам сегмента по длине, ширине с учетом экранирования прокладкой мембран, град.

Далее рассчитываются общие поверхности мембран при отсутствии экранирования (5) и при экранировании прокладкой (6) в аппарате:

$$S_{\text{общ}} = 12(a_{\text{п.м}} h_{\text{п.м}} + R_2^2 (\frac{\pi \alpha_2}{180^\circ} - \sin \alpha_2) + R_5^2 (\frac{\pi \alpha_5}{180^\circ} - \sin \alpha_5)) + 10(a_{\text{п.м}} h_{\text{п.м}} + R_2^2 (\frac{\pi \alpha_2}{180^\circ} - \sin \alpha_2) + R_5^2 (\frac{\pi \alpha_5}{180^\circ} - \sin \alpha_5)) - 6\pi R^2 = 22(a_{\text{п.м}} h_{\text{п.м}} + R_2^2 (\frac{\pi \alpha_2}{180^\circ} - \sin \alpha_2) + R_5^2 (\frac{\pi \alpha_5}{180^\circ} - \sin \alpha_5)) - 6\pi R^2 \quad (5)$$

$$S_{\text{общ}} = 12(a_{\text{к.р}} h_{\text{к.р}} + R_1^2 (\frac{\pi \alpha_1}{180^\circ} - \sin \alpha_1) + R_4^2 (\frac{\pi \alpha_4}{180^\circ} - \sin \alpha_4)) + 10(a_{\text{к.р}} h_{\text{к.р}} + R_1^2 (\frac{\pi \alpha_1}{180^\circ} - \sin \alpha_1) + R_4^2 (\frac{\pi \alpha_4}{180^\circ} - \sin \alpha_4)) - 6\pi R^2 = 22(a_{\text{к.р}} h_{\text{к.р}} + R_1^2 (\frac{\pi \alpha_1}{180^\circ} - \sin \alpha_1) + R_4^2 (\frac{\pi \alpha_4}{180^\circ} - \sin \alpha_4)) - 6\pi R^2 \quad (6)$$

Основные расчетные параметры общей поверхности мембран для разделения технологических растворов в аппарате представлены в таблице 1.

Таблица 1

**Основные расчетные параметры поверхности мембран в электробаромембранном аппарате**  
**Main design parameters of the membrane surface in the electrobaromembrane apparatus**

| Расчетные параметры                              | $S_{\text{сумм}}^-$ , м <sup>2</sup> | $S_{\text{сумм}}^+$ , м <sup>2</sup> | $S_{\text{отв}}$ , м <sup>2</sup> | $S_{\text{общ}}$ , м <sup>2</sup> |
|--------------------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| При отсутствии экранирования мембраны прокладкой | 0,124                                | 0,149                                | 0,00017                           | 0,273                             |
| При экранировании мембраны прокладкой            | 0,102                                | 0,122                                | 0,00017                           | 0,224                             |

Общий объем материала элементов аппарата

$$V_a = n_{\text{фл}} V_{\text{фл}} + n_{\text{к.выс}} V_{\text{к.выс}} + n_{\text{к.вп.1}} V_{\text{к.вп.1}} + n_{\text{к.вп.2}} V_{\text{к.вп.2}} + n_{\text{шт}} V_{\text{шт}},$$

где  $V_{\text{фл}}$ ,  $V_{\text{к.вп.1}}$ ,  $V_{\text{к.вп.2}}$ ,  $V_{\text{к.выс}}$ ,  $V_{\text{шт}}$  – объемы фланца соответствующих камер корпуса с «впадиной» («выступом») (без отверстий и с отверстиями под штуцеры) и цилиндрических штуцеров, м<sup>3</sup>;  $n_{\text{фл}} = 2$  – количество крышек (фланцев) корпуса аппарата;  $n_{\text{к.вп.1}} = 1$  – количество камер диэлектрического корпуса с «впадиной» (без отверстий для штуцеров);  $n_{\text{к.вп.2}} = 2$  – число ка-

мер корпуса диэлектрического корпуса с «впадиной» (с наличием соответствующих отверстий для штуцеров);  $n_{\text{к.выс}} = 2$  – количество камер с «выступом»;  $n_{\text{шт}} = 26$  – общее число цилиндрических штуцеров аппарата.

Диэлектрический фланец (крышка) корпуса показан на рисунке 3.

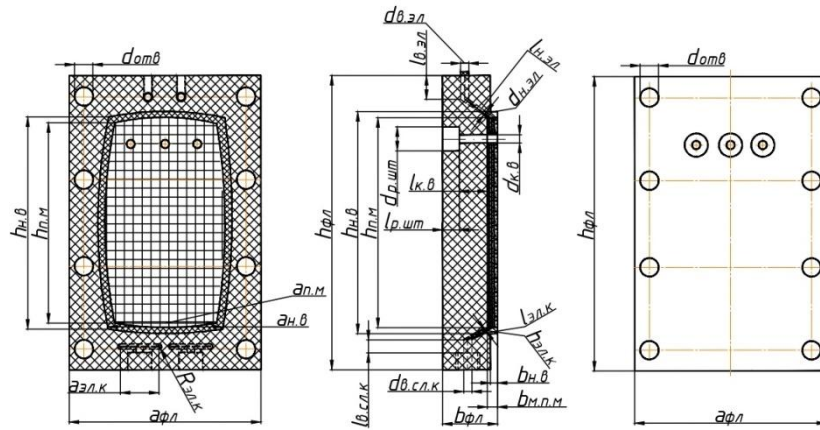


Рис. 3. Фланец (крышка) корпуса электробаромембранного аппарата плоскокамерного типа  
Flange (cover) of the housing of a flat-chamber type electrobaromembrane apparatus

Объем диэлектрического фланца (крышки) корпуса:

$$V_{\text{фл}} = V_{\text{з.фл}} - n_{\text{р.шт}} V_{\text{р.шт}} - n_{\text{к.в}} V_{\text{к.в}} - n_{\text{к.эл}} V_{\text{к.эл}} - n_{\text{к.сл}} V_{\text{к.сл}} - V_{\text{м.п.м}} - V_{\text{н.в}} - n_{\text{отв}} V_{\text{отв}}, \quad (7)$$

где  $V_{\text{з.фл}}$  – объем заготовки фланца (крышки), м<sup>3</sup>;  $V_{\text{р.шт}}$  – объем резьбовой части штуцера, м<sup>3</sup>;  $V_{\text{к.в}}$  – объем канала ввода/вывода разделяемого раствора, м<sup>3</sup>;  $V_{\text{к.эл}}$  – объем канала подвода электрического тока, м<sup>3</sup>;  $V_{\text{к.сл}}$  – объем канала слива (отвода) пермеата, м<sup>3</sup>;  $V_{\text{м.п.м}}$  – объем, занимаемый малым пакетом мембран, м<sup>3</sup>;  $V_{\text{н.в}}$  – объем наружного выреза во фланце со стороны камеры разделения, м<sup>3</sup>;  $V_{\text{отв}}$  – объем отверстия под

болт, м<sup>3</sup>;  $n_{\text{р.шт}} = 5$  – число резьб во фланце под штуцеры;  $n_{\text{к.в}} = 3$  – число каналов ввода/вывода разделяемого раствора;  $n_{\text{к.эл}} = 2$  – число каналов подвода электрического тока;  $n_{\text{к.сл}} = 2$  – число каналов слива пермеата;  $n_{\text{отв}} = 8$  – число отверстий под болт.

Выражение (7) с учетом числа элементов конструкции диэлектрического фланца (крышки) корпуса ЭБМАПТ:

$$V_{\text{фл}} = V_{\text{з.фл}} - 5V_{\text{р.шт}} - 3V_{\text{к.в}} - 2V_{\text{к.эл}} - 2V_{\text{к.сл}} - V_{\text{м.п.м}} - V_{\text{н.в}} - 8V_{\text{отв}}.$$

Объем диэлектрического фланца (крышки) корпуса аппарата (см. рис. 2) с учетом составляющих элементов заготовки материала:

$$\begin{aligned} V_{\text{фл}} = & a_{\text{фл}} b_{\text{фл}} h_{\text{фл}} - 5 \frac{\pi d_{\text{р.шт}}^2}{4} l_{\text{р.шт}} - 3 \frac{\pi d_{\text{к.в}}^2}{4} l_{\text{к.в}} - 2 \left( \frac{\pi d_{\text{в.эл}}^2}{4} l_{\text{в.эл}} + \frac{\pi d_{\text{н.эл}}^2}{4} l_{\text{н.эл}} \right) - \\ & - 2 \left( a_{\text{эл.к}} h_{\text{эл.к}} l_{\text{эл.к}} + \pi R_{\text{эл.к}}^2 l_{\text{эл.к}} + \frac{\pi d_{\text{в.сл.к}}^2}{4} l_{\text{в.сл.к}} \right) - b_{\text{м.п.м}} \left( a_{\text{п.м}} h_{\text{п.м}} + R_2^2 \left( \frac{\pi \alpha_2}{180^\circ} - \sin \alpha_2 \right) + \right. \\ & + R_5^2 \left( \frac{\pi \alpha_5}{180^\circ} - \sin \alpha_5 \right) \left. - b_{\text{н.в}} \left( a_{\text{фл}} h_{\text{фл}} - \left( a_{\text{н.в}} h_{\text{н.в}} + R_3^2 \left( \frac{\pi \alpha_3}{180^\circ} - \sin \alpha_3 \right) + R_6^2 \left( \frac{\pi \alpha_6}{180^\circ} - \sin \alpha_6 \right) \right) \right) - \right. \\ & \left. - 8 \frac{\pi d_{\text{отв}}^2}{4} (b_{\text{фл}} - b_{\text{н.в}}) \right), \end{aligned}$$

где  $a_{\text{фл}} = 0,14$ ,  $b_{\text{фл}} = 0,04$  и  $h_{\text{фл}} = 0,21$  – ширина, длина и высота прямоугольной заготовки фланца (крышки), м;  $d_{\text{р.шт}} = 0,017$  и  $l_{\text{р.шт}} = 0,014$  – диаметр и длина резьбы под штуцер, м;  $d_{\text{к.в}} = 0,006$  и  $l_{\text{к.в}} = 0,019$  – диаметр и длина канала для ввода или вывода разделяемого раствора, м;  $d_{\text{в.эл}} = 0,006$  и  $l_{\text{в.эл}} = 0,017$  – диаметр и длина вертикального канала для подвода электрического

тока, м;  $d_{\text{н.эл}} = 0,003$  и  $l_{\text{н.эл}} = 0,024$  – диаметр и длина наклонного канала для подвода электрического тока, м;  $a_{\text{эл.к}} = 0,028$ ,  $l_{\text{эл.к}} = 0,018$  и  $h_{\text{эл.к}} = 0,003$  – ширина, длина и высота эллиптического канала, м;  $R_{\text{эл.к}} = 0,0015$  – радиус полуцилиндра эллиптического канала, м;  $d_{\text{в.сл.к}} = 0,006$  и  $l_{\text{в.сл.к}} = 0,009$  – диаметр и длина вертикального канала слива пермеата, м;  $b_{\text{м.п.м}} = 0,007$  – тол-

щина, занимаемая вырезом под пакет мембран, м;  $a_{н.в} = 0,083$  и  $h_{н.в} = 0,161$  – ширина и высота наружной части выреза, м;  $b_{н.в} = 0,005$  – глубина выреза, м;  $R_3 = 0,35$  и  $R_6 = 0,135$  – радиус окружности сегмента по длине и ширине большой прокладки, м;  $\alpha_3 = 20$  и  $\alpha_6 = 33$  – угол между ра-

диусами по границам сегмента по длине и ширине большой прокладки, град.;  $d = 0,013$  – диаметр отверстия под болт, м.

Диэлектрическая камера корпуса с «выступом» представлена на рисунке 4.

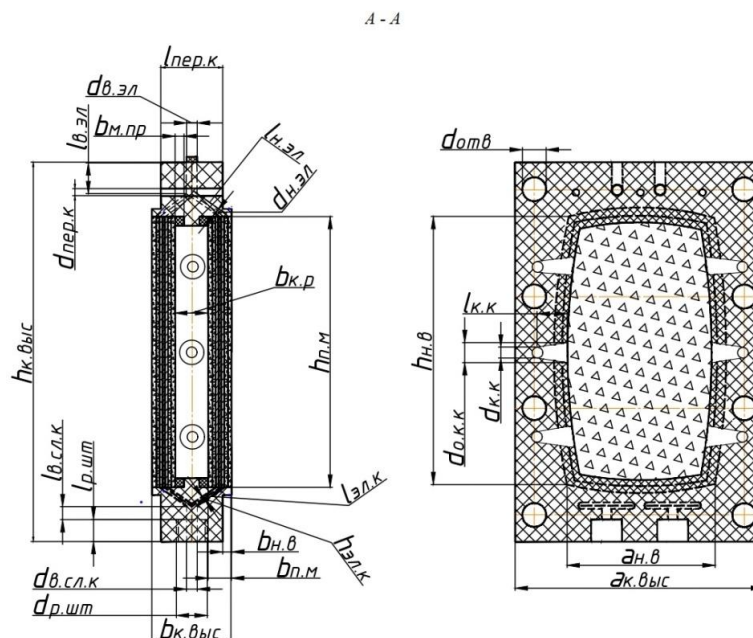


Рис. 4. Камера корпуса электробаромембранного аппарата плоскокамерного типа с «выступом»  
The body chamber of a flat-chamber type electrobaromembrane apparatus with a "ledge"

Объем диэлектрической камеры корпуса с «выступом»:

$$V_{к.выс} = V_{з.к.выс} - n_{р.шт} V_{р.шт} - n_{к.эл} V_{к.эл} - n_{к.сл} V_{к.сл} - n_{п.м} V_{п.м} - n_{пер.к} V_{пер.к} - n_{м.пр} V_{м.пр} - V_{к.р} - n_{н.в.выс} V_{н.в.выс} - n_{отв} V_{отв} - n_{к.к} V_{к.к} \quad (8)$$

где  $V_{з.к.выс}$  – объем заготовки камеры корпуса аппарата с «выступом», м<sup>3</sup>;  $V_{р.шт}$  – объем резьбовой части штуцера, м<sup>3</sup>;  $V_{к.эл}$  – объем канала подвода электрического тока, м<sup>3</sup>;  $V_{к.сл}$  – объем канала слива (отвода) пермеата, м<sup>3</sup>;  $V_{п.м}$  – объем занимаемый пакетом мембран (с увеличенной толщиной), м<sup>3</sup>;  $V_{пер.к}$  – объем переточного канала, м<sup>3</sup>;  $V_{м.пр}$  – объем под малую прокладку, м<sup>3</sup>;  $V_{к.р}$  – объем камеры разделения раствора, м<sup>3</sup>;  $V_{н.в.выс}$  – объем наружного выреза в камере корпуса с «выступом», м<sup>3</sup>;  $V_{отв}$  – объем отверстия под болты, м<sup>3</sup>;  $V_{к.к}$  – объем камерного канала, м<sup>3</sup>;  $n_{р.шт} = 2$  – количество резьб под штуцеры в камере корпуса с «выступом»;  $n_{к.эл} = 2$  – количе-

ство каналов подвода электрического тока;  $n_{к.сл} = 2$  – число каналов слива пермеата;  $n_{п.м} = 2$  – количество пакетов мембран (с увеличенной толщиной);  $n_{пер.к} = 3$  – число переточных каналов;  $n_{м.пр} = 2$  – количество малых прокладок;  $n_{н.в.выс} = 2$  – количество наружных вырез в камере корпуса с «выступом»;  $n_{отв} = 8$  – количество отверстий под болт в камере корпуса с «выступом»;  $n_{к.к} = 6$  – количество камерных каналов.

Выражение (8) с учетом числа элементов конструкции диэлектрической камеры корпуса ЭБМАПТ с «выступом»:

$$V_{к.выс} = V_{з.к.выс} - 2V_{р.шт} - 2V_{к.эл} - 2V_{к.сл} - 2V_{п.м} - 2V_{пер.к} - 2V_{м.пр} - V_{к.р} - 2V_{н.в.выс} - 8V_{отв} - 6V_{к.к}$$

Объем диэлектрической камеры корпуса аппарата с «выступом» (см. рис. 4) с учетом составляющих элементов заготовки материала:

$$\begin{aligned}
 V_{\text{к.выс}} = & a_{\text{к.выс}} b_{\text{к.выс}} h_{\text{к.выс}} - \frac{\pi d_{\text{р.шт}}^2}{2} l_{\text{р.шт}} - \pi \left( \frac{d_{\text{в.эл}}^2}{2} l_{\text{в.эл}} + d_{\text{н.эл}}^2 l_{\text{н.эл}} \right) - 2(2(a_{\text{эл.к}} h_{\text{эл.к}} l_{\text{эл.к}} + \pi R_{\text{эл.к}}^2 l_{\text{эл.к}}) + \\
 & + \frac{\pi d_{\text{в.сл.к}}^2}{4} l_{\text{в.сл.к}}) - 2(b_{\text{п.м}} (a_{\text{п.м}} h_{\text{п.м}} + R_2^2 (\frac{\pi \alpha_2}{180^\circ} - \sin \alpha_2) + R_5^2 (\frac{\pi \alpha_5}{180^\circ} - \sin \alpha_5))) - 3 \frac{\pi d_{\text{пер.к}}^2}{4} l_{\text{пер.к}} - \\
 & - 2(b_{\text{м.пр}} (a_{\text{п.м}} h_{\text{п.м}} + R_2^2 (\frac{\pi \alpha_2}{180^\circ} - \sin \alpha_2) + R_5^2 (\frac{\pi \alpha_5}{180^\circ} - \sin \alpha_5)) - a_{\text{к.р}} h_{\text{к.р}} + R_1^2 (\frac{\pi \alpha_1}{180^\circ} - \sin \alpha_1) + R_4^2 (\frac{\pi \alpha_4}{180^\circ} - \sin \alpha_4)) - \\
 & - b_{\text{к.р}} (a_{\text{к.р}} h_{\text{к.р}} + R_1^2 (\frac{\pi \alpha_1}{180^\circ} - \sin \alpha_1) + R_4^2 (\frac{\pi \alpha_4}{180^\circ} - \sin \alpha_4)) - \\
 & - 2(b_{\text{н.в}} (a_{\text{к.выс}} h_{\text{к.выс}} - (a_{\text{н.в}} h_{\text{н.в}} + R_3^2 (\frac{\pi \alpha_3}{180^\circ} - \sin \alpha_3) + R_6^2 (\frac{\pi \alpha_6}{180^\circ} - \sin \alpha_6)))) - \\
 & - 8(\frac{\pi d_{\text{отв}}^2}{4} (b_{\text{к.выс}} - 2b_{\text{н.в}})) - \frac{6\pi}{4} \left( d_{\text{к.к}}^2 l_{\text{п.к.м}} + \frac{l_{\text{к.к}}}{3} (d_{\text{о.к.к}}^2 + d_{\text{о.к.к}} d_{\text{к.к}} + d_{\text{к.к}}^2) \right)
 \end{aligned}$$

где  $a_{\text{к.выс}} = 0,14$ ,  $b_{\text{к.выс}} = 0,044$ ,  $h_{\text{к.выс}} = 0,21$  – ширина, высота и толщина заготовки камеры с «выступом», м;  $d_{\text{р.шт}} = 0,017$  и  $l_{\text{р.шт}} = 0,014$  – диаметр и длина резьбы под штуцер, м;  $d_{\text{в.эл}} = 0,006$  и  $l_{\text{в.эл}} = 0,017$  – диаметр и длина вертикального канала для подвода электрического тока, м;  $d_{\text{н.эл}} = 0,003$  и  $l_{\text{н.эл}} = 0,024$  – диаметр и длина наклонного канала для подвода электрического тока, м;  $a_{\text{эл.к}} = 0,028$ ,  $l_{\text{эл.к}} = 0,018$  и  $h_{\text{эл.к}} = 0,003$  – ширина, длина и высота эллиптического канала, м;  $R_{\text{эл.к}} = 0,0015$  – радиус полуцилиндра эллиптического канала, м;  $d_{\text{в.сл.к}} = 0,006$  и  $l_{\text{в.сл.к}} = 0,009$  – диаметр и длина вертикального канала слива пермеата, м;  $b_{\text{п.м}} = 0,013$  – толщина, занимаемая

вырезом под увеличенный пакет мембран, м;  $d_{\text{пер.к}} = 0,005$  – диаметр переточного канала, м;  $l_{\text{пер.к}} = 0,034$  – длина переточного канала, м;  $b_{\text{к.р}} = 0,018$  – длина камеры разделения раствора, м;  $b_{\text{м.пр}} = 0,005$  – толщина малой прокладки, м; где  $b_{\text{н.в}} = 0,005$  – глубина выреза, м;  $l_{\text{к.к}} = 0,016$  – высота усеченного конуса канала, м;  $d_{\text{к.к}} = 0,005$  – диаметр усеченной части конуса канала, м;  $d_{\text{о.к.к}} = 0,010$  – диаметр основания конуса канала, м;  $l_{\text{п.к.м}} = 0,017$  – длина цилиндрического переточного малого канала, м.

Диэлектрическая камера корпуса с «впадиной» без отверстий под штуцеры представлена на рисунке 5.

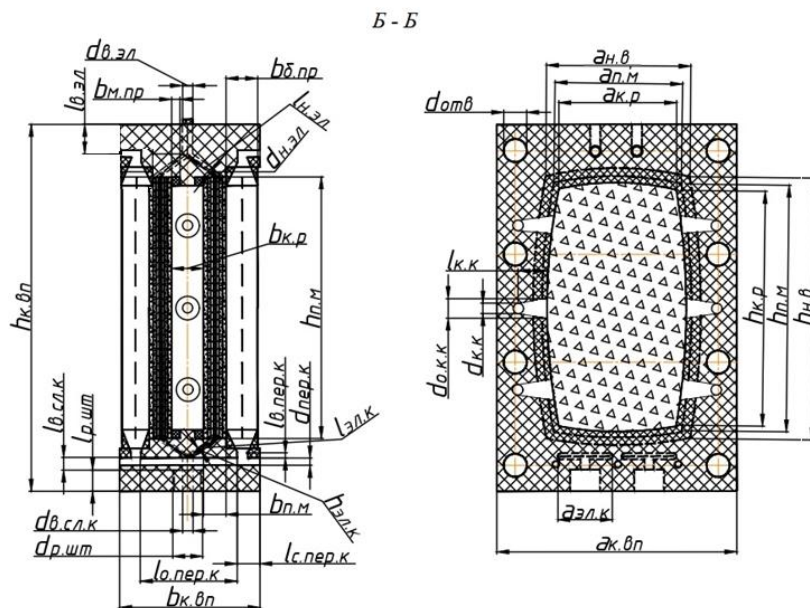


Рис. 5. Камера корпуса электробаромембранного аппарата плоскокамерного типа с «впадиной» (без отверстий под штуцеры)  
The body chamber of a flat-chamber type electrobaromembrane apparatus with a "recess" (without holes for fittings)

Объем диэлектрической камеры корпуса с «впадиной» без отверстий под штуцеры:

$$V_{\text{к.вп.1}} = V_{\text{з.к.вп}} - n_{\text{р.шт}} V_{\text{р.шт}} - n_{\text{к.эл}} V_{\text{к.эл}} - n_{\text{к.сл}} V_{\text{к.сл}} - n_{\text{п.м}} V_{\text{п.м}} - n_{\text{пер.к}} V_{\text{пер.к}} - n_{\text{м.пр}} V_{\text{м.пр}} - n_{\text{к.р}} V_{\text{к.р}} - n_{\text{б.пр}} V_{\text{в.в.вп}} - n_{\text{отв}} V_{\text{отв}} - n_{\text{к.к}} V_{\text{к.к}} \quad (9)$$

где  $V_{\text{з.к.вп}}$  – объем заготовки камеры корпуса аппарата с «впадиной», м<sup>3</sup>;  $V_{\text{р.шт}}$  – объем резьбовой части штуцера, м<sup>3</sup>;  $V_{\text{к.эл}}$  – объем канала подвода электрического тока, м<sup>3</sup>;  $V_{\text{к.сл}}$  – объем канала слива (отвода) пермеата, м<sup>3</sup>;  $V_{\text{п.м}}$  – объем, занимаемый пакетом мембран (с увеличенной толщиной), м<sup>3</sup>;  $V_{\text{пер.к}}$  – объем переточного канала, м<sup>3</sup>;  $V_{\text{м.пр}}$  – объем под малую прокладку, м<sup>3</sup>;  $V_{\text{к.р}}$  – объем камеры разделения раствора, м<sup>3</sup>;  $V_{\text{в.в.вп}}$  – объем внутреннего выреза в камере корпуса с «впадиной», м<sup>3</sup>;  $V_{\text{отв}}$  – объем отверстия под болты, м<sup>3</sup>;  $V_{\text{к.к}}$  – объем камерного канала, м<sup>3</sup>;  $n_{\text{р.шт}} = 2$  – число резьбовых частей штуцеров;  $n_{\text{б.пр}} = 2$  и  $n_{\text{м.пр}} = 2$  – количество

больших (малых) прокладок;  $n_{\text{пер.к}} = 3$  – количество переточных каналов;  $n_{\text{п.м}} = 2$  – количество мембранных пакетов;  $n_{\text{к.сл}} = 2$  – количество каналов для слива пермеата;  $n_{\text{к.эл}} = 2$  – количество каналов подвода электрического тока;  $n_{\text{к.р}} = 3$  – количество камер разделения;  $n_{\text{отв}} = 8$  – число отверстий под болты в камере корпуса с «впадиной» (без отверстий под штуцеры);  $n_{\text{к.к}} = 6$  – количество камерных каналов.

Выражение (9) с учетом числа элементов конструкции диэлектрической камеры корпуса ЭБМАПТ с «впадиной» (без отверстий под штуцеры):

$$V_{\text{к.вп.1}} = V_{\text{з.к.вп}} - 2V_{\text{р.шт}} - 2V_{\text{к.эл}} - 2V_{\text{к.сл}} - 2V_{\text{п.м}} - 2V_{\text{пер.к}} - 2V_{\text{м.пр}} - 3V_{\text{к.р}} - 2V_{\text{в.в.вп}} - 8V_{\text{отв}} - 6V_{\text{к.к}}$$

Объем диэлектрической камеры корпуса аппарата с «впадиной» без отверстий под штуцеры (рис. 5) с учетом составляющих элементов заготовки материала:

$$\begin{aligned} V_{\text{к.вп.1}} = & a_{\text{к.вп}} b_{\text{к.вп}} h_{\text{к.вп}} - \frac{\pi d_{\text{р.шт}}^2}{2} l_{\text{р.шт}} - \pi \left( \frac{d_{\text{в.эл}}^2}{2} l_{\text{в.эл}} + d_{\text{н.эл}}^2 l_{\text{н.эл}} \right) - \\ & - 2 \left( 2(a_{\text{эл.к}} h_{\text{эл.к}} l_{\text{эл.к}} + \pi R_{\text{эл.к}}^2 l_{\text{эл.к}}) + \frac{\pi d_{\text{в.сл.к}}^2}{4} l_{\text{в.сл.к}} \right) - \\ & - 2 \left( b_{\text{п.м}} (a_{\text{п.м}} h_{\text{п.м}} + R_2^2 (\frac{\pi \alpha_2}{180^\circ} - \sin \alpha_2) + R_5^2 (\frac{\pi \alpha_5}{180^\circ} - \sin \alpha_5)) \right) - \\ & - 3 \left( \pi d_{\text{пер.к}}^2 \left( \frac{l_{\text{о.пер.к}}}{4} + l_{\text{с.пер.к}} + l_{\text{в.пер.к}} \right) \right) - \\ & - 2 \left( b_{\text{м.пр}} (a_{\text{п.м}} h_{\text{п.м}} + R_2^2 (\frac{\pi \alpha_2}{180^\circ} - \sin \alpha_2) + R_5^2 (\frac{\pi \alpha_5}{180^\circ} - \sin \alpha_5)) - \right. \\ & \left. - a_{\text{к.р}} h_{\text{к.р}} + R_1^2 (\frac{\pi \alpha_1}{180^\circ} - \sin \alpha_1) + R_4^2 (\frac{\pi \alpha_4}{180^\circ} - \sin \alpha_4) \right) - \\ & - 3 \left( b_{\text{к.р}} (a_{\text{к.р}} h_{\text{к.р}} + R_1^2 (\frac{\pi \alpha_1}{180^\circ} - \sin \alpha_1) + R_4^2 (\frac{\pi \alpha_4}{180^\circ} - \sin \alpha_4)) \right) - \\ & - 2 \left( b_{\text{б.пр}} (a_{\text{н.в}} h_{\text{н.в}} + R_3^2 (\frac{\pi \alpha_3}{180^\circ} - \sin \alpha_3) + R_6^2 (\frac{\pi \alpha_6}{180^\circ} - \sin \alpha_6)) - \right. \\ & \left. - a_{\text{к.р}} h_{\text{к.р}} + R_1^2 (\frac{\pi \alpha_1}{180^\circ} - \sin \alpha_1) + R_4^2 (\frac{\pi \alpha_4}{180^\circ} - \sin \alpha_4) \right) - \\ & - 2\pi d_{\text{отв}}^2 b_{\text{к.вп}} - \frac{3\pi}{2} \left( d_{\text{к.к}}^2 l_{\text{п.к.б}} + \frac{l_{\text{к.к}}}{3} (d_{\text{о.к.к}}^2 + d_{\text{о.к.к}} d_{\text{к.к}} + d_{\text{к.к}}^2) \right) \end{aligned}$$

где  $a_{к.вп} = 0,14$ ,  $b_{к.вп} = 0,08$ ,  $h_{к.вп} = 0,21$  – ширина, высота и толщина заготовки аппарата с «впадиной», м;  $d_{р.шт} = 0,017$  и  $l_{р.шт} = 0,014$  – диаметр и длина резьбы под штуцер, м;  $b_{п.м} = 0,013$  – толщина, занимаемая вырезом под увеличенный пакет мембран, м;  $d_{пер.к} = 0,005$  – диаметр переточного канала, м;  $l_{о.пер.к} = 0,056$ ,  $l_{с.пер.к} = 0,012$  и  $l_{в.пер.к} = 0,003$  – длина основного, соединитель-

ного и вертикального переточного канала, м;  $b_{б.пр} = 0,018$  – толщина большой прокладки, м;  $l_{п.к.б} = 0,040$  – длина цилиндрического большого канала, м.

Диэлектрическая камера корпуса с «впадиной» с наличием отверстий под штуцеры представлена на рисунке 6.

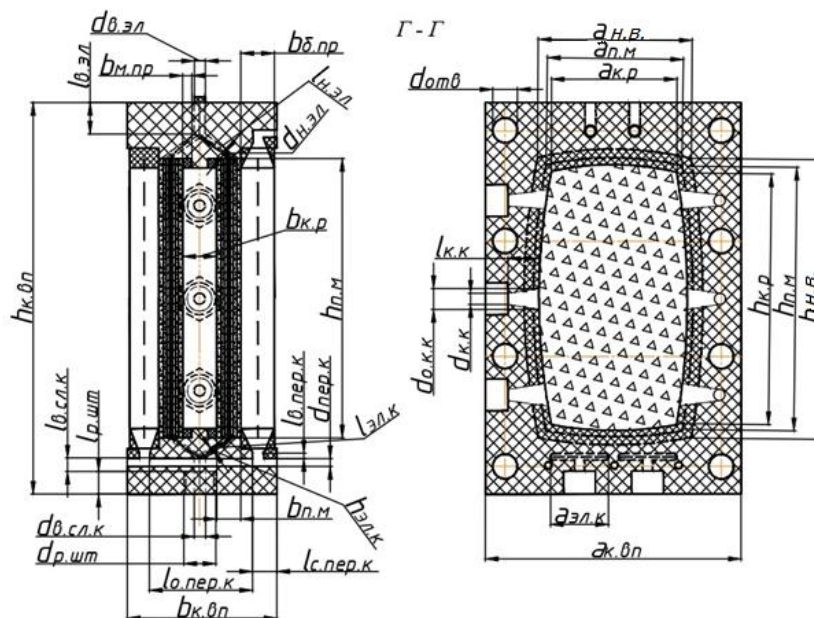


Рис. 6. Камера корпуса электробаромембранного аппарата плоскокамерного типа с «впадиной» (с наличием отверстий под штуцеры)

Chamber of the body of the flat-chamber type electric baromembrane apparatus with a "depression" (with holes for fittings)

Объем диэлектрической камеры корпуса с «впадиной» с наличием отверстий под штуцеры (см. рис. 6):

$$V_{к.вп.2} = V_{з.к.вп} - n_{р.шт} V_{р.шт} - n_{к.эл} V_{к.эл} - n_{к.сл} V_{к.сл} - n_{п.м} V_{п.м} - n_{пер.к} V_{пер.к} - n_{м.пр} V_{м.пр} - n_{к.р} V_{к.р} - n_{б.пр} V_{в.в.вп} - n_{отв} V_{отв} - V_{к.к.о} \quad (10)$$

где  $V_{з.к.вп}$  – объем заготовки камеры корпуса аппарата с «впадиной», м<sup>3</sup>;  $V_{р.шт}$  – объем резьбовой части штуцера, м<sup>3</sup>;  $V_{к.эл}$  – объем канала подвода электрического тока, м<sup>3</sup>;  $V_{к.сл}$  – объем канала слива (отвода) пермеата, м<sup>3</sup>;  $V_{п.м}$  – объем, занимаемый пакетом мембран (с увеличенной толщиной), м<sup>3</sup>;  $V_{пер.к}$  – объем переточного канала, м<sup>3</sup>;  $V_{м.пр}$  – объем под малую прокладку, м<sup>3</sup>;  $V_{к.р}$  – объем камеры разделения раствора, м<sup>3</sup>;  $V_{в.в.вп}$  – объем внутреннего выреза в камере корпуса с «впадиной», м<sup>3</sup>;  $V_{отв}$  – объем отверстия под болты, м<sup>3</sup>;  $V_{к.к.о}$  – общий объем камерных каналов, м<sup>3</sup>;  $n_{р.шт} = 5$  – количество резьбовых частей шту-

церов;  $n_{б.пр} = 2$  и  $n_{м.пр} = 2$  – количество больших и малых прокладок;  $n_{пер.к} = 3$  – количество переточных каналов;  $n_{п.м} = 2$  – количество мембранных пакетов;  $n_{к.сл} = 2$  – число каналов для слива пермеата;  $n_{к.эл} = 2$  – количество каналов подвода электрического тока;  $n_{к.р} = 3$  – количество камер разделения;  $n_{отв} = 8$  – количество отверстий под болты в камере корпуса с «впадиной» (с наличием отверстий под штуцеры).

Выражение (10) с учетом числа элементов конструкции диэлектрической камеры корпуса ЭБМАПТ с «впадиной» (с наличием отверстий под штуцеры):

$$V_{к.вп.2} = V_{з.к.вп} - 5V_{р.шт} - 2V_{к.эл} - 2V_{к.сл} - 2V_{п.м} - 3V_{пер.к} - 2V_{м.пр} - 3V_{к.р} - 2V_{в.в.вп} - 8V_{отв} - V_{к.к.о}.$$

Объем диэлектрической камеры корпуса аппарата с «впадиной» и с наличием отверстий

под штуцеры (рис. 6) с учетом составляющих элементов заготовки материала:

$$\begin{aligned}
 V_{\text{к.вп.2}} = & a_{\text{к.вп.}} b_{\text{к.вп.}} h_{\text{к.вп.}} - 5 \frac{\pi d_{\text{р.шт.}}^2}{4} l_{\text{р.шт.}} - \pi \left( \frac{d_{\text{в.эл.}}^2}{2} l_{\text{в.эл.}} + d_{\text{н.эл.}}^2 l_{\text{н.эл.}} \right) - \\
 & - 2 \left( 2(a_{\text{эл.к.}} h_{\text{эл.к.}} l_{\text{эл.к.}} + \pi R_{\text{эл.к.}}^2 l_{\text{эл.к.}}) + \frac{\pi d_{\text{в.сл.к.}}^2}{4} l_{\text{в.сл.к.}} \right) - \\
 & - 2 \left( b_{\text{н.м.}} (a_{\text{н.м.}} h_{\text{н.м.}} + R_2^2 (\frac{\pi \alpha_2}{180^\circ} - \sin \alpha_2) + R_5^2 (\frac{\pi \alpha_5}{180^\circ} - \sin \alpha_5)) \right) - \\
 & - 3 \left( \frac{\pi d_{\text{пер.к.}}^2}{4} (l_{\text{о.пер.к.}} + 3(l_{\text{с.пер.к.}} + l_{\text{в.пер.к.}})) \right) - \\
 & - 2 \left( b_{\text{м.пр.}} (a_{\text{н.м.}} h_{\text{н.м.}} + R_2^2 (\frac{\pi \alpha_2}{180^\circ} - \sin \alpha_2) + R_5^2 (\frac{\pi \alpha_5}{180^\circ} - \sin \alpha_5)) - \right. \\
 & \left. - a_{\text{к.р.}} h_{\text{к.р.}} + R_1^2 (\frac{\pi \alpha_1}{180^\circ} - \sin \alpha_1) + R_4^2 (\frac{\pi \alpha_4}{180^\circ} - \sin \alpha_4)) \right) - \\
 & - 3 \left( b_{\text{к.р.}} (a_{\text{к.р.}} h_{\text{к.р.}} + R_1^2 (\frac{\pi \alpha_1}{180^\circ} - \sin \alpha_1) + R_4^2 (\frac{\pi \alpha_4}{180^\circ} - \sin \alpha_4)) \right) - \\
 & - 2 \left( b_{\text{о.пр.}} (a_{\text{н.в.}} h_{\text{н.в.}} + R_3^2 (\frac{\pi \alpha_3}{180^\circ} - \sin \alpha_3) + R_6^2 (\frac{\pi \alpha_6}{180^\circ} - \sin \alpha_6)) - \right. \\
 & \left. - a_{\text{к.р.}} h_{\text{к.р.}} + R_1^2 (\frac{\pi \alpha_1}{180^\circ} - \sin \alpha_1) + R_4^2 (\frac{\pi \alpha_4}{180^\circ} - \sin \alpha_4)) \right) - \\
 & - 2\pi d_{\text{отв.}}^2 b_{\text{к.вп.}} - \frac{3\pi}{4} \left( d_{\text{к.к.}}^2 l_{\text{н.к.б.}} + \frac{2l_{\text{к.к.}}}{3} (d_{\text{о.к.к.}}^2 + d_{\text{о.к.к.}} d_{\text{к.к.}} + d_{\text{к.к.}}^2) \right) ,
 \end{aligned}$$

Если рассмотреть пример конструкции многокамерного ЭБМАПТ (см. рис. 1), можно отметить наличие штуцеров для ввода, вывода технологического разделяемого раствора пищевого производства, штуцеров для отвода прианодного, прикатодного пермеата, камерных штуцеров ввода раствора и вывода ретентата соответственно. Рассматриваемые штуцеры, как и два диэлектрических фланца (крышки) корпуса, камеры корпуса с «выступом», «впадиной» аппарата, изготавливаются из капролона (ПА-6).

Расчет цилиндрического штуцера проводится по формуле

$$V_{\text{шт.}} = V_{\text{ц.шт1}} + V_{\text{ц.шт2}} ,$$

где  $V_{\text{ц.шт1}}$  — объем цилиндрического штуцера по всей длине, м<sup>3</sup>;  $V_{\text{ц.шт2}}$  — объем цилиндрического штуцера в месте размещения шестигранника под ключ, м<sup>3</sup>.

$$V_{\text{ц.шт1}} = \frac{\pi l_{\text{ц.шт1}}}{4} (d_{\text{н.ц.шт1}}^2 - d_{\text{в.ц.шт1}}^2) + \frac{l_{\text{ц.шт2}}}{2} (3\sqrt{3}a^2 - \frac{\pi d_{\text{в.ц.шт1}}^2}{2})$$

где  $d_{\text{н.ц.шт1}} = 0,017$  — наружный диаметр цилиндрического штуцера, м;  $d_{\text{в.ц.шт1}} = 0,006$  — внутренний диаметр цилиндрического штуцера, м;  $l_{\text{ц.шт1}} = 0,028$  — длина цилиндрического штуцера, м;  $a = 0,0098$  — сторона одной грани шестигранника, м;  $l_{\text{ц.шт2}} = 0,004$  — длина цилиндрического штуцера в месте размещения шестигранника, м.

Оценка общего объема элементов аппарата и его параметров представлена в таблице 2.

Таблица 2

**Оценка общего объема элементов аппарата и его параметров**  
**Estimation of the total volume of the device elements and its parameters**

| Параметр                         | Значение             |
|----------------------------------|----------------------|
| $V_{\text{фл.}}, \text{ м}^3$    | $9,88 \cdot 10^{-4}$ |
| $V_{\text{к.выс.}}, \text{ м}^3$ | $5,57 \cdot 10^{-4}$ |
| $V_{\text{к.вп.1}}, \text{ м}^3$ | $1,12 \cdot 10^{-3}$ |
| $V_{\text{к.вп.2}}, \text{ м}^3$ | $1,13 \cdot 10^{-3}$ |
| $V_{\text{шт.}}, \text{ м}^3$    | $6,45 \cdot 10^{-6}$ |
| $V_{\text{а.}}, \text{ м}^3$     | $6,64 \cdot 10^{-3}$ |

Масса аппарата

$$m_a = \rho_m V_a,$$

где  $\rho_m$  – плотность материала, из которого изготовлены детали корпуса аппарата, кг/м<sup>3</sup>;  $V_a$  – общий объем элементов аппарата, м<sup>3</sup>.

Стоимость составляющих элементов аппарата (общего материала)

$$Y = m_a \text{ Ц.}$$

Оценка расчетных характеристик аппаратов представлена в таблице 3.

Таблица 3

Расчетные параметры плоскокамерных аппаратов  
Design characteristics of the devices

| Конструкция аппарата                                        | Материал                                   | $\rho_m$ , кг/м <sup>3</sup> | $m_a$ , кг | Y, руб. |
|-------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|------------------------------|------------|---------|
| Электробаромембранный аппарат плоскокамерного типа (ЭБМАПТ) | ПА-6 (капролон) [23]                       | 1160                         | 7,7        | 3925    |
| Баромембранный аппарат плоскокамерного типа (БМАПТ)         | Нержавеющая сталь (марка – 12Х18Н10Т) [24] | 7920                         | 52,65      | 13 479  |

Программная реализация для комплексного подхода к расчету площади поверхности мембраны, массы материала и стоимости элементов самого многокамерного электробаромем-

бранного аппарата плоскокамерного типа приведена в программе для ЭВМ [25], которая реализована на языке программирования Delphi/Object Pascal (рис. 7).

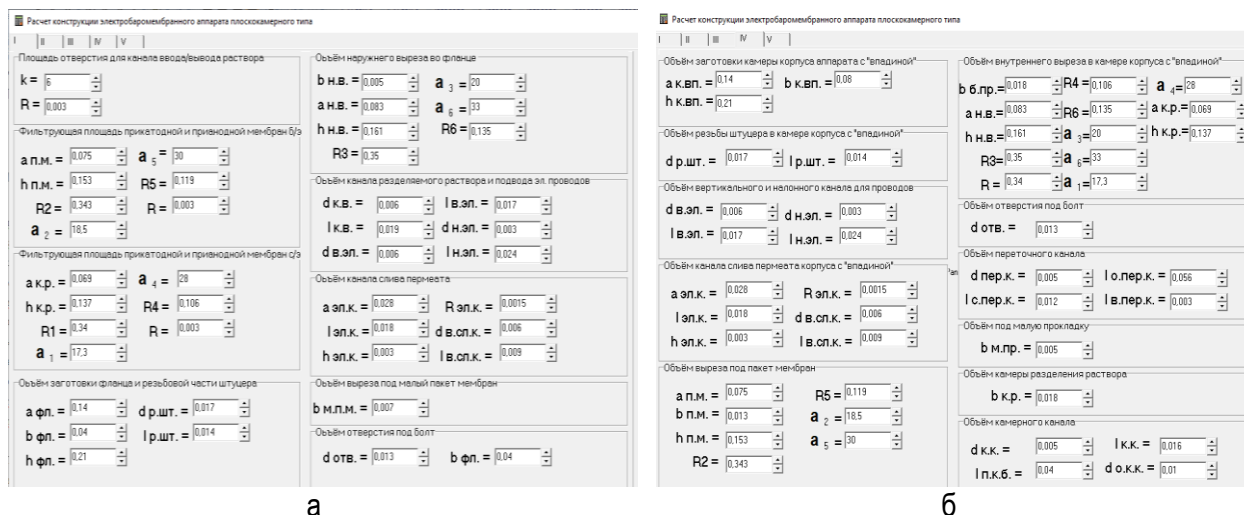


Рис. 7. Фрагменты программы для элементов автозаполнения корпуса электробаромембранного аппарата плоскокамерного типа  
Fragments of the program for the elements of automatic filling of the body of a flat-chamber type electrobaromembrane apparatus

Пример реализации и дружественного интерфейса программы показан как скриншот с учетом автозаполнения данных (рис. 7, а, б) и результатов расчета параметров аппарата (рис. 8).

На основе предложенного комплексного подхода и проведенного расчета эффективной площади поверхности, объема и массы элементов аппарата было определено, что наибольшую стоимость для изготовления имеет БМАПТ (13 479 руб.), выполненный из нержавеющей

стали (марка стали – 12Х18Н10Т), далее следует ЭБМАПТ (3925 руб.), выполненный из материала ПА-6 (капролон). Отмечается, что перспективным вариантом на основе расчета и анализа конструкций аппаратов подобного типа являются устройства двух типов, так как они позволяют работать с различными технологическими растворами пищевых производств и при различных условиях их эксплуатации (баромембранные и электробаромембранные).

Расчет конструкции электробаромембранного аппарата плоскокамерного типа

|                                         |  | Сумм(катод) | Сумм(анод) | Сотв.   | Собщ.   |
|-----------------------------------------|--|-------------|------------|---------|---------|
| При отсутствии экранирования прокладкой |  | 0,12464     | 0,14957    | 0,00017 | 0,27421 |
| При экранировании прокладкой            |  | 0,10252     | 0,12235    | 0,00017 | 0,22431 |

| Уз. фл.  | Ур. шт.    | Ук. в.      | Ук. эл.    | Ук. сл.    | Ум. п. м. | Ун. в.    | Уотв.      |
|----------|------------|-------------|------------|------------|-----------|-----------|------------|
| 0,001176 | 0,00000318 | 0,000000537 | 0,00000065 | 0,00000164 | 0,0000873 | 0,0000730 | 0,00000464 |

| Уз. к. выс. | Ур. шт.    | Ук. эл.     | Ук. сл.    | Уп. м.   | Ун. в. выс. | Уотв.      | Упер. к.    |
|-------------|------------|-------------|------------|----------|-------------|------------|-------------|
| 0,001294    | 0,00000318 | 0,000000820 | 0,00000353 | 0,000162 | 0,0000730   | 0,00000451 | 0,000000667 |

| Ум. пр.   | Ук. р.   | Ук. к.     |
|-----------|----------|------------|
| 0,0000188 | 0,000184 | 0,00000107 |

| Уз. к. вл. | Ур. шт.    | Ук. эл.     | Ук. сл.    | Уп. м.   | Ув. в. вл. | Уотв.     | Упер. к.   |
|------------|------------|-------------|------------|----------|------------|-----------|------------|
| 0,002352   | 0,00000318 | 0,000000820 | 0,00000353 | 0,000162 | 0,0001095  | 0,0000106 | 0,00000228 |

| Ум. пр.   | Ук. р.   | Ук. к.     |
|-----------|----------|------------|
| 0,0000188 | 0,000184 | 0,00000152 |

| Уз. к. вл. | Ур. шт.    | Ук. эл.     | Ук. сл.    | Уп. м.   | Ув. в. вл. | Уотв.     | Упер. к.   |
|------------|------------|-------------|------------|----------|------------|-----------|------------|
| 0,002352   | 0,00000318 | 0,000000820 | 0,00000353 | 0,000162 | 0,0001095  | 0,0000106 | 0,00000198 |

| Ум. пр.   | Ук. р.   | Ук. к. о.  |
|-----------|----------|------------|
| 0,0000188 | 0,000184 | 0,00000675 |

| Уфл.     | Ук. выс. | Ук. вл. 1 | Ук. вл. 2 | Ушт.       | Уа.     |
|----------|----------|-----------|-----------|------------|---------|
| 0,000957 | 0,000547 | 0,001105  | 0,001099  | 0,00000645 | 0,00648 |

| р    | Ma  | У    |
|------|-----|------|
| 1160 | 7,5 | 3831 |

Пересчитать  
Завершить

Рис. 8. Фрагмент программы расчета целевых параметров электробаромембранного аппарата плоскокамерного типа  
Fragment of the program for calculating the target parameters of a flat-chamber type electrobaromembrane apparatus

**Закключение.** Разработан комплексный подход для проектирования, расчета стоимости многокамерных электробаромембранных аппаратов при концентрировании (разделении) технологических растворов различных пищевых производств, позволяющий автоматически варьировать и подбирать размеры элементов камер корпуса, фланцев и штуцеров при обработке растворов. На основе предложенного комплексного подхода и проведенного расчета эффективной площади поверхности, объема и массы элемен-

тов аппарата было определено, что наибольшую стоимость для изготовления имеет БМАПТ (13 479 руб.), выполненный из нержавеющей стали (марка стали – 12Х18Н10Т), далее следует ЭБМАПТ (3 925 руб.), выполненный из материала ПА-6 (капролон). Отмечается, что перспективным вариантом на основе расчета и анализа конструкций аппаратов подобного типа являются устройства двух типов, так как они позволяют работать с различными технологическими растворами пищевых производств.

#### Список источников

1. Стабников В.Н., Лысянский В.М., Попов В.Д. Процессы и аппараты пищевых производств. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Агропромиздат, 1985. 503 с.
2. Кавецкий Г.Д., Васильев Б.В. Процессы и аппараты пищевой технологии. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Колос, 2000. 551 с.
3. Ковалева О.А., Ковалев С.В. Разделение послеспиртовой мелассной барды на пористых мембранах УФМ-50®, УПМ-50М®, ОПМН-П® и ОФАМ-К® // Мембраны и мембранные технологии. 2017. Т. 7, № 3. С. 213–224. DOI: 10.1134/S221811721703004X.
4. Свириденко Ю.Я., Мяконосов Д.С., Абрамов Д.В., и др. Разработка технологии производства гидролизатов сывороточных белков молока с использованием мембранной техники. Ч. 2. Оптимизация технологических режимов производства гидролизатов сывороточных белков молока в ферментативном мембранном реакторе // Пищевая промышленность. 2017. № 8. С. 40–43.
5. Храмцов А.Г. Технологический прорыв аграрно-пищевых инноваций молочного дела на примере универсального сельхозсырья. Динафильтрация // Аграрно-пищевые инновации. 2022. Т. 2, № 18. С. 9–25. DOI: 10.31208/2618-7353-2022-18-9-25.

6. Храмцов А.Г., Борисенко А.А., Евдокимов И.А., и др. Эволюция переработки молочной сыворотки: прошлое, настоящее, будущее (часть 1) // Современная наука и инновации. 2021. № 2(34). С. 129-139. DOI: 10.37493/2307-910X.2021.2.12.
7. Гавриш А.В., Анисимов Г.С., Кравцов В.А., и др. Обратнoосмотическая очистка пермеатов, полученных при нанофильтрации молочного сырья // Молочная промышленность. 2023. № 5. С. 16–18. DOI: 10.21603/1019-8946-2023-5-2.
8. Яковлева М.Р., Никулина О.К., Колоскова О.В., и др. Сравнительная оценка процессов электродиализа и электродеионизации // Пищевая промышленность: наука и технологии. 2023. Т. 16, № 4. С. 61–68.
9. Никулина О.К., Колоскова О.В., Яковлева М.Р., и др. Повышение степени очистки диффузионного сока методом электрохимической деминерализации // Пищевая промышленность: наука и технологии. 2022. Т. 15, № 3 (57). С. 69–78. DOI: 10.47612/2073-4794-2022-15-3(57)-69-78.
10. Elmidaoui A., Chay L., Tahaikt M., et al. Demineralisation for beet sugar solutions using an electrodialysis pilot plant to reduce melassigenic ions // Desalination. 2006. Vol. 189, is. 1–3. P. 209–214. DOI: 10.1016/j.desal.2005.06.026.
11. Luo J., Hang X., Zhai W., et al. Refining sugarcane juice by an integrated membrane process: filtration behavior of polymeric membrane at high temperature // Journal of Membrane Science. 2016. Vol. 509. P. 105–115. DOI: 10.1016/j.memsci.2016.02.053.
12. Qabli H., Rafik M., Tahri M., et al. Optimization of melassigenic ions removal operation from beet sugar syrups and mother liquor by electrodialysis // Chemical. 2016. Vol. 8. P. 95–103.
13. Володин Д.Н., Топалов В.К., Иванченко Е.Ю., и др. Особенности использования полимерных мембран в процессе мембранного фракционирования молочного сырья // Переработка молока. 2024. Т. 2, № 292. С. 6–8.
14. Володин Д.Н., Топалов В.К., Куликова И.К., и др. Мембранное фракционирование обезжиренного молока: влияние казеина на формирование функциональных свойств белковых концентратов // Молочная промышленность. 2024. № 6. С. 48–53.
15. Butylskii D.Yu., Troitskiy V.A., Chuprynnina D.A., et al. Selective recovery of lithium ion from its mixed solution with potassium and sodium by electrobaromembrane method // Separation and Purification Technology. 2024. Vol. 343. P. 126675. DOI: 10.1016/j.seppur.2024.126675.
16. Бутыльский Д.Ю., Троицкий В.А., Смирнова Н.В., и др. Селективное извлечение катионов лития из смеси хлоридов щелочных металлов с использованием электробаромембранного процесса // Мембраны и мембранные технологии. 2024. Т. 14, № 3. С. 190–199. DOI 10.31857/S2218117224030022.
17. Бутыльский Д.Ю., Мареев С.А., Рыжков И.И., и др. Оценка влияния электроосмоса на эффективность электробаромембранного разделения с использованием трековых мембран // Мембраны и мембранные технологии. 2023. Т. 13, № 5. С. 423–432. DOI 10.31857/S2218117223050024.
18. Butylskii D.Yu., Troitskiy V.A., Chuprynnina D.A., et al. Selective Separation of Singly Charged Chloride and Dihydrogen Phosphate Anions by Electrobaromembrane Method with Nanoporous Membranes // Membranes. 2023. Vol. 13, is. 5. P. 455. DOI: 10.3390/membranes13050455.
19. Butylskii D.Yu., Troitskiy V.A., Chuprynnina D.A., et al. Application of Hybrid Electrobaromembrane Process for Selective Recovery of Lithium from Cobalt- and Nickel-Containing Leaching Solutions // Membranes. 2023. Vol. 13, is. 5. P. 509. DOI: 10.3390/membranes13050509.
20. Головашин В.Л., Лазарев С.И., Лавренченко А.А. Исследование кинетических коэффициентов электроультрафильтрационного разделения промышленных растворов биохимических производств // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2014. Т. 20, № 1. С. 86–94.
21. Лазарев С.И., Родионов Д.А., Богомолов В.Ю., и др. Частичная деминерализация подсырной сыворотки методом ультрафильтрации с импульсным подводом тока // Сыроделие и маслоделие. 2019. № 4. С. 47–49.
22. Ковалев С.В., Ковалева О.А., Седоплатов И.С. Электробаромембранный аппарат плоскокамерного типа. Патент РФ на изобретение № 2820720 С1. 2024. Бюл. 25. 20 с. Доступно по: [https://fips.ru/registers-doc-view/fips\\_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2820720&TypeFile=html](https://fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2820720&TypeFile=html). Ссылка активна на 08.04.2025.

23. Капролон, свойства и характеристики: сайт фирмы ЦИН Резинотехнические изделия. Доступно по: <https://cin.ru/opisanie/kaprolon-svoystva-i-kharakteristiki>. Ссылка активна на 08.04.2025.
24. Сталь марки 12X18H10T: сайт центрального металлического портала. Доступно по: [https://metallicheskiy-portal.ru/marki\\_metallov/stk/12X18H10T](https://metallicheskiy-portal.ru/marki_metallov/stk/12X18H10T). Ссылка активна на 08.04.2025.
25. Федотов Н.А., Ковалев С.В., Седоплатов И.С., и др. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024688015 Российская Федерация. Программа для расчета параметров электробаромембранного аппарата плоскокамерного типа: № 2024687830: опубл. 25.11.2024.

### References

1. Stabnikov VN, Lysyanskij VM, Popov VD. *Processy i apparaty pischevyh proizvodstv*. 4th ed., revised and additional. Moscow: Agropromizdat; 1985. 503 p. (In Russ).
2. Kaveckij GD, Vasil'ev BV. *Processy i apparaty pischevoj tehnologii*. 2nd ed., revised and additional. Moscow: Kolos; 2000. 551 p. (In Russ).
3. Kovaleva OA, Kovalev SV. Separation of molasses distillery slop on UFM-50®, UPM-50M®, OPMN-P®, and OFAM-K® porous membranes. *Membranes and membrane technologies*. 2017;57(6):542-551. (In Russ.). DOI: 10.1134/S0965544117060044.
4. Sviridenko YuYa, Myagkonosov DS, Abramov DV, et al. Development of manufacturing processes of whey protein hydrolyzates using membrane technology. Part 2. Optimizing process conditions for producing whey protein hydrolysates in an enzymatic membrane reactor. *Food industry*. 2017;(8):40-43. (In Russ.).
5. Khramtsov AG. Technological breakthrough of the agrarian-and-food innovations in dairy case for example of universal agricultural raw materials. Diafiltration. *Agricultural and food innovations*. 2022;(2):9-25. (In Russ). DOI: 10.31208/2618-7353-2022-18-9-25.
6. Khramtsov AG, Borisenko AA, Evdokimov IA, et al. Evolution of whey processing: past, present, future (part 1). *Modern science and innovation*. 2021;(2):129-139. (In Russ.). DOI: 10.37493/2307-910X.2021.2.12.
7. Gavrish AV, Anisimov GS, Kravtsov VA, et al. Reverse osmotic purification of permeates obtained by nanofiltration of dairy raw materials. *Modern science and innovation*. 2023;(5):16-18. (In Russ.). DOI: 10.21603/1019-8946-2023-5-2.
8. Yakovleva MR, Nikulina OK, Koloskova OV, et al. Comparative assessment of electrodialysis and electrodeionization processes. *Food industry: science and technology*. 2023;16(4):61-68. (In Russ.).
9. Nikulina OK, Koloskova OV, Yakovleva MR, et al. Increasing the degree of purification of diffusion juice by electrochemical demineralization. *Food industry: science and technology*. 2022;15(3):69-78. (In Russ.). DOI: 10.47612/2073-4794-2022-15-3(57)-69-78.
10. Elmidaoui A, Chay L, Tahait M, et al. Demineralisation for beet sugar solutions using an electrodialysis pilot plant to reduce melassigenic ions. *Desalination*. 2006;189(1-3):209-214. DOI: 10.1016/j.desal.2005.06.026.
11. Luo J, Hang X, Zhai W, et al. Refining sugarcane juice by an integrated membrane process: filtration behavior of polymeric membrane at high temperature. *Journal of Membrane Science*. 2016;509:105-115. DOI: 10.1016/j.memsci.2016.02.053.
12. Qabli H, Rafik M, Tahri M, et al. Optimization of melassigenic ions removal operation from beet sugar syrups and mother liquor by electrodialysis. *Chemica*. 2016;8:95-103.
13. Volodin DN, Topalov VK, Ivanchenko EJ, et al. Osobennosti ispol'zovanija polimernyh membran v processe membrannogo frakcionirovanija molochnogo syr'ja. *Pererabotka moloka*. 2024;(2):292:6-8. (In Russ.).
14. Volodin DN, Topalov VK, Kulikova IK, et al. Membrane fractionation of skim milk: effect of casein on functional properties of protein concentrates. *Molochnaja promyshlennost'*. 2024;(6):48-53. (In Russ.).
15. Butylskii DYU, Troitskiy VA, Chuprynina DA, et al. Selective recovery of lithium ion from its mixed solution with potassium and sodium by electrobaromembrane method. *Separation and Purification Technology*. 2024;343:126675. DOI: 10.1016/j.seppur.2024.126675.

16. Butylskii DYu, Troitskiy VA, Smirnova NV, et al. Selective extraction of lithium cations from mixture of alkali metal chlorides using electrobaromembrane process. *Membrany i membrannye technology*. 2024;14(3):190–199. (In Russ.). DOI: 10.31857/S2218117224030022.
17. Butylskii DYu, Mareev SA, Ryzhkov II, et al. Evaluation of the effect of electroosmosis on the efficiency of electrobaromembrane separation using track-etched membranes. *Membrany i membrannye technology*. 2023;13(5):423–432. (In Russ.). DOI: 10.31857/S2218117223050024.
18. Butylskii DYu, Troitskiy VA, Chuprykina DA, et al. Selective separation of singly charged chloride and dihydrogen phosphate anions by electrobaromembrane method with nanoporous membranes. *Membranes*. 2023;13(5):455. DOI: 10.3390/membranes13050455.
19. Butylskii DYu, Troitskiy VA, Chuprykina DA, et al. Application of hybrid electrobaromembrane process for selective recovery of lithium from cobalt- and nickel-containing leaching solutions. *Membranes*. 2023;13(5):509. DOI: 10.3390/membranes13050509.
20. Golovashin VL, Lazarev SI, Lavrenchenko AA. Investigation of the kinetic coefficients of electroultrafiltration separation of industrial solutions for biochemical production. *Transactions of the Tambov State Technical University*. 2014;20(1):86–94. (In Russ.).
21. Lazarev SI, Rodionov DA, Bogomolov VYu, et al. Partial demineralization of subsurface serum by ultrafiltration with pulsed current supply. *Cheese and butter making*. 2019;(4):47–49. (In Russ.).
22. Kovalev SV, Kovaleva OA, Sedoplatov IS. Electrobaromembrane device of the flat-chamber type. Patent RUS № 2820720. 2024. Byul. № 25. (In Russ). Available at: [https://fips.ru/registers-doc-view/fips\\_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2820720&TypeFile=html](https://fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2820720&TypeFile=html). Accessed: 08.04.2025.
23. Kaprolon, properties and characteristics: the website of the company QING Rubber products. Available at: <https://cin.ru/opisanie/kaprolon-svoystva-i-kharakteristiki/>. Accessed 08.04.2025.
24. Steel grade 12X18N10T: the website of the central metal portal. Available at: [https://metallischekiy-portal.ru/marki\\_metallov/stk/12X18H10T](https://metallischekiy-portal.ru/marki_metallov/stk/12X18H10T). Accessed: 08.04.2025.
25. Fedotov NA, Kovalev SV, Sedoplatov IS, et al. Certificate of state registration of the computer program No. 2024688015 Russian Federation. Program for calculating the parameters of a flat-chamber electrobaromembrane device: No. 2024687830: published: 25.11.2024.

Статья принята к публикации 08.07.2025 / The article accepted for publication 08.07.2025.

Информация об авторах:

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

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

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

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

Information about the authors:

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

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

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

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

