

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ И ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОБАРОМЕМБРАННОГО АППАРАТА РУЛОННОГО ТИПА ДЛЯ РАЗДЕЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РАСТВОРОВ

С. И. Лазарев<sup>1</sup>, С. В. Ковалев<sup>1</sup>, Д. Н. Коновалов<sup>1</sup>,  
М. А. Кузнецов<sup>1</sup>, В. М. Поликарпов<sup>1</sup>, А. А. Арзамасцев<sup>2</sup>

*Кафедра «Прикладная геометрия и компьютерная графика» (1), ФГБОУ ВО «ТГТУ»;  
кафедра математического моделирования и информационных технологий (2),  
ФГБОУ ВО «ТГУ им. Г. Р. Державина», г. Тамбов, Россия;  
geometry@mail.nnn.tstu.ru*

**Ключевые слова:** мембрана; разделение; раствор; электробаромембранные процессы.

**Аннотация:** Представлена конструкция электробаромембранного аппарата рулонного типа, позволяющая извлекать катионы и анионы веществ в потоках прикатодного и прианодного пермеата. На основе конструктивных особенностей электробаромембранного аппарата рулонного типа установлено, что устройство может работать при действии нескольких движущих сил (перепада давления до и после мембраны и разницы электрических потенциалов). Отмечено, что разработанное устройство может использоваться в схемах очистки сточных вод гальванических производств. Показан пример применения конструкции рулонного баромембранного аппарата, оснащенного мембраной МГА-95 для разделения водных сульфатсодержащих растворов содержащих ионы олова, железа и цинка.

---

На промышленных предприятиях Центрально-Черноземного региона, занимающихся выпуском конкурентноспособной продукции двойного назначения, остро стоит проблема модернизации существующих схем очистки сточных вод. Данная проблема может решаться с применением высокопроизводительных мембранных аппаратов рулонного типа, которые в настоящее время только разрабатываются.

При использовании в технологических схемах очистки промышленных стоков электробаромембранных аппаратов различного типа существует необходимость использования коррозионноустойчивых материалов для исполнения основных элементов (корпус, крышки и др.), устойчивых к воздействию кислот и щелочей, так как электрохимические реакции, возникающие в процессе разделения на электродах, подщелачивают и подкисляют потоки пермеата. Разработаны рекомендации показывающие, что при использовании аппаратов электробаромембранного разделения растворов без наложения разницы электрических потенциалов на систему «мембрана – раствор» можно использовать в качестве конструкционного материала нержавеющие стали различной марки (12Х18Н9Т, Х18Н10Т и др.) или капролон (при одновременном применении двух движущих сил в процессе разделения электропроводящей жидкости). Новая конструкция рулонного мембранного аппарата, учитывающего данные особенности, может быть оснащена различными типами пористых полимерных мембран (гипер-, нано-, ультрафильтрационных) (рис. 1, 2).

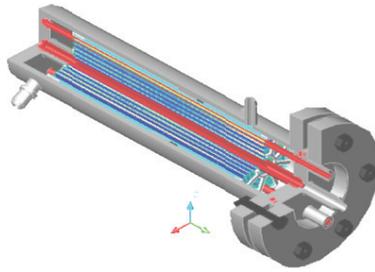


Рис. 1. 3D-модель электробаромембранного аппарата рулонного типа

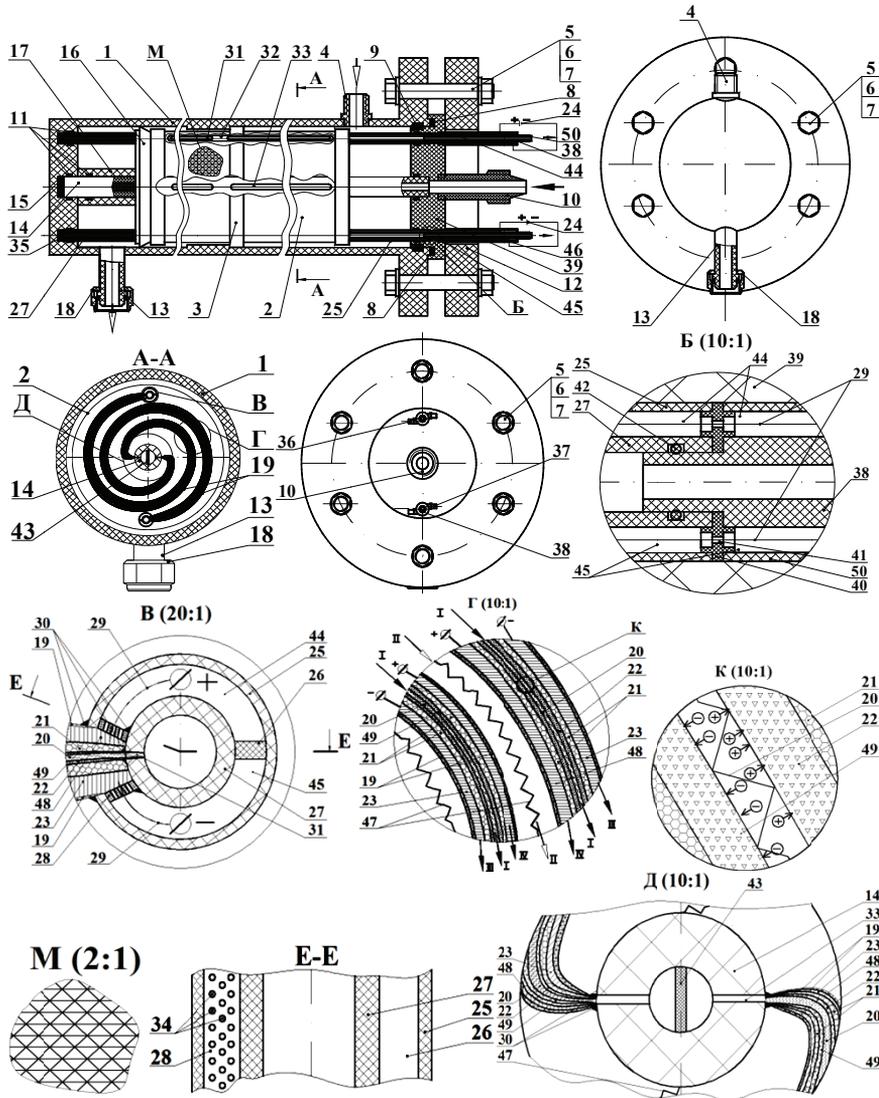


Рис. 2. Конструкция электробаромембранного аппарата рулонного типа

На рисунке 1 представлено наглядное изображение разработанного электробаромембранного аппарата, который обеспечивает решение нескольких существенных для этой области знаний технических результатов:

- 1) повышает качество и эффективность разделения растворов;
- 2) улучшает охлаждение прикатодного, прианодного пермеата;
- 3) обеспечивает простоту и удобство обслуживания и замены рулонного элемента (монтажа).

Аналогом данной конструкции является баромембранный аппарат рулонного типа, рассмотренный в работе [1], а прототипом – приведенный в патенте [2]. Выбранный прототип [2] относится к наиболее близкому варианту разрабатываемого аппарата. Следует отметить и другие перспективные конструкции устройств, основанных на данных принципах разделения, указав, тем не менее, на достоинство представленной в этой работе конструкции, обеспечивающей полноразмерную унификацию по рулонному элементу.

Существуют устройства, обеспечивающие положительные технические результаты. Например, аппарат, рассмотренный в работе [3], предназначен для повышения качества и эффективности разделения растворов, увеличения площади мембран в единице объема аппарата и улучшения охлаждения пермеата. Устройство, предложенное в работе [4], обеспечивает увеличение площади для очистки растворов и повышения качества их разделения при осуществлении охлаждения пермеата за счет изменения конструкции аппарата. Приведенные аппараты с представленными достоинствами их возможного применения не обладают принципом унификации. Имеющиеся в настоящее время аппараты подобного типа, основанные на данных принципах разделения, в литературе встречаются редко или используются только как баромембранные.

Аппарат, приведенный на рис. 1, 2, работает следующим образом. Раствор (см. рис. 2) под избыточным давлением подается через штуцер подачи исходного раствора 10, далее через сквозную проточку в центре крышки 39, под перфорированную трубку 14, разделенную на две секции одинакового объема по всей длине вертикальной перегородкой 43, прокачивается и через эллиптические проточки 33 поступает в пространство, где расположена сетка-турбулизатор 20, по разные стороны от которой находятся прианодные 49 и прикатодные 22 мембраны, образующие межмембранный канал. По всей длине канала циркулирует раствор, поступающий по эллиптической малой щели 31 в полость внутренней трубки 27 и далее отводится по внутреннему пространству штуцера для отвода ретентата 38.

В этот же момент времени к дренажным сеткам, являющимся катодом 23 и анодом 48, включением устройства для подвода электрического тока 24 через электрические провода 29, соединенные через герметизирующую заливку 46 внешней отводной трубки 50, проходящие через коллекторы для отвода прианодного 44 и прикатодного 45 пермеата, отверстия 41 в фиксирующей прокладке 40, затем между неперфорированной перегородкой 26, внешней 25 и внутренней 27 трубками и полимерными перфорированными перегородками 28 через отверстия 34 к аппарату подводится внешнее постоянное электрическое поле с заданной плотностью тока.

Раствор, двигаясь, турбулизуется при помощи сетки-турбулизатора 20, установленной в межмембранном канале около поверхности прианодных 49 и прикатодных 22 мембран, в зависимости от схемы подключения дренажных сеток, являющихся анодом 48 и катодом 23.

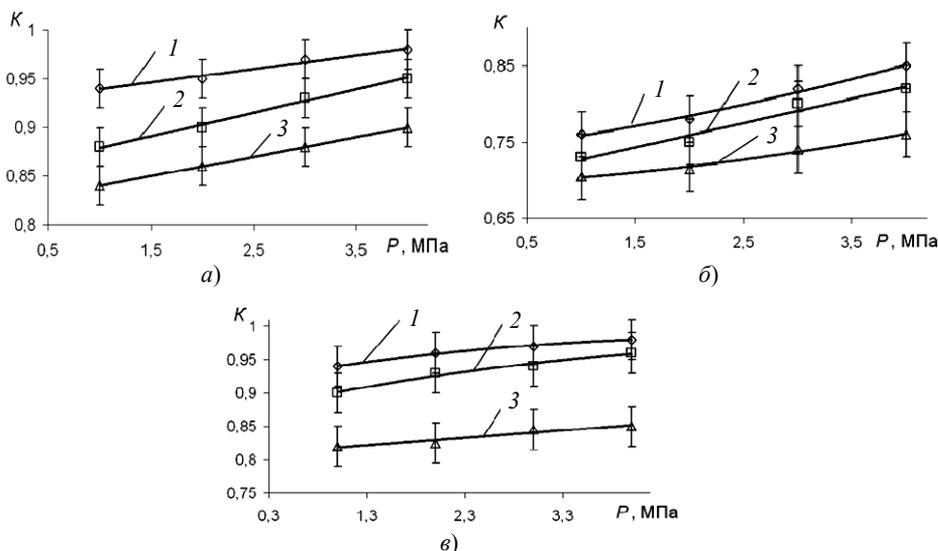
В межмембранном канале, растворенное в исходном растворе вещество диссоциирует на анионы и катионы, которые под действием электрического тока и градиента давления проникают совместно с растворителем сквозь поры прианодных 49 и прикатодных 22 мембран и подложки мембран 21, попадая в пространство, где расположены дренажные сетки, являющиеся анодом 48 и катодом 23 в зависимости от схемы подключения электродов «плюс» или «минус» соответственно.

Полученный таким образом прианодный и прикатодный пермеат самотеком отводится через отверстия 34 в полимерной перфорированной перегородке 28, на которую уложены концы дренажных сеток, попадая в коллекторы для отвода прианодного 44 и прикатодного 45 пермеата. Далее через отверстия 41 фиксирующей прокладки 40 по продолжающимся коллекторам для отвода прианодного 44 и прикатодного 45 пермеата выводится через штуцера для отвода прианодного 37 и прикатодного 36 пермеата в виде кислот и оснований соответственно.

Одновременно с подачей исходного раствора, через штуцера для ввода 4 и вывода 13 охлаждающей воды, расположенные от горизонтальной оси в сечении под углами  $\pi/2$  и  $3\pi/2$  соответственно, а от торцевых поверхностей корпуса аппарата 1, глухой и разъемной, на расстоянии 95 мм от края, заполняется коллектор для протекания охлаждающей воды, образованный между корпусом аппарата 1, изготовленным в виде цилиндрической обечайки, одна из торцевых поверхностей которого глухая, непористой пленкой 19, имеющей насечки, углубленные в половину от ее толщины, составляющих по форме равносторонние треугольники из прямолинейных отрезков, внешних трубок 25, перфорированной трубки 14 и крышки 39. Исходный раствор, протекая по всему межмембранному каналу, где расположена сетка-турбулизатор 20, очищается от катионов и анионов, попадая через эллиптические малые щели 31 в полость внутренней трубки 27 и штуцера 38 для отвода ретентата.

На разработанной конструкции электробаромембранного аппарата рулонного типа без наложения электрического поля можно проводить баромембранные процессы, например гипер-, ультра-, нано-, микрофльтрации.

Представленное конструктивное оформление нового аппарата может использоваться, например, для модернизации схемы очистки сточных вод гальванических производств от растворенных катионов и анионов неорганических веществ, содержащихся в сточных водах, прошедших предварительную процедуру очистки от механических и коллоидных загрязнений.



**Рис. 3. Зависимости коэффициента задержания мембраны МГА-95 от рабочего давления при разделении водных растворов сульфатов олова (а), железа (б) и цинка (в):**

$1 - c_{исх} = 0,5 \text{ кг/м}^3$ ;  $2 - c_{исх} = 1,0 \text{ кг/м}^3$ ;  $3 - c_{исх} = 2,0 \text{ кг/м}^3$

Показательный пример использования рулонного элемента, оснащенного мембраной МГА-95 для разделения сульфатсодержащих растворов при оценке производительности аппарата и задерживающей способности, представлен в работе [5]. Однако зависимости коэффициента задержания от рабочего давления, представленные на рис. 3, в [5] не рассмотрены. В качестве модельных растворов с постоянной температурой  $T = 295$  К использовались водные растворы сульфатов олова, железа и цинка.

Коэффициент задержания веществ мембраной рассчитывается по формуле

$$R = 1 - c_{\text{пер}}/c_{\text{исх}}, \quad (1)$$

где  $c_{\text{пер}}$ ,  $c_{\text{исх}}$  – концентрации растворенного вещества в пермеате и исходном растворе соответственно, кг/м<sup>3</sup>.

Анализируя зависимости коэффициента задержания от рабочего давления (см. рис. 3), для данных растворов и мембраны, отмечается, что с ростом давления данный коэффициент увеличивается, так как происходит уплотнение структуры мембраны при возрастании избыточного давления над мембраной при одинаковых гидродинамических условиях протекания раствора над поверхностью мембран. Расхождения в величинах коэффициентов задержания от градиента рабочего давления для водных растворов сульфатов железа, олова и цинка могут быть связаны с различным видом взаимодействия растворителя и растворенного вещества, растворителя и мембраны (различия в смачиваемости мембраны), растворенного вещества и мембраны [5, 6].

В статье рассмотрена перспективная конструкция электробаромембранного аппарата рулонного типа и приведен ее принцип действия. Отмечено, что, при сравнении с ранними аналогами, данная конструкция универсальна и может применяться при использовании стандартных по геометрическим характеристикам рулонных элементов.

#### *Список литературы*

1. Дыгнерский, Ю. И. Баромембранные процессы / Ю. И. Дыгнерский. – М. : Химия, 1986. – 272 с.
2. Пат. 2487746 Российская Федерация, МПК В01Д 61/42. Электробаромембранный аппарат рулонного типа / С. В. Ковалев, С. И. Лазарев, К. С. Лазарев, О. А. Соломина ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО ТГТУ. – № 2012122794/05 ; заявл. 01.06.2012 ; опубл. 20.07.2013, Бюл. № 20. – 15 с.
3. Пат. 2522882 Российская Федерация, МПК В01Д 61/42. Электробаромембранный аппарат рулонного типа / С. В. Ковалев, С. И. Лазарев, О. А. Абоносимов, О. А. Соломина, К. С. Лазарев ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО ТГТУ. – № 2013117190/05; заявл. 15.04.2013 ; опубл. 20.07.2014, Бюл. № 20. – 17 с.
4. Пат. 2553859 Российская Федерация, МПК В01Д 61/42, В01Д 63/10. Электробаромембранный аппарат рулонного типа / С. В. Ковалев, С. И. Лазарев ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО ТГТУ. – № 2014109534/05 ; заявл. 12.03.2014 ; опубл. 20.06.2015, Бюл. № 17. – 18 с.
5. Лазарев, К. С. Исследование кинетических коэффициентов обратноосмотического разделения растворов на мембранах МГА-95, МГА-100, ОПМ-К / К. С. Лазарев, С. В. Ковалев, А. А. Арзамасцев // Вестник Тамб. гос. техн. ун-та. – 2011. – Т. 17, № 3. – С. 726 – 734.
6. Акулинчев, А. М. Исследование электробаромембранного разделения промышленных технологических растворов, содержащих ионы тяжелых металлов Pb, Ca, Fe / А. М. Акулинчев, О. А. Абоносимов, С. И. Лазарев // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2017. – Т. 23, № 1. – С. 120 – 128.

## Improvement of Design and Research into a Roll-Type Electrobaromembrane Apparatus of for Separation of Process Solutions

S. I. Lazarev<sup>1</sup>, S. V. Kovalev<sup>1</sup>, D. N. Kononov<sup>1</sup>,  
M. A. Kuznetsov<sup>1</sup>, V. M. Polikarpov<sup>1</sup>, A. A. Arzamastsev<sup>2</sup>

*Department of Applied Geometry and Computer Graphics (1), TSTU;  
department of Mathematical Modeling and Information Technologies (2),  
G. R. Derzhavin Tambov State University, Tambov, Russia;  
geometry@mail.nnn.tstu.ru*

**Keywords:** membrane; separation; solution; electrobaromembrane processes.

**Abstract:** The design of a roll-type electrobaromembrane apparatus is presented; it allows extraction of cations and anions of substances in streams of the cathode and anode permeate. On the basis of the design features of the roll-type electrobaromembrane device, it was found that the device can operate under the action of several driving forces (pressure drop before and after the membrane and the difference in electrical potentials). Using the conducted literary studies, it is noted that the developed device can be used in wastewater treatment of electroplating plants.

### References

1. Dytneriskiy Yu.I. *Baromembrannyye protsessy* [Baromembrane processes], Moscow: Khimiya, 1986, 272 p. (In Russ.)
2. Kovalev S.V., Lazarev S.I., Lazarev K.S., Solomina O.A. *Elektrobaromembrannyy apparat rulonnogo tipa* [Electrobaromembrane Apparatus of Rolled Type], Russian Federation, 2013, Pat. 2487746. (In Russ.)
3. Kovalev S.V., Lazarev S.I., Abonosimov O.A., Solomina O.A., Lazarev K.S. *Elektrobaromembrannyy apparat rulonnogo tipa* [Electrobaromembrane Apparatus of Rolled Type], Russian Federation, 2014, Pat. 2522882. (In Russ.)
4. Kovalev S.V., Lazarev S.I. *Elektrobaromembrannyy apparat rulonnogo tipa* [Electrobaromembrane Apparatus of Rolled Type], Russian Federation, 2015, Pat. 2553859. (In Russ.)
5. Lazarev K.S., Kovalev S.V., Arzamastsev A.A. [Investigation of the Kinetic Coefficients of the Reverse Osmosis Separation of Solutions on the Membranes MGA-95, MGA-100, OPM-K], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2011, vol. 17, no. 3, pp. 726-734. (In Russ., abstract in Eng.)
6. Akulinchev A.M., Abonosimov O.A., Lazarev S.I. [Investigation of Electro-Membrane Separation of Industrial Technological Solutions Containing Ions of Heavy Metals Pb, Ca, Fe], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2017, vol. 23, no. 1, pp. 120-128. (In Russ., abstract in Eng.)

---

## Verbesserung der Konstruktion und Forschung des Elektrobarmembranapparats der Roll-Typ Maschine für Trennung der technologischen Lösungen

**Zusammenfassung:** Es ist die Konstruktion eines Elektrobarmembranapparats der Roll-Typ Maschine vorgestellt, die es ermöglicht, Kationen und Anionen von Substanzen in Strömen des Kathoden- und Anodenpermeats zu extrahieren. Auf der Grundlage der konstruktiven Merkmale des Elektrobarmembranapparats der Roll-Typ

Maschine wurde festgestellt, dass die Vorrichtung unter der Einwirkung mehrerer Antriebskräfte arbeiten kann (Druckabfall vor und nach der Membran und Differenz der elektrischen Potentiale). Aufgrund der durchgeführten Literaturstudien wurde festgestellt, dass das entwickelte Gerät in Abwasserbehandlungsschemata von galvanischen Produktionen verwendet werden kann.

---

### **Perfectionnement de la construction et de l'étude de la machine de formage de rouleaux du type électrobaromembrane pour la séparation des systèmes technologiques**

**Résumé:** Est présentée la construction de l'appareil du type bobine électrique ce qui permet d'extraire les cations et les anions de substances dans les flux de perméat de pricatode et de prianode. A la base des caractéristiques de la conception de l'appareil à tambour électrique, il est établi que l'appareil peut fonctionner avec l'action de plusieurs forces motrices (différence de pression avant et après la membrane et différence de potentiel électrique). A la base de l'études des sources littéraires, est noté que le dispositif élaboré peut être utilisé dans les systèmes du traitement des eaux usées des productions galvaniques.

---

**Авторы:** *Лазарев Сергей Иванович* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Прикладная геометрия и компьютерная графика»; *Ковалев Сергей Владимирович* – доктор технических наук, доцент кафедры «Прикладная геометрия и компьютерная графика»; *Коновалов Дмитрий Николаевич* – аспирант кафедры «Прикладная геометрия и компьютерная графика»; *Кузнецов Михаил Александрович* – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Прикладная геометрия и компьютерная графика»; *Поликарпов Валерий Михайлович* – доктор химических наук, профессор кафедры «Прикладная геометрия и компьютерная графика»; *Арзамасцев Александр Анатольевич* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой математического моделирования и информационных технологий, ФГБОУ ВО «ТГУ им. Г. Р. Державина», г. Тамбов, Россия.

**Рецензент:** *Абоносимов Олег Аркадьевич* – доктор технических наук, доцент кафедры «Прикладная геометрия и компьютерная графика», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.