

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НОВОГО МЕМБРАННОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПРИ СОЗДАНИИ МАЛООТХОДНЫХ И БЕЗОТХОДНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

**Б.А. Лобасенко, Д.М. Бородулин, Р.В. Котляров, Е.К. Сазонова,  
А.В. Шафрай**

**Кемеровский государственный университет**

Рассмотрено использование мембранных технологий в промышленности. Проводится оценка мембранных аппаратов с отводом диффузионного пограничного слоя. Анализируются методы математического моделирования, позволяющие описывать мембранные процессы. Разработана методика моделирования на основе передаточных функций, учитывающая влияние наиболее значительных возмущающих воздействий на изучаемый объект, а также предложена передаточная функция в общем виде. Разработаны методики расчета мембранных установок периодического и непрерывного действия различных типов. Данная методика и ее программная реализация оптимизируют расчеты основных показателей работы мембранного оборудования и позволяют определять рациональную аппаратную схему компоновки мембранных аппаратов с целью максимального извлечения целевых компонентов из сырья и снижения его содержания в сточных водах предприятия.

*Ключевые слова: мембранные аппараты, диффузионный пограничный слой, математическое моделирование, передаточные функции, схемы установок*

## The Use of New Membrane Equipment When Creating Low-Waste and Non-Waste Technologies

**B.A. Lobasenko, D.M. Borodulin, R.V. Kotlyarov, E.K. Sazonova, A.V. Shaffray**

**Kemerovo State University, 650000 Kemerovo, Russia**

The use of membrane technologies in industry is considered. The membrane apparatus with the removal of the diffusion boundary layer is evaluated. The methods of mathematical modeling are analyzed, allowing to describe membrane processes. A modeling technique based on transfer functions that takes into account the influence of the most significant disturbing effects on the object under study is developed, and a transfer function in general is proposed. The methods of calculation of membrane installations of periodic and continuous action of various types are presented. The developed methodology and its software implementation optimizes the calculations of the main performance indicators of membrane equipment and allows you to determine a rational hardware layout diagram of membrane devices in order to maximize the extraction of target components from raw materials and reduce its content in the wastewater of the enterprise.

*Key words: membrane devices, diffusion boundary layer, mathematical modeling, transfer functions, setup schemes*

DOI: 10.18412/1816-0395-2019-10-4-9

**И**спользование мембранных методов позволяет снизить отходы производства и создает предпосылки для организации малоотходных технологий при получении продукции различного назначения. Это позволяет минимизировать образование сточных вод

и снизить экологический ущерб от их выбросов в окружающую среду. Поэтому эти методы находят широкое применение в различных отраслях промышленности. При этом их можно использовать как по отдельности, так и в сочетании друг с другом [1–3].

Особенно актуально использование мембранных методов в промышленно развитых регионах, к которым относится Кузбасс. Их можно применять как на стадии получения готовых продуктов, так и на стадии очистки сточных вод, а иногда и в первом, и во втором случаях.

Несмотря на перспективность мембранных методов и технологий, в промышленности их используют недостаточно широко. На это, в первую очередь, влияет невысокая производительность мембранного оборудования. Чаще всего это происходит за счет образования диффузионного слоя на поверхности мембраны, который увеличивает гидравлическое сопротивление и приводит к уменьшению проницаемости.

Более широкому внедрению мембранных технологий будет способствовать новое, более современное аппаратное оформление.

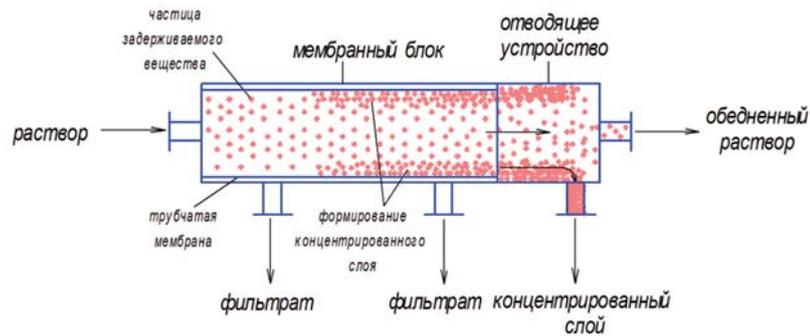
### **Разработка мембранного оборудования**

Одним из перспективных направлений является разработка мембранного оборудования, использующего отвод части диффузионного слоя, образующегося на мембране [4].

К настоящему времени создано три группы конструкций, в которых:

- производится отвод части диффузионного слоя;
- наряду с отводом диффузионного слоя осуществляется периодическая очистка мембраны;
- одновременно с отводом диффузионного слоя осуществляется постоянная очистка мембраны.

На рис. 1 представлена схема работы мембранного аппарата с отводом диффузионного слоя. Суть его работы сводится к следующему. В процессе мембранного разделения на поверхности мембраны образуется диффузионный пограничный слой, который движется по поверхности мембраны. Попадая в отводящее устройство, он отделяется от обедненного потока. Таким образом, на выходе из мембранного аппарата образуются три потока:



**Рис. 1. Схема мембранного аппарата с отводящим устройством**  
**Fig. 1. Diagram of a membrane apparatus with a diverting device**

фильтрат, обедненный поток и более концентрированный диффузионный слой.

Для организации малоотходного и безотходного производства целесообразно комбинировать мембранные аппараты в установки таким образом, чтобы обеспечить минимальную степень образования сточных вод. При этом с экономической точки зрения необходимо использовать наименьшее количество единиц оборудования, т.е. площадь фильтрующих элементов должна быть минимальной. Это достигается с использованием алгоритма, который включает следующую последовательность действий:

- анализируются исходные данные и качественные показатели конечного продукта (по органолептическим и физико-химическим характеристикам);
- производится предварительный выбор мембран, которые по своим показателям могут быть использованы;
- проводятся экспериментальные исследования мембран, оценивается их проницаемость и селективность по задерживаемым веществам, принимается окончательное решение по выбору соответствующего типа мембран (материал и размер пор);
- на основе экспериментальных исследований разрабатывается математическая модель процесса разделения

(концентрирования) в мембранных аппаратах с отводом диффузионного слоя;

- на основе математической модели осуществляется разработка структурной схемы мембранной установки (периодического или непрерывного действия), основным критерием работы которой является получение заданных (выходных) параметров при минимальной площади поверхности;

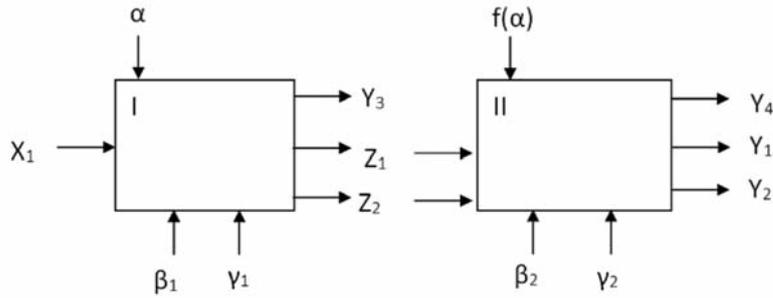
- на основе полученных результатов создается опытно-промышленная установка, проводятся экспериментальные исследования, отрабатываются технологические, режимные и конструктивные параметры.

Анализ показывает, что наиболее трудоемкими являются последние три этапа, поэтому остановимся на них более подробно.

### **Моделирование мембранных процессов**

При моделировании процессов наибольшее распространение получили методы аналитического исследования, осуществляемые посредством составления дифференциальных уравнений, описывающих те или иные процессы, математической статистики и кибернетического подхода, реализуемого на основе механизма передаточных функций [5].

Аналитические исследования мембранных процессов



**Рис. 2. Структурная схема мембранного аппарата с отводом диффузионного пограничного слоя:**

I – мембранный блок; II – отводящее устройство; *входные сигналы:*  $X_1$  – содержание задерживаемых веществ в концентрируемой среде ( $C_{вк}$ ); *возмущающие сигналы:*  $\alpha$  – технологические параметры;  $\beta_1$  – конструктивные параметры мембранного блока;  $\beta_2$  – конструктивные параметры отводящего устройства;  $\gamma_1$  – режимные параметры мембранного модуля,  $\gamma_2$  – режимные параметры отводящего устройства; *промежуточные сигналы:*  $Z_1$  – концентрация задерживаемых веществ в концентрате ( $C_k$ );  $Z_2$  – расход концентрата ( $F_c$ ); *выходные сигналы:*  $Y_1$  – содержание задерживаемых веществ в отводимом слое ( $C_{от}$ );  $Y_2$  – производительность по отводимому слою ( $F_{от}$ );  $Y_3$  – производительность по фильтрату ( $F_{ф.н}$ );  $Y_4$  – производительность по обедненному потоку ( $F_{об.н}$ )

**Fig. 2. The structural diagram of the membrane apparatus with the removal of the diffusion boundary layer:**

I – membrane block; II – outlet device; *input signals:*  $X_1$  – the content of trapped substances in a concentrated medium ( $C_{вк}$ ); *disturbing signals:*  $\alpha$  – technological parameters;  $\beta_1$  – structural parameters of the membrane block;  $\beta_2$  – design parameters of the outlet device;  $\gamma_1$  – operating parameters of the membrane module,  $\gamma_2$  – operating parameters of the diverting device; *intermediate signals:*  $Z_1$  – concentration of trapped substances in the concentrate ( $C_k$ );  $Z_2$  – concentrate consumption ( $C_c$ ); *output signals:*  $Y_1$  is the content of trapped substances in the discharge layer (ATP);  $Y_2$  – productivity on the allocated layer ( $F_{от}$ );  $Y_3$  – filtrate capacity ( $F_c$ ),  $Y_4$  – depleted flow rate ( $F_{об.н}$ )

позволяют создавать системы дифференциальных уравнений, описывающих их. Эти уравнения наиболее точно отражает природу процессов, их поведение, структуру и свойства, т.е. полностью отражают теорию их работы. Такие теоретические модели являются наилучшими с точки зрения прогнозирования результатов технологических процессов. Но создание таких моделей достаточно трудоемко, требует фундаментальных теоретических знаний того или иного процесса. К сожалению, не все технологические процессы имеют такую научную базу.

Помимо трудностей при составлении теоретических моделей, существуют сложности их анализа. Проанализировать дифференциальную модель низких порядков (1-го и 2-го) достаточно просто, а анализ моделей высоких порядков представляет большую сложность и зачастую возможен лишь численными мето-

дами. Поэтому в случаях, когда не требуется вникать в природу технологического процесса, а нужно лишь составить его прогноз, вполне допустимо использование других методов математического моделирования.

Одними из самых распространенных методов выявления зависимостей в объектах и составления прогнозов их работы являются методы математической статистики. Они позволяют на основе экспериментальных данных составить эмпирические стохастические модели. Эти модели дают результат с удовлетворительной точностью.

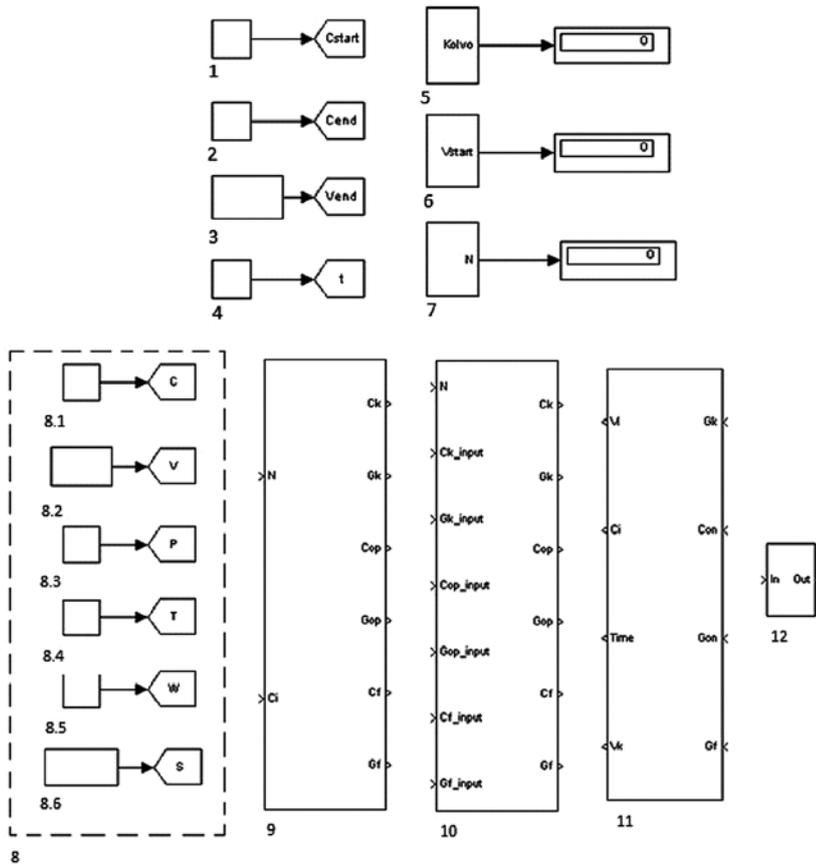
Недостатком данного вида моделирования является сильная привязанность к экспериментальным данным, что допускает большую вероятность ошибок, которую можно сделать при проведении экспериментов.

Методом математического моделирования, которому в наименьшей степени прису-

щи вышеперечисленные недостатки, является кибернетический подход. Кибернетический подход в сочетании с системным подходом позволяет представить технологический процесс как систему, которая функционирует по своим законам и принципам. Структура же системы представляет собой так называемый "черный ящик". Она помогает изучать поведение систем, т.е. ее реакции на различные внешние воздействия, абстрагируясь от их внутреннего устройства. Многие системы оказываются настолько сложными, что, даже имея полную информацию о состоянии их элементов, практически невозможно связать ее с поведением системы в целом. В подобных случаях представление такой сложной системы в виде некоторого "черного ящика", функционирующего аналогичным образом, облегчает построение упрощенной модели. Анализируя поведение модели и сравнивая его с поведением системы, можно сделать ряд выводов о свойствах самой системы.

Немаловажным фактором использования этого подхода является возможность проведения комплексной автоматизации процесса, включая использование обратной связи. Это позволяет влиять на работу рабочих органов, обеспечивающих работу оборудования, с целью оптимизации процесса.

Применительно к аппаратам нового типа, описанным выше, разработана методика моделирования на основе передаточных функций. По причине того, что все мембранные аппараты с отводом диффузионного пограничного слоя представляют собой совокупность мембранного модуля и отводящего устройства, для них предложена информационная (структурная)



**Рис. 3. Схема расчета мембранной установки периодического действия:**

1, 2 – исходная и конечная концентрации среды, % по массе; 3 – конечный объем концентрата, м<sup>3</sup>; 4 – требуемое время проведения процесса, ч; 5 – количество этапов (циклов) процесса концентрирования; 6 – исходный объем сырья, м<sup>3</sup>; 7 – количество мембран; 8 – блок технологических и конструктивных параметров (8.1 – начальная концентрация, 8.2 – начальный объем, 8.3 – давление, 8.4 – температура, 8.5 – скорость основного потока, 8.6 – площадь мембраны); 9 – начальный блок установки (в модели только один); 10 – блоки установки (выбираются произвольно в зависимости от площади установки); 11 – модель резервуара с исходным раствором (в модели только один); 12 – модель резервуара для сбора концентрата

**Fig. 3. The calculation scheme of the membrane installation of periodic action:**

1, 2 – the initial and final concentration of the medium, % by weight; 3 – final volume of concentrate, m<sup>3</sup>; 4 – the required time for the process, h; 5 – the number of stages (cycles) of the concentration process; 6 – initial volume of raw materials, m<sup>3</sup>; 7 – the number of membranes; 8 – a block of technological and design parameters (8.1 – initial concentration, 8.2 – initial volume, 8.3 – pressure, 8.4 – temperature, 8.5 – main flow velocity, 8.6 – membrane area); 9 – the initial unit of installation (in the model there is only one); 10 – installation blocks (randomly selected depending on the installation area); 11 – model of the reservoir with the initial solution (in the model there is only one); 12 – model of the tank for collecting concentrate

схема (рис. 2), включающая мембранный модуль и отводящее устройство.

Для построения математической модели для приведенной схемы она была логически разделена на составляющие части, для которых были подобраны передаточные функции. Затем полученные функции были последовательно объединены в соответствии с логикой описываемой системы. Таким образом, полученная модель учитывает влияние всех указанных выше возмущающих воздействий на изучаемый объект.

Передаточная функция в общем виде может быть представлена следующим образом:

$$\begin{aligned}
 Y_i(S) = & X_i(S) \cdot W_{X1-Z1}(S) \cdot W_{Z1-Y1}(S) \cdot W_{X1-Z2}(S) \cdot W_{Z2-Y1}(S) + \sum_{i=1}^n \alpha_i(S) \cdot \\
 & \cdot W_{\alpha i-Z1}(S) \cdot W_{Z1-Y1}(S) \cdot W_{\alpha i-Z2}(S) \cdot W_{Z2-Y1}(S) + \sum_{i=1}^m \beta_i(S) \cdot W_{\beta i-Z1}(S) \cdot W_{Z1-Y1}(S) \cdot W_{\beta i-Z2}(S) \cdot W_{Z2-Y1}(S) + \sum_{i=1}^m \beta_{2i}(S) \cdot W_{\beta_{2i}-Y1}(S) + \\
 & + \sum_{i=1}^l \gamma_i(S) \cdot W_{\gamma i-Z1}(S) \cdot W_{Z1-Y1}(S) \cdot W_{\gamma i-Z2}(S) \cdot W_{Z2-Y1}(S) + \sum_{i=1}^l \gamma_{2i}(S) \cdot W_{\gamma_{2i}-Y1}(S).
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

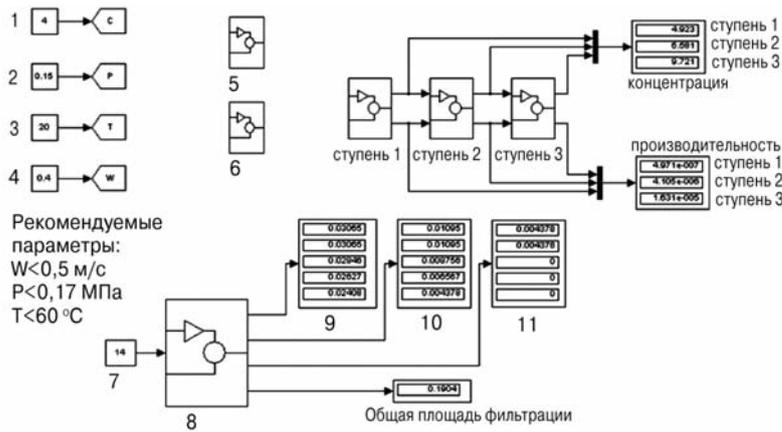
Передаточная функция в выражении (1), как правило, представляет собой передаточные функции апериодических звеньев невысокого порядка. Числитель таких передаточных функций представляет собой коэффициент усиления  $k$  и характеризует усилительные свойства звена. Знаменатель содержит полином нулевого, первого или второго порядков и описывает инерционные свойства объекта, которые определяются конструкцией и особенностями мембранного аппарата.

Коэффициент  $k$  можно рассматривать как коэффициент извлечения целевого продукта. Если говорить о

диффузионном слое, то  $k > 1$ , что говорит об увеличении содержания в нем целевого продукта по сравнению с исходным сырьем. Если говорить о фильтрате, то значение коэффициента  $0 < k < 1$ . Чем ближе значение  $k$  к 0, тем лучше извлекается целевой компонент из сырья и тем меньшее его количество попадает в сточные воды предприятия. Коэффициент извлечения может быть положен в основу анализа эффективности работы мембранного оборудования.

### Расчет мембранных установок

На основе полученной модели процесса концентрирования в мембранном аппарате, моделей резервуаров для исходного раствора и сбора концентрата может быть реализована методика расчета установок периодического действия. Расчет включает два этапа. На первом этапе исход-



**Рис. 4. Схема расчета мембранной установки непрерывного действия с последовательным движением обедненного раствора:**

1 – концентрация растворенных веществ в исходном растворе; 2 – блок задания давления; 3 – блок задания температуры; 4 – блок задания скорости исходного раствора; 5 – блок задания площади мембранных модулей каждой ступени; 6 – блок наличия модулей в ступени, искусственно ограничивающий количество модулей (блоков) в ступени; 7 – количество мембранных модулей в основном блоке первой ступени установки; 8 – блок, используемый для расчета площадей фильтрации каждой ступени установки, скоростей движения среды в канале мембраны; 9–11 – площади фильтрации каждого блока ступеней установки 1, 2, 3 соответственно

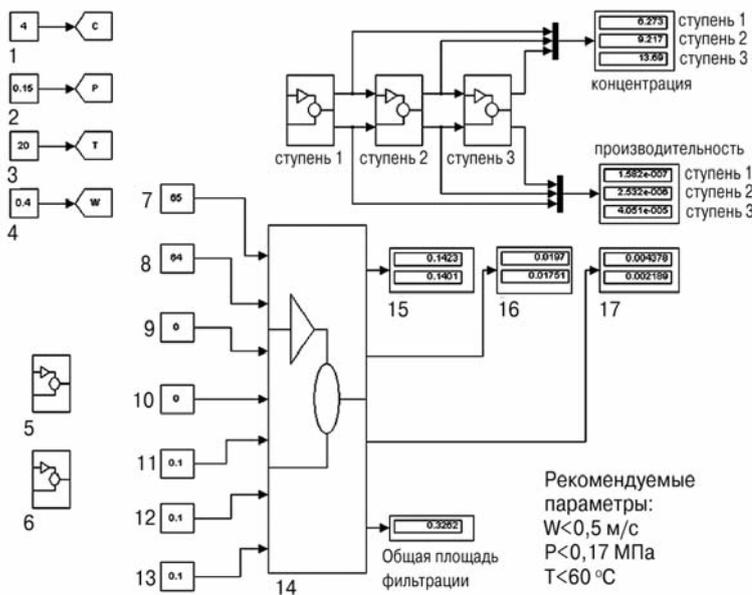
**Fig. 4. The calculation scheme of the membrane installation of continuous operation with the sequential movement of the lean solution:**

1 – the concentration of dissolved substances in the initial solution; 2 – pressure setting unit; 3 – temperature setting unit; 4 – unit for setting the speed of the initial solution; 5 – block setting the area of the membrane modules of each stage; 6 – block the presence of modules in the stage, artificially limiting the number of modules (blocks) in the stage; 7 – the number of membrane modules in the main unit of the first stage of installation; 8 – block used to calculate the filtering area of each stage of the installation, the velocity of the medium in the channel of the membrane; 9–11 – filtration area of each block of installation steps 1, 2, 3, respectively

ными данными являются исходная и конечная концентрация среды, конечный объем концентрата, требуемое время проведения процесса. В результате определяются такие показатели, как количество циклов процесса концентрирования, исходный объем сырья, площадь мембран.

На втором этапе мембраны распределяют по ступеням (в зависимости от площади, занимаемой установкой) и проводят уточняющий расчет, в частности при изменении технологических режимов процесса.

Методика расчета может быть реализована в системе MatLAB средствами приложения Simulink (рис. 3). Мембранная установка включает в себя две последовательно соединенных ступени, каждая из которых содержит семь мембранных модулей с отводом диффузионного слоя. В состав установки входят резервуары для исходного раствора и концентрата. Установка относится к установкам периодиче-



**Рис. 5. Схема расчета мембранной установки непрерывного действия с циркуляцией обедненного раствора:**

1 – концентрации растворенных веществ в исходном растворе; 2 – блок задания давления; 3 – блок задания температуры; 4 – блок задания скорости исходного раствора; 5 – блок задания площади мембранных модулей каждой ступени; 6 – блок наличия модулей в ступени, искусственно ограничивающий количество модулей (блоков) в ступени; 7 – количество мембранных модулей в основном блоке первой ступени установки; 8–10 – количество мембранных модулей в циркуляционном аппарате каждой ступени; 11–13 – соотношение рециркуляции, устанавливающее долю присутствия обедненного раствора какой-либо ступени в ее исходном растворе; 14 – блок, используемый для расчета площадей фильтрации каждой ступени установки, скоростей движения среды в канале мембраны; 15–17 – площади фильтрации каждого блока каждой ступени установки

**Fig. 5. The calculation scheme of the membrane installation of continuous operation with the circulation of the lean solution:**  
1 – the concentration of dissolved substances in the initial solution; 2 – pressure setting unit; 3 – temperature setting unit; 4 – unit for setting the speed of the initial solution; 5 – block setting the area of the membrane modules of each stage; 6 – block the presence of modules in the stage, artificially limiting the number of modules (blocks) in the stage; 7 – the number of membrane modules in the main unit of the first stage of installation; 8–10 – the number of membrane modules in the circulation apparatus of each stage; 11–13 – the recycle ratio, which establishes the proportion of the presence of a depleted solution of any step in its initial solution; 14 – block used to calculate the filtering area of each stage of the installation, the velocity of the medium in the channel of the membrane; 15–17 – filtering area of each block of each installation stage

ского действия с циркуляцией всего раствора.

На рис. 4 представлена схема расчета мембранной установки непрерывного действия, в которой исходный раствор подается только на основной аппарат первой ступени. При этом обедненный раствор отводится на следующий аппарат ступени, а концентрат — на следующую ступень концентрирования.

На рис. 5 представлена схема расчета мембранной установки непрерывного действия, в которой исходный раствор подается в основной и циркуляционный аппараты первой ступени одновременно. Концентрат первой ступе-

ни поступает в основной и циркуляционный аппараты второй ступени и т.д.

Предложенная методика и ее программная реализация оптимизируют расчеты основных показателей работы мембранного оборудования и позволяют на основе анализа полученных данных определить рациональную аппаратную схему компоновки мембранных модулей с точки зрения максимального извлечения целевых компонентов из сырья и снижения его содержания в сточных водах предприятия.

### Заключение

Разработано мембранное оборудование с отводом диффу-

зионного пограничного слоя, которое по производительности превосходит типовое (с отводом фильтрата). Предложено математическое моделирование его работы с использованием передаточных функций. На основе полученной модели предложена методика расчета установок периодического и непрерывного действия и их рациональная компоновка, под которой понимается максимальное извлечение целевых компонентов из сырья и снижение его содержания в сточных водах при минимальном количестве используемого оборудования, что создает основу для реализации малоотходных и безотходных технологий.

### Литература

1. Zhang Jianlin, Yu Hongtao, Quan Xie et al. Ceramic membrane separation coupled with catalytic ozonation for tertiary treatment of dyestuff wastewater in a pilot-scale study. *Chemical Engineering Journal*. 2016. V. 301. P. 19–26.
2. Zsirai T., Qiblawey H., Buzatu P. et al. Cleaning of ceramic membranes for produced water filtration. *Journal of petroleum science and engineering*. 2018. V. 166. P. 283–289.
3. Castro-Munoz Roberto, Barragan-Huerta Blanca E., Fila Vlastimil et al. Current Role of Membrane Technology: From the Treatment of Agro-Industrial by-Products up to the Valorization of Valuable Compounds. *Waste and Biomass Valorization*. 2018. V. 9 (4). P. 513–529.
4. Lobasenko B.A., Semenov A.G. Intensification of ultrafiltration concentrating by the separation of the concentration boundary layer. *Food and Raw Materials*. 2013. № 1. P. 74–81.
5. Felix Alexander, Herdegen Volker, Haseneder Roland et al. Investigations on the behaviour of ceramic micro- and mesoporous membranes at hydrothermal conditions. *Separation and Purification Technology*. 2015. V. 148. P. 85–93.
6. Das Bipul, Chakrabarty Bandana, Barkakati Pranab. Separation of oil from oily wastewater using low cost ceramic membrane. *Korean Journal of Chemical Engineering*. 2017. V. 34 (10). P. 2559–2569.
7. Rodriguez-Narvaez, Oscar M., Manuel Peralta-Hernandez Juan, Goonetilleke Ashantha et al. Treatment technologies for emerging contaminants in water: A review. *Chemical Engineering Journal*. 2017. V.323. P. 361–380.

### References

1. Zhang Jianlin, Yu Hongtao, Quan Xie et al. Ceramic membrane separation coupled with catalytic ozonation for tertiary treatment of dyestuff wastewater in a pilot-scale study. *Chemical Engineering Journal*. 2016. V. 301. P. 19–26.
2. Zsirai T., Qiblawey H., Buzatu P. et al. Cleaning of ceramic membranes for produced water filtration. *Journal of petroleum science and engineering*. 2018. V. 166. P. 283–289.
3. Castro-Munoz Roberto, Barragan-Huerta Blanca E., Fila Vlastimil et al. Current Role of Membrane Technology: From the Treatment of Agro-Industrial by-Products up to the Valorization of Valuable Compounds. *Waste and Biomass Valorization*. 2018. V. 9 (4). P. 513–529.
4. Lobasenko B.A., Semenov A.G. Intensification of ultrafiltration concentrating by the separation of the concentration boundary layer. *Food and Raw Materials*. 2013. № 1. P. 74–81.
5. Felix Alexander, Herdegen Volker, Haseneder Roland et al. Investigations on the behaviour of ceramic micro- and mesoporous membranes at hydrothermal conditions. *Separation and Purification Technology*. 2015. V. 148. P. 85–93.
6. Das Bipul, Chakrabarty Bandana, Barkakati Pranab. Separation of oil from oily wastewater using low cost ceramic membrane. *Korean Journal of Chemical Engineering*. 2017. V. 34 (10). P. 2559–2569.
7. Rodriguez-Narvaez, Oscar M., Manuel Peralta-Hernandez Juan, Goonetilleke Ashantha et al. Treatment technologies for emerging contaminants in water: A review. *Chemical Engineering Journal*. 2017. V.323. P. 361–380.

Б.А. Лобасенко – д-р техн. наук, профессор, Кемеровский государственный университет, 650000 Россия, г. Кемерово, ул. Красная 6, e-mail: yul48888048@yandex.ru  
 • Д.М. Бородулин – д-р техн. наук, директор Института инженерных технологий Кемеровского государственного университета, 650000 Россия, г. Кемерово, ул. Красная 6 • Р.В. Котляров – канд. техн. наук, доцент • Е.К. Сазонова – вед. инженер ЦНИТ • А.В. Шафрай – канд. техн. наук, доцент

B.A. Lobasenko – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Kemerovo State University, 650000 Russia, Kemerovo, Krasnaya Str. 6, e-mail: yul48888048@yandex.ru • D.M. Borodulin – Dr. Sci. (Eng.), Director, Institute of Engineering Technology, Kemerovo State University, 650000 Russia, Kemerovo, Krasnaya Str. 6 • R.V. Kotlyarov – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor • E.K. Sazonova – Senior Engineer of CNIT • A.V. Shaffray – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor