

УДК 66.081.63

DOI: [10.26102/2310-6018/2020.28.1.037](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2020.28.1.037)

Моделирование ультрафильтрационного процесса на рулонных мембранах в центробежном поле

А.Б. Голованчиков¹, М.К. Доан², Н.А. Меренцов³

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волгоградский государственный технический университет», Волгоград, Российская Федерация

Резюме: В статье рассматривается процесс ультрафильтрации на мембранах рулонного типа, установленных в роторе фильтрующей центрифуги специальной конструкции, обеспечивающей атмосферное давление в зоне образования фильтрата за мембраной и центробежное давление в зоне фильтрации ретанта до мембраны. Получены уравнения для расчета производительности по фильтрату и пермеату и концентрации в них молекул растворенного вещества. Приведен пример расчета в сравнении с установкой одного слоя листовой мембраны на боковой стенке перфорированного ротора. Результаты численных расчетов основных параметров процесса ультрафильтрации водного раствора ацилазы по разработанному алгоритму при скорости вращения ротора $\omega = 100 \text{ рад/с}$, радиусе ротора $R_n = 0,25 \text{ м}$ и ширине мембраны $b = 0,5 \text{ м}$ показывают, что площадь рулонной мембраны увеличивается в 12 раз, а степень концентрирования раствора почти в 6 раз, при этом расход пермеата возрастает почти в 10 раз по сравнению с листовой мембраной, уложенной в один слой на стенку перфорированного ротора. Однако очистка пермеата в роторе с рулонной мембраной уменьшается почти в 12,5 раза, так как средняя концентрация в пермеате возрастает с $1 \cdot 10^{-5} \%$ до $2,6 \cdot 10^{-5} \%$.

Ключевые слова: ультрафильтрация, мембрана рулонного типа, центробежное поле, производительность, ретант, пермеат, концентрация.

Для цитирования: Голованчиков А.Б., Доан М.К., Меренцов Н.А.. Моделирование ультрафильтрационного процесса на рулонных мембранах в центробежном поле.

Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2020;8(1). Доступно по: https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2020/02/GolovanchikovSoavtors_1_20_1.pdf DOI: 10.26102/2310-6018/2020.28.1.037

Modeling of the ultrafiltration process on roll membranes in a centrifugal field

A.B. Golovanchikov, M.C. Doan, N.A. Merentsov

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Volgograd State Technical University", Volgograd, Russian Federation

Abstract: The process of ultrafiltration on roll-type membranes installed in the rotor of a filter centrifuge of a special design that provides atmospheric pressure in the zone of filtrate formation behind the membrane and centrifugal pressure in the zone of retant filtration to the membrane is considered. Equations are obtained for calculating the performance of filtrate and permeate and the concentration of solute molecules in them. An example of calculation is given in comparison with the installation of a single layer of sheet membrane on the side wall of a perforated rotor. The results of numerical calculations of the main parameters of the process of ultrafiltration of an aqueous acylase solution using the developed algorithm at the rotor rotation speed $\omega = 100 \text{ rad/s}$, the rotor radius $R_n = 0,25 \text{ m}$ and the membrane width $b = 0,5 \text{ m}$ show that the area of the roll membrane increases 12 times, and the degree

of concentration of the solution almost 6 times, while the permeate consumption increases almost 10 times compared to the sheet membrane laid in a single layer on the wall of the perforated rotor. However, the cleaning of permeate in a rotor with a roll membrane is reduced by almost 12.5 times, since the average concentration in permeate increases from $1 \cdot 10^{-5} \%$ to $2,6 \cdot 10^{-5} \%$.

Keywords: ultrafiltration, roll-type membrane, centrifugal field, performance, retant, permeate, concentration.

For citation: Golovanchikov A.B., Doan M.C., Merentsov N.A.. Modeling of the ultrafiltration process on roll membranes in a centrifugal field. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2020;8(1). Available from: https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2020/02/GolovanchikovSoavtors_1_20_1.pdf DOI: 10.26102/2310-6018/2020.28.1.037 (In Russ).

Введение

Известные конструкции лабораторных и промышленных ультрафильтрационных аппаратов основаны на создании избыточного давления в очищаемом растворе до 3÷5 атм и подачи это раствора на активной слой трубчатых, пластинчатых или рулонных мембран [1-3].

Авторами статьи разработана конструкция двухроторной фильтрующей центрифуги, в которой на внутреннем перфорированном роторе установлен объемный фильтровальный материал для улавливания частиц дисперсной фазы, а на внешнем перфорированном роторе закреплена полупроницаемая ультрафильтрационная мембрана для улавливания растворенных молекул [4,5]. Математическое моделирование процесса ультрафильтрации в центробежном поле проведено в статье [6]. Расчеты по разработанному в этой статье алгоритму показывают, что при высокой степени очистки пермеата от растворенных в исходном растворе молекул производительность и степень концентрирования остаются небольшими из-за малой поверхности полупроницаемой мембраны на роторе.

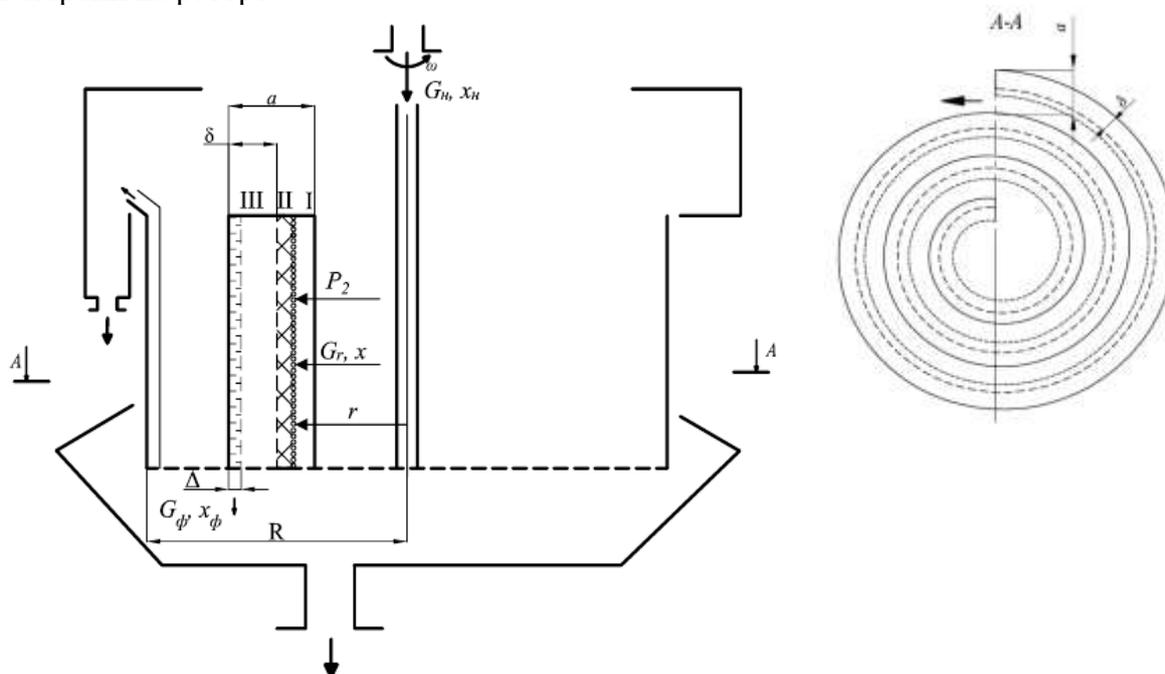


Рисунок 1 – Схема ультрафильтрующей центрифуги с рулонной мембраной
 Figure 1-Diagram of an ultrafilter centrifuge with a roll membrane

Материалы и метод

Увеличить производительность и степень концентрирования улавливаемых молекул в ретанте можно заменив один слой полупроницаемой мембраны на роторе на установку внутри ротора мембраны рулонного типа. Здесь нужно иметь в виду, что фильтрат или пермеат должен попадать в зону, где давление равно атмосферному, то есть слой мембраны нельзя плотно накручивать друг на друга, чтобы сохранять разность центробежного давления в пермеате. Такая возможность возникает в роторе с перфорированными боковыми стенками 1 в виде спирали, на которую укладываются витки рулонной мембраны (Рисунок 1). Параллельно с зазором δ идут витки спирали со сплошными боковыми стенками 2.

Определим длину мембраны с крученной в рулон при заданных значения радиуса R_0 на входе исходного раствора и радиуса на выходе (радиуса ротора) R_n при шаге навивки a и равном толщине самой мембраны с подложкой Δ и зазору δ между спиралями 1 и 2.

Элемент длины дуги мембраны определяется по формуле:

$$dl = \sqrt{dr^2 + r^2 d\varphi^2}, \quad (1)$$

так как текущее значение радиуса связано с углом φ и шагом навивки a формулой:

$$r_i - r_{i-1} = \frac{a}{2\pi} \varphi,$$

$$\text{то } d\varphi = \frac{2\pi \cdot dr}{a} \text{ и } dl = \sqrt{1 + \left(\frac{2\pi}{a}\right)^2 \cdot r^2} \cdot dr. \quad (2)$$

Из совместно решения уравнения (1) и (2) после интегрирования получаем формулу связи радиуса r и длины мембраны l_k :

$$l_k = 0,5R_n \sqrt{1 + \left(\frac{2\pi}{a}\right)^2 \cdot R_n^2} - 0,5R_0 \sqrt{1 + \left(\frac{2\pi}{a}\right)^2 \cdot R_0^2} + 0,5 \ln \left[\frac{\frac{2\pi}{a} R_n + \sqrt{1 + \left(\frac{2\pi}{a}\right)^2 \cdot R_n^2}}{\frac{2\pi}{a} R_0 + \sqrt{1 + \left(\frac{2\pi}{a}\right)^2 \cdot R_0^2}} \right]. \quad (3)$$

Так при $R_n = 0,25 \text{ м}$, $R_0 = 0,02 \text{ м}$ и $a = 0,01 \text{ м}$ длина мембраны $l_k = 19,5 \text{ м}$ при числе оборотов $n = 23$, а при укладке плоской мембраны на перфорированную стенку ротора $l_l = 1,57 \text{ м}$, то есть длина (и площадь) рулонной мембраны увеличивается в 12,1 раза.

Математическое моделирование.

Центробежное давление как функция радиуса, угловой скорости вращения и плотности раствора описывается известной формулой:

$$p = p_0 + \frac{\rho \omega^2 (r^2 - r_0^2)}{2}, \quad (4)$$

где r_0 – радиус начала ввода исходного раствора расходам G_n ,
 p_0 – давление подачи исходного раствора в рулонную мембрану.

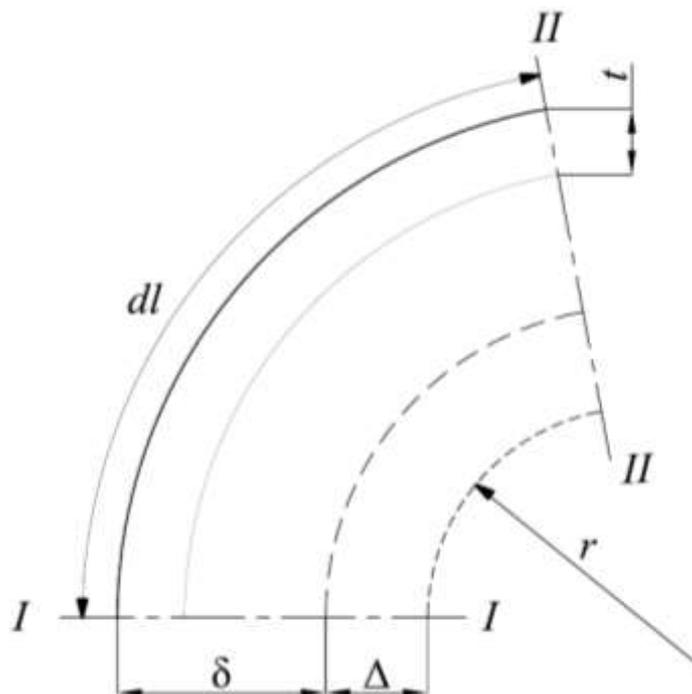


Рисунок 2 – Элемент витка рулонной мембраны
 Figure 2 – Element of the round of the roll membrane

Выделим элемент длины дуги мембраны dl между сечениями I-I и II-II запишем материальные балансы общий по пермеату и ретанту и по молекулам растворенного вещества для этих сечений (Рисунок 2):

$$\begin{cases} L + L_p = \left(L + \frac{dL}{dl} dl \right) \left(L_p + \frac{dL_p}{dl} dl \right); \\ L \cdot x + L_p \cdot x_p = \left(L + \frac{dL}{dl} dl \right) \left(x + \frac{dx}{dl} dl \right) + \left(L_p + \frac{dL_p}{dl} dl \right) \left(x_p + \frac{dx_p}{dl} dl \right), \end{cases}$$

где L и L_p – соответственно расходы ретанта и пермеата, $кг/с$;
 x и x_p – соответственно концентрации молекул растворенного вещества в ретанте и пермеате, $кг/кг$.

После алгебраических преобразований получаем:

$$\begin{cases} \frac{dL}{dl} = -\frac{dL_p}{dl}; \\ L \frac{dx}{dl} + x \frac{dL}{dl} + L_p \frac{dx_p}{dl} + x_p \frac{dL_p}{dl} = 0. \end{cases}$$

Из первого уравнения этой системы после интегрирования получаем:

$$L + L_p = G_n, \quad (5)$$

а второе переписывается в виде:

$$L \frac{dx}{dl} + x \frac{dL}{dl} + (G_n - L) \frac{dx_p}{dl} - x_p \frac{dL}{dl} = 0. \quad (6)$$

Запишем интегральное уравнение материального баланса по молекулам растворенного вещества:

$$G_n \cdot x_n = L_{pk} \cdot x_{pk} + L_k \cdot x_k \quad (7)$$

Составим элементарный материальный баланс по ретанту между выделенными сечениями I-I и II-II:

$$L = \left(L + \frac{dL}{dl} dl \right) + G \cdot b \cdot dl, \quad (8)$$

где G – удельная массовая производительность по пермеату, зависящая от центробежного давления, кг/с.

$$G = a_m \frac{\mu_0}{\mu} \Delta p, \quad (9)$$

где a_m – удельная производительность по чистой воде, $\frac{\text{кг}W}{\text{с} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{Па}}$,

μ_0 и μ – вязкость воды и вязкость ретанта.

С учетом уравнения (4):

$$\Delta p = p - p_a, \quad (10)$$

где p_a – атмосферное давление за мембраной, Па.

Подставляя в уравнение (8) значение G , p и Δp с учетом уравнений (9), (4) и (10) получаем:

$$\frac{dL}{dl} + a_m \frac{\mu_0}{\mu} \cdot b \cdot \left[p_0 + \frac{\rho \omega^2 (r^2 - r_0^2)}{2} - p_a \right] = 0. \quad (11)$$

Тогда дифференциальное уравнение (11) с учетом (2) можно представить в виде:

$$\frac{dL}{dr} + a_m \frac{\mu_0}{\mu} \sqrt{1 + \left(\frac{2\pi}{a} \right)^2} \cdot r^2 \cdot b \left[p_0 + \frac{\rho \omega^2 r^2}{2} - \frac{\rho \omega^2 r_0^2}{2} - p_a \right] = 0,$$

интеграл которого имеет сложное аналитическое выражение [7]:

$$L = -a_m \frac{\mu_0}{\mu} \int_{r_0}^r \sqrt{1 + A^2 \cdot r^2} \cdot b \left[p_0 + \frac{\rho \omega^2 r^2}{2} - \frac{\rho \omega^2 r_0^2}{2} - p_a \right] dr,$$

где $A = \left(\frac{2\pi}{a} \right)$,

которое может быть записать в виде:

$$q_1 = 0,5 \cdot a_m \cdot a (\mu_0/\mu) \cdot [p_0 - p_a - 0,5 \cdot \rho \omega^2 r_0^2];$$

$$q_2 = \left(\frac{r}{a} \right) \sqrt{1 + \left(\frac{r}{a} \right)^2} - \left(\frac{r_0}{a} \right) \sqrt{1 + \left(\frac{r_0}{a} \right)^2};$$

$$q_3 = \ln \left\{ \frac{\left(\frac{r}{a} \right) \sqrt{1 + \left(\frac{r}{a} \right)^2}}{\left(\frac{r_0}{a} \right) \sqrt{1 + \left(\frac{r_0}{a} \right)^2}} \right\};$$

$$\text{и } l_1 = q_1 (q_2 + q_3)$$

$$q_4 = 0,25 \cdot a_m \cdot a^3 (\mu_0/\mu) \rho \omega^2;$$

$$q_5 = \left(\frac{r}{a} \right) \left[2 \left(\frac{r}{a} \right)^2 + 1 \right] \cdot \left[\sqrt{1 + \left(\frac{r}{a} \right)^2} - \left(\frac{r_0}{a} \right) \left[2 \left(\frac{r_0}{a} \right)^2 + 1 \right] \sqrt{1 + \left(\frac{r_0}{a} \right)^2} \right];$$

$$q_6 = -0,25 \cdot \ln \left\{ \frac{\left(\frac{r}{a} \right) + \sqrt{1 + \left(\frac{r}{a} \right)^2}}{\left(\frac{r_0}{a} \right) + \sqrt{1 + \left(\frac{r_0}{a} \right)^2}} \right\};$$

$$\text{и } l_2 = q_4 (q_5 + q_6).$$

Тогда расход пермеата как функция текущего радиуса r запишется в виде:

$$\begin{cases} L_p = (l_1 + l_2) \cdot b; \\ L = G_u - L_p, \end{cases}$$

где b – ширина мембраны в рулоне.

При $r=R_n$ из уравнений последней системы получаем производительности по пермеату и ретанту на выходе из центробежного ультрафильтрационного аппарата с рулонной мембраной.

Для определения зависимости концентрации растворенных молекул в ретанте как функции радиуса спирали рулона $x = x(r)$ вторично рассмотрим элемент ее дуги длиной dl между сечениями I-I и II-II (Рисунок 2).

Расход элементарных молекул в выделенном сечении длиной dl составит:

$$dm_A = G \cdot b \cdot dl,$$

где $G = a_m (1 - \varphi) (\mu_0 / \mu) \Delta p \cdot x$ - удельный расход фильтрата, $кгА / (м^2 \cdot с)$; a_m – удельный расход чистой воды приходящейся на единицу перепада давления на мембране (паспортные данные мембраны), $кгА / (м^2 \cdot с \cdot МПа)$;

φ – селективность мембраны (паспортные данные);

μ_0 и μ - соответственно вязкость чистой воды и раствора при рабочей температуре, $Па \cdot с$.

Подставляя в последнее уравнение значение G и Δp из формулы (4) после интегрирования по параметру r с учетом уравнения (2) получаем:

$$m_A = \left[a_m (1 - \varphi) \left(\frac{\mu_0}{\mu} \right) b \right] \int_{R_0}^r \left[p_0 - p_a + \frac{\rho \omega^2 (r^2 - r_0^2)}{2} \right] \sqrt{1 + \left(\frac{2\pi}{a} \right)^2 r^2} \cdot x \cdot dr,$$

а концентрация молекул А в пермеате:

$$x_p = \frac{\left[a_m (1 - \varphi) \left(\frac{\mu_0}{\mu} \right) b \right] \int_{R_0}^r \left[p_0 - p_a + \frac{\rho \omega^2 (r^2 - r_0^2)}{2} \right] \sqrt{1 + \left(\frac{2\pi}{a} \right)^2 r^2} \cdot x \cdot dr}{L_p}$$

Из интервального уравнения материального баланса по молекулам А:

$$L_p \cdot x_p = G_u \cdot x_u - L \cdot x$$

Совместное решение последних уравнений приводит к интегральной зависимости концентрации молекул А в ретанте как функции радиуса в виде:

$$\left[a_m (1 - \varphi) \left(\frac{\mu_0}{\mu} \right) b \right] \int_{R_0}^r \left[p_0 - p_a + \frac{\rho \omega^2 (r^2 - r_0^2)}{2} \right] \sqrt{1 + \left(\frac{2\pi}{a} \right)^2 r^2} \cdot x \cdot dr = G_u \cdot x_u - L \cdot x.$$

Обозначив левую часть последнего уравнения суммой S при численном расчете до $i-1$ итерации получаем:

$$S_{i-1} + B_i \cdot x_i = G_u \cdot x_u - L_i \cdot x_i.$$

Тогда для каждой i -той итерации концентрация в ретанте как функция радиуса x_i определяется в виде:

$$x_i = \frac{G_n \cdot x_n - S_{i-1}}{B_i + L_i},$$

где $B_i = \left[a_m (1 - \varphi) \left(\frac{\mu_0}{\mu} \right) b \right] \int_{R_0}^r \left[p_0 - p_a + \frac{\rho \omega^2 (r_i^2 - r_0^2)}{2} \right] \sqrt{1 + \left(\frac{2\pi}{a} \right)^2 r_i^2} \cdot \Delta r$.

Результаты

Исходные данные для расчетов приведены в Таблице 1.

Результаты численных расчетов основных параметров по вышеприведенному алгоритму представлены в Таблице 2 при угловой скорости вращения ротора $\omega = 100 \text{ рад/с}$ и ширине мембраны $b = 0,5 \text{ м}$.

Таблица 1 – Исходные данные для расчетов центробежной ультрафильтрации на рулонной мембране, уложенной в роторе фильтрующей центрифуги [2]

Table 1 – Initial data for calculations of centrifugal ultrafiltration on a roll membrane placed in the rotor of a filter centrifuge [2]

№	Наименование параметра	Размерность	Обозначение	Величина
1	Производительность по исходному раствору	кг/с	G_n	0,5
2	Начальная концентрация молекул ацилазы в растворе	% массовые	x_n	0,015
3	Давление раствора на входе	атм.	p_0	1,033
4	Давление за мембраны	атм.	p_a	1,033
5	Радиус ротора	м	R_n	0,25
6	Радиус входа раствора в мембрану	м	R_0	0,025
7	Межвитковый зазор	м	a	0,01
8	Ширина мембраны	м	b	0,5
9	Плотность раствора	кг/м ³	ρ	1000
10	Вязкость раствора	Па·с	μ	$9,78 \cdot 10^{-4}$
11	Вязкость дистиллированной воды при рабочей температуре	Па·с	μ_0	$8,94 \cdot 10^{-4}$

12	Удельная производительность мембраны	$\frac{\kappa Z W}{\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{МПа}}$	a_m	0,075
13	Селективность мембраны	-	φ	0,998
14	Скорость вращения ротора	рад/с	ω	100

Таблица 2 – Зависимость основных расчетных параметров в ультрафильтрационном процессе на рулонной мембране в центробежном поле

Table 2 – Dependence of the main design parameters in the ultrafiltration process on a roll membrane in a centrifugal field

№	$r, \text{м}$	$l, \text{м}$	$dp, \text{атм.}$	$L, \text{кг/с}$	$x \cdot 10^2, \text{кгА/кгL}$	$L_p, \text{кг/с}$	$x_p \cdot 10^5, \text{кгА/кгL}_p$
1	0,04	0,307	0,05	0,5	15,00	0,0002	0,445
2	0,055	0,754	0,122	0,499	15,03	0,0009	0,597
3	0,07	1,343	0,218	0,498	15,07	0,0024	0,677
4	0,085	2,073	0,336	0,495	15,16	0,0054	0,707
5	0,100	2,945	0,478	0,49	15,32	0,0104	0,727
6	0,115	3,958	0,642	0,482	15,37	0,0184	0,745
7	0,13	5,112	0,829	0,47	15,96	0,0302	0,761
8	0,145	6,407	1,04	0,453	16,55	0,0496	0,782
9	0,16	7,844	1,273	0,43	17,43	0,0697	0,806
10	0,175	9,422	1,529	0,400	18,74	0,0999	0,839
11	0,19	11,141	1,808	0,361	20,78	0,139	0,884
12	0,205	13,001	2,110	0,311	24,08	0,1887	0,952
13	0,22	15,003	2,475	0,249	30,05	0,2505	1,057
14	0,235	17,146	2,783	0,174	43,18	0,3264	1,244
15	0,25	19,43	3,154	0,082	91,77	0,4183	1,700

Обсуждение

Для сравнения рассмотренного ультрафильтрационного процесса с рулонной укладкой мембраны в роторе были проведены расчеты для мембраны, уложенной на поверхности перфорированного ротора центрифуги [4] при той же угловой скорости вращения ротора и той же производительности. Площадь поверхности мембраны в этом случае составляет $F_m = 2\pi \cdot R_n \cdot b = 6,28 \cdot 0,25 \cdot 0,5 = 0,785 \text{ м}^2$, а длина $l_m = 2\pi \cdot R_n = 1,57 \text{ м}$.

Производительность по пермеату составляет бы $L_{pk} = 0,043 \text{ кг/с}$, а по ретанту $L_r = 0,457 \text{ кг/с}$, концентрация молекул растворенного вещества увеличилась бы в ретанте на 11% и составила бы 0,0166%, концентрация этих молекул в пермеате была бы $x_{pk} = 1,08 \cdot 10^{-5} \%$.

Заключение

Таким образом, установка рулонной мембраны внутри ротора центрифуги позволяет увеличить площадь фильтровальной поверхности в 12 раз, поднять степень концентрирования раствора с 1,11 до 6,11, расход пермеата увеличить с 0,043 кг/с до 0,418 кг/с, то есть в 9,7 раза, но снизить качество очистки пермеата от молекул ацилаза, так как их концентрация увеличивается с $1,08 \cdot 10^{-5} \%$ массовых до $2,64 \cdot 10^{-5} \%$, то есть в 2,45 раза.

Благодарности

Статья выполнена по гранту Президента РФ в рамках научного проекта № МК-1287.2020.8.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тимонин А.С., Балдин Б.Г., Борщев В.Я., Гусев Ю.И. и др. Под общей редакцией Тимонина А.С. *Машины и аппараты химических производств*: учебник для вузов. – Калуга: Издательство «Ноосфера», 2014.
2. Дытнерский Ю.И. *Основные процессы и аппараты химической технологии* : пособие по проектированию - М.: Альянс, 2015.
3. Родионов А.И., Клушин В.Н., Торочешников Н.С. *Техника защиты окружающей среды* – М.: Химия, 1989.
4. Голованчиков А.Б., Коворова П.Э., Филимонов М.И., Доан Минь Кыонг Моделирование процесса ультрафильтрации в центробежном поле. *Химическая технология*. 2018;19(4):186-191.
5. П.м. 177265 РФ, МПК В04В 3/00, В04В 5/10, В01D 63/16, В04В 9/14. *Маятниковая центрифуга*. Голованчиков А.Б., Филимонов М.И., Горбатенко В.И., Прохоренко Н.А., Коворова П.Э., Доан Минь Кыонг; заявитель и патентообладатель ВолГГТУ. - № 2017119979, заявл. 06.06.2017; опублик. 14.02.2018. Бюл. №5.
6. Голованчиков А.Б., Коворова П.Э., Филимонов М.И., Доан Минь Кыонг Моделирование процесса ультрафильтрации в центробежном поле. *Химическая технология*. 2018;19(4):186-191.
7. Голованчиков А.Б., Прохоренко Н.А., Доан Минь Кыонг. Моделирование процесса ультрафильтрации с учётом продольного перемешивания очищаемого раствора. *Теоретические основы химической технологии*. 2019;53(2):168-173.
8. Выгодский М.Я. *Справочник по высшей математике*. – М.: Наука, 1966.

REFERENCES

1. Timonin A.S., Baldin B.G., Borshchev V.Y., Gusev Y.I., etc. under the General editorship of Timonin A.S. *Machines and devices of chemical production*: a textbook for universities. Kaluga: noosphere publishing House, 2014.
2. Y. I. Dynarski and others *Basic processes and apparatuses of chemical technology* : a manual for design. - Moscow: Alliance, 2015.
3. Rodionov A. I., Klushin V. N., Torocheshnikov N. S. *Environmental protection techniques*. -M.: Chemistry, 1989.

4. Golovanchikov A.B., Kovorova P.E., Filimonov M.I., Doan min Kyong Modeling of the ultrafiltration process in a centrifugal field. *Chemical technology*. 2018;19(4):186-191.
5. P. M. 177265 RF, IPC B04B 3/00, B04B 5/10, B01D 63/16, B04B 9/14. Pendulum centrifuge. Golovanchikov A. B., Filimonov M. I., Gorbatenko V. I., Prokhorenko N. A., Kovorova P. E., Doan min Kyong; applicant and patent holder of Volgstu. - No. 2017119979, declared. 06.06.2017; publ. 14.02.2018. Bull. No. 5.
6. Golovanchikov A. B., Kovorova P. E., Filimonov M. I., Doan min Kyong. Modeling of the ultrafiltration process in a centrifugal field. *Chemical technology*. 2018;19(4):186-191.
7. Golovanchikov A. B., Prokhorenko N. A., Doan min Kyong. Modeling of the ultrafiltration process taking into account the longitudinal mixing of the purified solution. *Theoretical foundations of chemical technology*. 2019;53(2):168-173.
8. Vygodsky M.Y. *Handbook of higher mathematics* .- Moscow: Nauka, 1966.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Голованчиков Александр Борисович, д-р. тех. наук, профессор, кафедра «Процессы и аппараты химических и пищевых производств», ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет», Волгоград, Российская Федерация.

e-mail: pahp@vstu.ru

ORCID: [0000-0002-4576-4229](https://orcid.org/0000-0002-4576-4229)

Доан Минь Кьонг, аспирант, кафедра «Процессы и аппараты химических и пищевых производств», ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет», Волгоград, Российская Федерация.

e-mail: victorydoan@yandex.ru

ORCID: [0000-0001-7986-938X](https://orcid.org/0000-0001-7986-938X)

Меренцов Николай Анатольевич, к.т.н., доцент, кафедра «Процессы и аппараты химических и пищевых производств», ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет», Волгоград, Российская Федерация.

e-mail: pahp@vstu.ru

ORCID: [0000-0001-5946-0667](https://orcid.org/0000-0001-5946-0667)

Alexander B. Golovanchikov, Dr. Tech. Sci., Professor, "Processes and devices of chemical and food productions» Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Volgograd State Technical University", Volgograd, Russian Federation

Cuong M. Doan, PhD Student, "Processes and devices of chemical and food productions» Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Volgograd State Technical University", Volgograd, Russian Federation

Nykolay A. Merentsov, PhD, Assistant Professor, "Processes and devices of chemical and food productions» Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Volgograd State Technical University", Volgograd, Russian Federation