

УДК 628.16

**Влияние конструктивных особенностей турбулизатора мембранного аппарата на гидродинамику процесса ультрафильтрации**

*Д-р техн. наук* А.А. Шевцов, shevalol@rambler.ru,  
*Канд. техн. наук* А.А. Дерканосова, aa-derk@yandex.ru,  
А.А. Коротаева, alisa-korotaeva@mail.ru, Н.В. Тонких, nv-tonkikh@mail.ru,  
А.С. Муравьев, hntrun@mail.ru

*Воронежский государственный университет инженерных технологий*  
394036, Воронеж, пр. Революции, 19

*Одним из основных показателей снижения производительности работы ультрафильтрационных мембранных модулей является поддержание постоянного значения потока пермеата, который находится в прямой зависимости от значения поляризационной концентрации. Предложен вертикальный мембранный аппарат, снабжённый вращающимся мембранным модулем и турбулизатором для изменения гидродинамики фильтруемой суспензий. Объект разделения – суспензия спиртовой барды после грубого разделения на центрифуге со следующими характеристиками: абсолютно сухое вещество 50,0 г/л; сырой протеин 8,7 г/л; pH = 4,7. Для исследования эксплуатационных характеристик мембранного аппарата была предложена задача математического моделирования определяющая изменение профиля слоя концентрации. Получены зависимости потока пермеата от времени протекания процесса ультрафильтрации при разных значениях трансмембранного давления и угловой скорости вращения мембранного модуля. При изменении трансмембранного давления от 500 кПа до 950 кПа поток пермеата возрастает до 60–67%. При изменении  $\omega$  от 5,0 до 50,0 рад/с, увеличение потока пермеата происходит более чем на 100% при том же трансмембранном давлении. Конструктивные особенности предложенного вертикального мембранного аппарата оказывают положительное влияние на снижение слоя поляризационной концентрации. Предложенный мембранный аппарат имеет многозадачный режим работы и рекомендован к использованию в пищевой, фармацевтической, микробиологической промышленности, а также на предприятиях агропромышленного комплекса.*

**Ключевые слова:** ультрафильтрация, поляризационная концентрация, мембранный аппарат, гидродинамический анализ.

**Influence of turbulizer design features of membrane unit on the ultrafiltration process hydrodynamics**

*D.Sc.* A.A. Shevtsov, shevalol@rambler.ru  
*Ph.D* A.A. Derkanosova, aa-derk@yandex.ru  
A.A. Korotaeva, alisa-korotaeva@mail.ru, N.V. Tonkih, nv-tonkikh@mail.ru  
A.S. Muravev, hntrun @ mail.ru

*Voronezh State University of Engineering Technology*  
394036, Voronezh, Prospect Revolution 19

*One of the main indicators of ultrafiltration membrane modules performance decrease is to maintain a constant value of the permeate flow, which is in direct proportion to the value of the concentration polarization. In this work, proposed a vertical membrane unit, equipped with a rotating membrane module and a turbulizer to change the hydrodynamics of the filtered suspensions. The object of the work – a suspension of stillage after a rough separation in a centrifuge with the following characteristics: dry substance 50.0 g/l; crude protein 8.7 g/l; pH = 4,7. To study of the membrane device performance task*

*of determining change in the profile layer concentration mathematical model was offered. The dependence of the permeate flow from the ultrafiltration process flow time for different values of the transmembrane pressure and the angular velocity of rotation of the membrane module are obtained. Changing transmembrane pressure from 500 kPa to 950 kPa was increase permeate stream to 60–67%. Changing the  $\omega$  from 5,0 to 50,0 rad/s, increase the permeate flow more than 100% at the same transmembrane pressure. The design features of the proposed vertical membrane device having a positive impact on reducing the concentration polarization layer. The proposed membrane unit has a multi-tasking performance and is recommended for use in the food, pharmaceutical and microbiological industries, as well as enterprises of agroindustrial complex.*

**Keywords:** ultrafiltration, polarizing concentration, membrane apparatus, hydrodynamic analysis.

Несмотря на инновационную активность в разработке конструкций мембранных аппаратов различных исследователей [1–4], и в первую очередь [5, 6] вопросы снижения поляризационной концентрации за счёт изменения гидродинамики фильтруемых суспензий, эта проблема всегда остается в поле зрения специалистов в области процессов мембранного разделения. Повышение производительности и снижение эксплуатационных затрат процесса ультрафильтрации ведет к повышению эффективности производства и экономической привлекательности получения высококачественных кормовых продуктов [7–9].

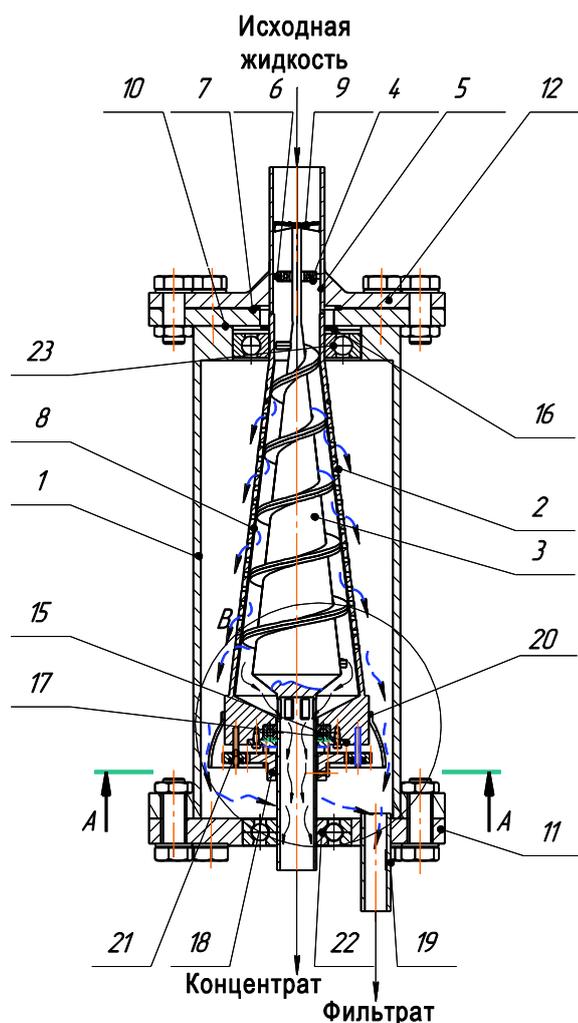
Сотрудниками кафедры предложен вертикальный мембранный аппарат с максимально возможным снижением значения поляризационной концентрации (рисунок 1). Он представляет собой корпус 1, выполненный из непроницаемого материала, с патрубками для ввода исходного раствора 5, вывода фильтрата 19, с сооснастроенным внутри него мембранным модулем 2 конусной формы с нанесенной на его внутреннюю поверхность полупроницаемой мембраной 8.

Турбулизатор 3 выполнен в виде конусообразного вала с винтовыми спиралями и состоит из трех участков: первый участок выполнен в виде ступицы закрепленной спицами 6 и установленной в подшипник 4, в патрубке для ввода исходного раствора 5, на конце турбулизатора смонтирован пропеллер 9 с лопастями, вращающимися под действием входного потока жидкости и передачей крутящего момента турбулизатору 3.

Второй участок турбулизатора 3, находящийся в мембранном модуле 2, выполнен в виде конусообразного вала с винтовыми спиралями, вращение которого обеспечивает перенос исходного раствора вдоль мембранного модуля 2. При этом турбулизатор 3 совершает вращательное движение путем принудительного изменения давления исходной жидкости в патрубке для ввода исходной жидкости 5 посредством раскручивания лопастей пропеллера 9.

Третий участок турбулизатора 3, выполненный в виде полого цилиндра, снабженного окнами для удаления концентрата, установлен в подшипнике 17 и закреплен в мембранном модуле 2 с крышкой подшипника 15 (рисунок 2). Расположенная со стороны отвода концентрата планетарная зубчатая передача (рисунок 3), состоит из ведущего центрального колеса 18, ведомых водил 13, и трех сателлитов 21, вращающихся вместе с каждым из водил 13 вокруг центральной оси турбулизатора 3. Причем, в каждом из водил 13, жестко закрепленных в мембранном модуле 2, установлены подшипники 14. Для защиты планетарной передачи от попадания на ее поверхность фильтрата, прошедшего через полупроницаемую мембрану 8, к мембранному модулю жестко закреплен отбойник 20.

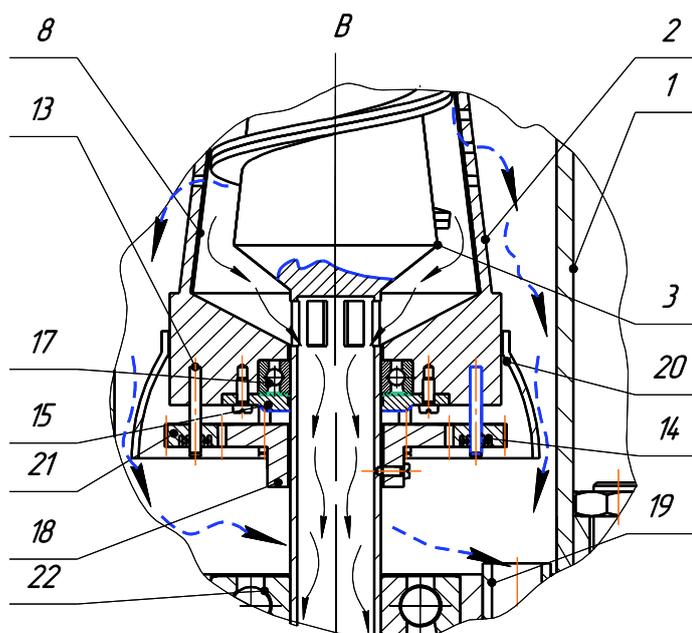
Мембранный модуль 2 и корпус 1 герметично соединены между собой при помощи фланца 10, прокладки 7, крышки 12 и фланца 11. На торцевой части корпуса 1 с одной стороны установлен патрубок ввода исходного раствора 5, с другой, во фланце 11 – патрубок вывода фильтрата 19. Между фланцем 10 и подшипником 23 установлена прокладка 16.



**Рисунок 1 – Общий вид вертикального мембранного аппарата**

Мембранный аппарат работает следующим образом. Исходный раствор подается через патрубок для ввода исходного раствора 5 в мембранный модуль 2, и под действием потока приводит во вращение пропеллер 9, закрепленный на первом участке турбулизатора 3, а следовательно, и турбулизатор 3. Винтовые спирали на поверхности турбулизатора 3 позволяют увеличить крутящий момент и обеспечить необходимую скорость вращения, что способствует движению исходной жидкости вдоль мембранного модуля 2. Фильтрат, прошедший через полупроницаемую мембрану 8, нанесенную на мембранный модуль 2, поступает в полость, образованную внешней стенкой мембранного модуля 2 и внутренней поверхностью корпуса 1, откуда он отводится через патрубок вывода фильтрата 19.

Раскручивание турбулизатора 3 приводит во вращение каждое из водил 13, закрепленных в мембранном модуле 2, которые вместе с центральным колесом 18 и тремя сателлитами 21 образуют планетарную зубчатую передачу. Она обеспечивает вращение мембранного модуля 2, что создает дополнительные условия для удаления с поверхности полупроницаемой мембраны 9 предыдущего слоя концентрата и восстановлению без дополнительных затрат селективности и проницаемости полупроницаемой мембраны 8. Витки вращающегося турбулизатора 3, удаляют концентрат через полую часть турбулизатора 3 и позволяют в значительной степени обеспечить отрыв молекул фильтрата от поверхности фильтрации.



**Рисунок 2 – Увеличенная часть вертикального мембранного аппарата в зоне отвода концентрата и фильтрата**

Таким образом, предложенный вертикальный мембранный аппарат имеет следующие преимущества:

- сохраняет заданную производительность более продолжительное время;
- создает благоприятные условия для снижения поляризованной концентрации за счет вращения мембранного модуля, при котором достигается максимально возможный отрыв молекул фильтрата от поверхности фильтрации;
- снижает давление жидкости на входе в аппарат, а следовательно, и энергозатраты на прокачку жидкости через аппарат;
- сохраняет мембрану от механического повреждения по причине отсутствия непосредственного контакта турбулизатора с ее поверхностью.

Для исследования эксплуатационных характеристик предлагаемого мембранного аппарата предлагается следующая постановка задачи моделирования.

Проницаемость мембраны находят по формуле:

$$J = \frac{\Delta P}{\eta_0 (R_m + R_{nc})}, \tag{1}$$

где  $R_m$  и  $R_{nc}$  – гидродинамическое сопротивление мембраны и граничного слоя концентрата соответственно;  $\Delta P$  – приложенное давление;  $\eta_0$  – динамическая вязкость вещества.

Сопротивление  $R_{nc}$  – накопительный эффект уменьшения проницаемости граничного слоя концентрата вблизи мембраны выражается по формуле:

$$R_{nc} = \int_0^{\delta} r_{nc} x \, dx = \int_0^{\delta} p x^{-1} \, dx, \tag{2}$$

где  $r_{nc}(x)$  – удельное сопротивление тонкого слоя концентрата;  $dx$  и  $p x^{-1}$  – проницаемость слоя концентрата.

Основной принцип теории сопротивления пограничного слоя основан на проницаемости слоя концентрата для вещества вблизи поверхности раздела мембраны и проницаемости вещества.

Эта зависимость описывается уравнением:

$$p = \frac{\eta_0 s C}{C (1 - v_1 / v_0)}, \quad (3)$$

где  $p$  – проницаемость,  $s C$  – коэффициент седиментации при концентрации  $C$ ;  $v_0$  и  $v_1$  – удельные объемы растворителя и растворенного вещества соответственно.

Профиль процесса концентрирования вблизи мембраны представлен на рисунке 4. Толщина границы слоя  $\delta$ , имеющая постоянную концентрацию  $C_{nc}$ , может быть получена из массового баланса:

$$C_{ок} R V_{\phi} = \delta A C_{nc}, \quad (4)$$

где  $C_{ок}$  – объемная концентрация;  $R$  – задержка,  $V_{\phi}$  – накопительный объем фильтрата;  $A$  – площадь мембраны. Тогда сопротивление пограничного слоя можно вычислить по формуле:

$$R_{nc} = \delta C_{nc}, \quad (5)$$

где удельное сопротивление  $r_{nc}$  постоянно по всему пограничному слою  $\delta$ . Сочетание уравнений и приводит к

$$\frac{1}{J} = \frac{1}{J} + \frac{\eta_0 C_{ок} R r_{nc} V_{\phi}}{\Delta P C_{nc} A}, \quad (6)$$

где  $\frac{r_{nc}}{C_{nc}}$  – величина снижения проницаемости;  $\frac{V_{\phi}}{A}$  – совокупный объем фильтрата.

Уравнение преобразуется:

$$\frac{d \frac{1}{J}}{d \frac{V_{\phi}}{A}} = \frac{\eta_0 C_{ок} R r_{nc}}{\Delta P C_{nc}}. \quad (7)$$

Концентрация  $C_{nc}$  может быть рассчитана путем использования соотношения для коэффициента осаждения:

$$\frac{r_{nc}}{C_{nc}} = \frac{1 - v_1 / v_0}{\eta_0 s C_{nc}}. \quad (8)$$

Массовый баланс вещества рассчитывается по формуле:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -J \frac{\partial C}{\partial x} + D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}, \quad (9)$$

где  $-J \frac{\partial C}{\partial x}$  – перенос вещества к мембране ( $\frac{\partial C}{\partial x}$  отрицателен,  $x$  – расстояние в пограничном слое);

$D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$  – обратная диффузия как результат градиента концентрации.

Граничные и начальные условия:

$$t = 0: C = C_{nc} \tag{10}$$

$$x = \delta: C = C_{nc} \tag{11}$$

$$x = 0: J = C_m = D \left( \frac{\partial C}{\partial x} \right)_{x=0} + 1 - R J C_{ок} \tag{12}$$

где  $\delta$  – толщина слоя поляризации концентрации. Исходя из уравнений, указанных выше, форма профиля концентрации приводится к виду, изображённому на рисунке 5.

Если коэффициент диффузии и объемная концентрация постоянны, эта система уравнений может быть решена аналитически. Тем не менее, в ситуации, когда множество переменных являются функцией концентрации, дифференциальное уравнение может быть решено только численно.

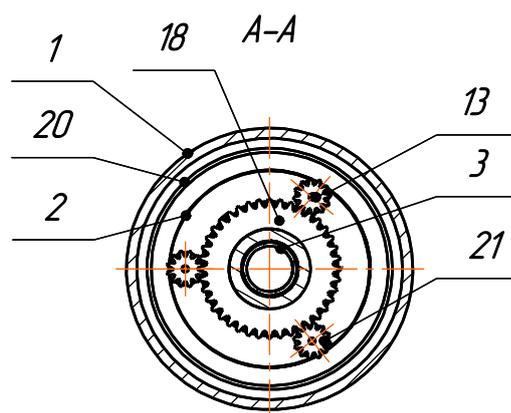


Рисунок 3 – Вид планетарной зубчатой передачи со стороны отвода концентрата и фильтрата

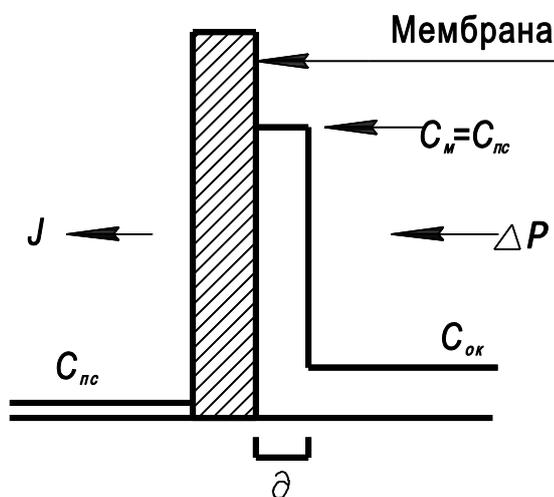
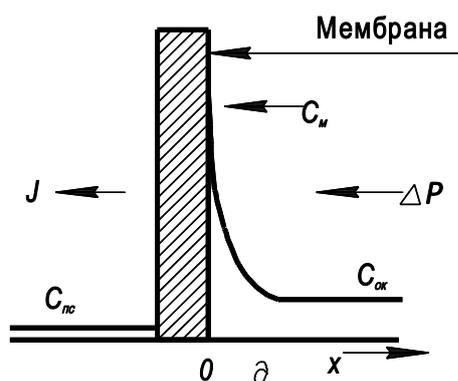


Рисунок 4 – Профиль процесса концентрирования вблизи мембраны



**Рисунок 5 – Профиль процесса концентрирования вблизи мембраны при сниженном слое поляризационной концентрации**

Уравнениями, используемыми для численного решения задачи моделирования, являются уравнения, в которых должны быть учтены зависимость коэффициента диффузии и коэффициент седиментации. Все характеристики процесса ультрафильтрации, в том числе профиль концентрации на границе мембраны могут быть рассчитаны без упрощений относительно слоя концентрации на мембране или удельного сопротивления слоя концентрата. Единственные экспериментально полученные данные, необходимые для моделирования являются задержка и гидравлическое сопротивление мембраны.

Для проверки модели на адекватность поставлен ряд параллельных опытов. Объект разделения – суспензия спиртовой барды после грубого разделения на центрифуге со следующими характеристиками: абсолютно сухое вещество 50,0 г/л; сырой протеин 8,7 г/л;  $pH = 4,7$  [10]. В ходе моделирования получен профиль концентрации пограничного слоя мембраны для временного интервала 50–8000 секунд (рисунок 6). Высокое значение концентрации достигается на поверхности мембраны относительно начальной концентрации 4,0 кг/м<sup>3</sup> после 50 секунд до 385 кг/м<sup>3</sup>, толщина слоя  $\delta$  увеличивается до 120 мкм после 500 сек. При дальнейшем процессе образования слоя концентрация на границе мембраны достигает стационарное значение 405 кг/м<sup>3</sup>, при этом профиль концентрации только расширяется от мембраны. Это расширение будет протекать более и более медленно во времени из-за снижения потока вещества.

Исходя из решения поставленной задачи математического моделирования, определяющей снижение слоя поляризационной концентрации, а также с учётом вариации угловой скорости вращения мембранного модуля  $\omega = 5 \dots 50$  рад/с, получены графики зависимости потока пермеата от времени протекания процесса ультрафильтрации при разных значениях трансмембранного давления  $TMD = 500; 650; 800; 950$  кПа (рисунок 7), анализ которых показывает преимущество вращающегося мембранного модуля с установленным внутри турбулизатором. Значение потока пермеата увеличивается как с увеличением трансмембранного давления так и  $\omega$ . Следует отметить, что при изменении трансмембранного давления от 500 кПа до 950 кПа поток пермеата возрастает до 60–67%. При изменении  $\omega$  от 5,0 до 50,0 рад/с, увеличение потока пермеата происходит более чем на 100% при том же трансмембранном давлении. Сочетание экспериментальных методов исследования и математического моделирования процесса ультрафильтрации подтверждают состоятельность и адекватность математической модели процесса ультрафильтрации, при этом конструктивные особенности предложенного вертикального мембранного аппарата оказывают положительное влияние на снижение слоя поляризационной концентрации.

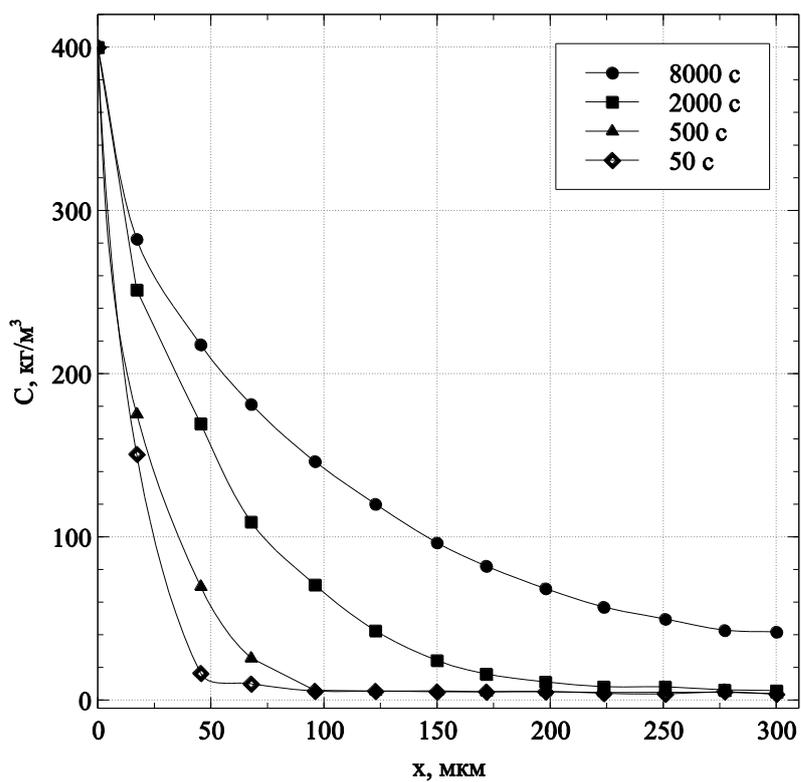
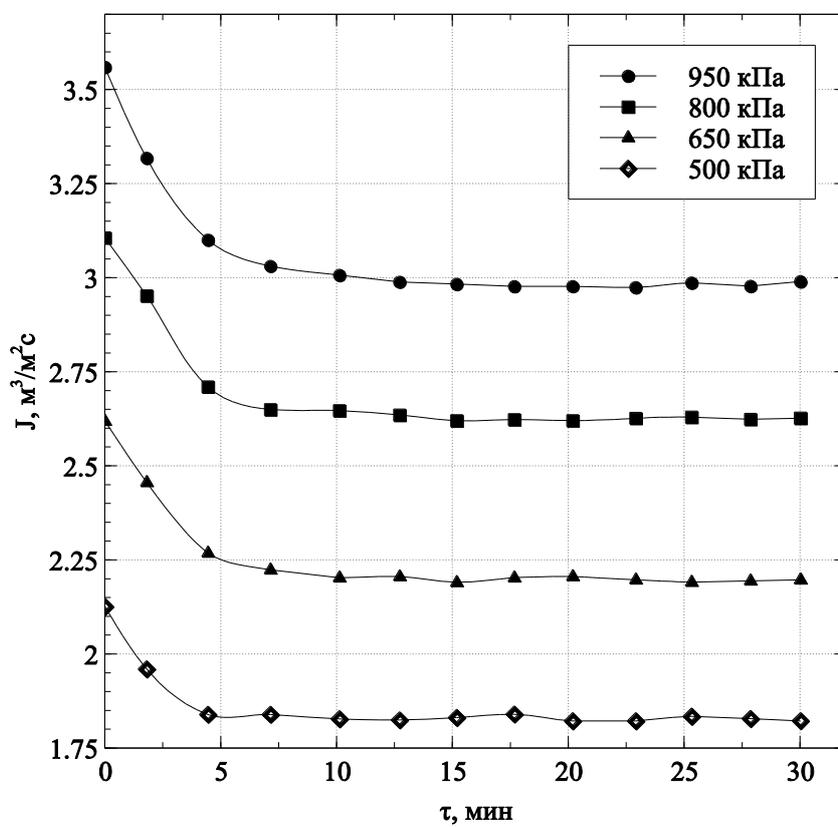
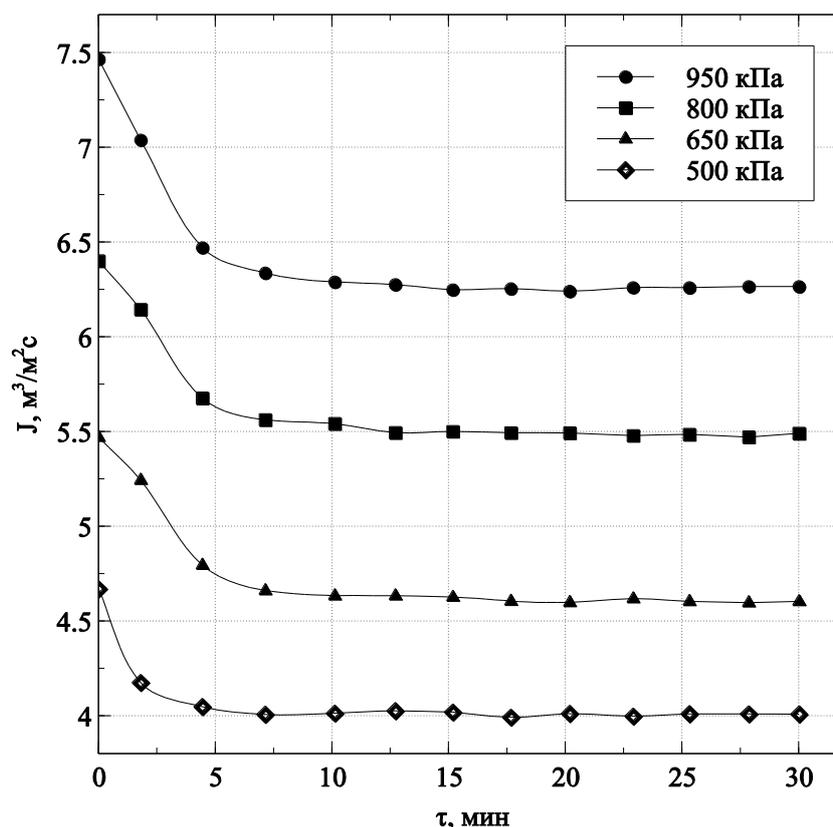


Рисунок 6 – Зависимость профиля концентрации от времени и расстояния от мембраны



а)



б)

Рисунок 7 – Зависимость потока пермеата от времени процесса УФ при разных значениях угловой скорости вращения мембранного модуля: а)  $\omega = 5 \text{ рад/с}$ , б)  $\omega = 50 \text{ рад/с}$

### Литература (References)

1. Rudobashta S.P., Mahmud S.Yu. Mathematical modeling membrane distillation process. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Seriya khimiya i khimicheskaya tekhnologiya*. 2012, V. 55, № 11, pp. 520–525.
2. Sablani S.S., Goosen M.F.A., Al-Belushi R., Wilf M. Concentration polarization in ultrafiltration and reverse osmosis. *Desalination*. 2001, V. 141, № 3, pp. 269–289.
3. Schausberger P., Norazman N., Li H., Chen V., Friedl A. Simulation of protein ultrafiltration using CFD. *Journal of Membrane Science*. 2009, V. 337, 1-2. pp. 1–8.
4. Wijmans J.G., Nakao S., van Den Berg J.W.A., Troelstra F. R., Smolders C.A. Hydrodynamic resistance of concentration polarization boundary layers in ultrafiltration. *Journal of Membrane Science*. 1985, V. 22, № 1, pp. 117–135.
5. Востриков С.В., Ключников А.И., Зуева Н.В. Исследование процесса ультрафильтрационного разделения и концентрирования белкового комплекса спиртовой дробины // *Хранение и переработка сельхозсырья*. 2006. № 9. С. 37–40.
6. Ключников А.И., Пономарев А.Н., Полянский К.К. Анализ концентрационной поляризации в процессе микрофильтрации пива // *Вестник тамбовского университета. Серия: естественные и технические науки*. 2012. Т. 17. № 2. С. 703–706.
7. Шевцов А.А., Дранников А.В., Дерканосова А.А., Коротаева А.А. Продукты переработки вегетативной массы растений в кормопроизводстве / *Материалы ЛП отчетной научной конференции в 3 ч. Ч. 1. Воронеж: ВГУИТ, 2014. С.62.*

8. *Шевцов А.А., Дранников А.В., Коротаяева А.А., Дерканосова А.А.* Анализ инновационной привлекательности использования вегетативной массы растений в комбикормах // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2013. № 1(55). С. 224–226.
9. Шенцова Е.С., Шевцов А.А., Лыткина Л.И. Технология комбикормов. Воронеж: Воронеж. гос. технол. акад., 2004. 204 с.
10. *Шевцов А.А., Дранников А.В., Муравьев А.С.* Энергосберегающая технология утилизации фильтрата послеспиртовой барды // Известия вузов. Пищевая технология. 2014. № 4. С. 78–80.

*Статья поступила в редакцию 04.08.2015 г.*