*Исследовательская статья*

**DOI 10.69540/2949-4079.2026.49.97.002** **УДК 621.643.2**

# ОБОСНОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ МЕМБРАННОГО МОДУЛЯ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ПРОЦЕССА МЕМБРАННОЙ ОБРАБОТКИ ЖИДКИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СРЕД В УСЛОВИЯХ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ГИДРОДИНАМИКИ

***А.И. Ключников***

*Московский государственный университет технологий и управления им. К.Г. Разумовского, Москва*

***Д.А. Ключников***

*Воронежский государственный аграрный университет (ВГАУ) им. императора Петра I, Воронеж, Россия*

*Аннотация:*

Обосновывается конструкторско-технологическая концепция мембранного модуля, предназначенного для эффективной обработки жидких технологических сред в условиях нестационарной гидродинамики. На основе анализа современных исследований, инженерного опыта и фундаментальных принципов гидромеханики и мембранной технологии предложена рациональная конструкция, учитывающая динамические режимы течения, склонность к образованию концентрационной поляризации и, как следствие, к загрязнению мембран. Показано, что оптимизация геометрии мембранного модуля, выбор типа мембраны и применение различных способов реализации нестационарной гидродинамики позволяют значительно повысить эффективность разделения, устойчивость к загрязнению и энергоэффективность мембранной установки.

*Ключевые слова*: мембранный модуль, нестационарная гидродинамика, концентрационная поляризация, мембрана, проницаемость

*Research article*

# JUSTIFICATION OF THE RATIONAL DESIGN OF A MEMBRANE MODULE FOR CARRYING OUT THE PROCESS OF MEMBRANE TREATMENT OF LIQUID TECHNOLOGICAL MEDIA UNDER CONDITIONS OF UNSTEADY-STATE HYDRODYNAMICS

© А.И. Ключников, Д.А. Ключников, 2026

***A.I. Klyuchnikov***

*K.G. Razumovsky Moscow State University of Technologies and Management, Moscow*

***D.A. Klyuchnikov***

*Emperor Peter I Voronezh State Agrarian University, Voronezh, Russia*

*Abstract:*

This article substantiates the design and engineering concept of a membrane module designed for the efficient processing of liquid process media under transient hydrodynamic conditions. Based on an analysis of modern research, engineering experience, and the fundamental principles of hydromechanics and membrane technology, a rational design is proposed that takes into account dynamic flow regimes, the tendency to form concentration polarization, and, consequently, membrane fouling. It is shown that optimizing the membrane module geometry, selecting the membrane type, and using various methods for implementing transient hydrodynamics can significantly improve the separation efficiency, fouling resistance, and energy efficiency of the membrane unit.

*Keywords:* membrane module, transient hydrodynamics, concentration polarization, membrane, permeability

Мембранные технологии играют все более важную роль в современных промышленных процессах: очистке сточных вод, концентрировании растворов, разделении биотехнологических смесей, обессоливании и др. Однако практическая эффективность мембранных модулей может значительно снижаться в условиях стационарной гидродинамики, характерной для многих реальных технологических процессов, особенно при обработке сред с высокой вязкостью, неоднородной структурой или склонных к образованию отложений.

Нестационарные гидродинамические условия создаются за счет пульсаций давления и расхода, изменения состава среды, наличия твердых включений, а также при работе в условиях периодического или квазипериодического режима. В таких условиях традиционные мембранные модули (например, рулонные, половолоконные, типа «фильтр-пресс») могут демонстрировать снижение проницаемости, ускоренное загрязнение и потерю селективности мембран.

Цель настоящей работы — обосновать рациональную конструкцию мембранного модуля, способного обеспечить устойчивую и эффек-

тивную работу в условиях нестационарной гидродинамики за счет учета гидродинамических, массообменных и конструктивных факторов.

*Теоретические основы проектирования мембранного модуля для нестационарных условий.* Модель нестационарного потока в канале мембранного модуля описывается уравнениями Навье—Стокса с учетом граничных условий на поверхности мембраны:

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla)\vec{u} = -\frac{1}{\rho}\nabla p + \nu \nabla^2 \vec{u}$$

где $\vec{u}$ — вектор скорости, м/с; p — давление, МПа; ρ — плотность, кг/м$^3$; ν — кинематическая вязкость, м$^2$/с.

Это уравнение записано для несжимаемой ньютоновской жидкости, что допустимо для большинства жидких технологических сред (водные растворы, суспензии с низкой концентрацией). Если среда неньютоновская (например, биосуспензии, полимерные растворы), вязкость ν становится функцией скорости деформации, и уравнение требует обобщения (с использованием тензора напряжений).

Граничные условия на мембране:

— на мембране:

$$u_x = 0;$$

— нормальная компонента скорости:

$$u_y = J_v,$$

где $J_v$ — объемный поток пермеата, зависящий от перепада давления и проницаемости мембраны (согласно закону Дарси).

Ключевыми параметрами являются: число Рейнольдса (Re), определяющее режим течения обрабатываемой технологической среды в мембранном канале; число Шервуда (Sh), характеризующее интенсивность массопереноса; число Шмидта (Sc), показывающее характеристики потоков жидкости, в которых одновременно происходят процессы конвекции импульса и диффузии массы.

Модель концентрационной поляризации при нестационарном режиме может быть описана уравнением диффузионно-конвективного переноса:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla C = D \nabla^2 C$$

где $C$ — концентрация вещества в потоке, г/мл; $D$ — коэффициент диффузии, м$^2$/с.

Традиционно мембранные процессы стремятся к стационарному режиму работы, поскольку он проще в управлении и расчете[17]. Однако

[17] *Горбунова Ю.А., Тимкин В.А.* Гидродинамика процессов микро-

в реальных условиях обработки сложных жидких технологических сред (суспензий, коллоидов, биологических растворов и т. п.) концентрационная поляризация становится основным фактором, ограничивающим производительность, селективность и ресурс мембраны. В связи с этим целенаправленное использование нестационарной гидродинамики в качестве инструмента для интенсификации массообмена приобретает особую актуальность и целесообразность. Введение контролируемой нестационарной гидродинамики позволяет динамически разрушать или предотвращать формирование на поверхности мембраны концентрационного слоя, например, с помощью:

— увеличения локального числа Рейнольдса и перехода к квазитурбулентному или нестационарно-турбулентному режиму;

— периодического срыва накопившихся компонентов с поверхности мембраны;

— интенсификации диффузионного переноса за счет осцилляций концентрационного профиля;

— пульсаций разделяемого потока (амплитуда 10—20 % от среднего расхода), которые могут повысить проницаемость мембраны на 30—60 % при том же перепаде давления.

*Анализ современного состояния мембранных модулей и их работы в условиях нестационарной гидродинамики.* Современные мембранные модули можно разделить на следующие основные типы:

1. *Мембранные модули типа «фильтр-пресс»* (Рис. 1) широко применяются в лабораторной практике и в ряде промышленных процессов с относительно чистыми и стабильными по составу и реологическим свойствам технологическими средами. Однако их использование в условиях нестационарной гидродинамики, характеризующейся колебаниями давления, расхода, вязкости и концентрации компонентов, сопряжено с фундаментальными ограничениями, делающими такую эксплуатацию технически нецелесообразной или даже невозможной по следующим причинам:

— конструктивная хрупкость полимерных мембран при циклических нагрузках;

— малая высота межмембранных каналов, изменять которую возможно только за счет уплотнительных прокладок различной высо-

---

и ультрафильтрационного разделения молока и творожного кальe // Аграрный вестник Урала. 2016. № 6 (148). С. 70—75; *Чесноков Ю.Г.* Течение жидкостей по трубкам с проницаемыми стенками при наличии проскальзывания на стенке // Известия СПбГТИ (ТУ). 2018. № 47 (73). С. 102—107; *Тушкина Т.М., Павлова Н.В.* Численное исследование гидродинамики и массообмена в трубчатом мембранном канале // Ползуновский вестник. 2008. № 1—2. С. 33—37.

ты, т. е. в процессе мембранной обработки в условиях нестационарной гидродинамики изменение высоты технически невозможно. При этом исключена техническая возможность размещения турбулизирующих элементов из-за малой высоты межмембранных каналов (всего 0,5—2,0 мм);

— отсутствие демпфирующей способности конструкции мембранного модуля, что делает его очень чувствительным к гидроударам, например, при резком изменении расхода или при работе с технологическими средами, содержащими твердые включения. Эти условия непосредственно отражаются на мембране, приводя ее к отрыву от дренажного слоя и даже к механическому повреждению в виде трещин или разрывов;

— сложность герметизации и обеспечения гарантированной межмодульной утечки[18].

Таким образом, совокупность конструктивных, гидродинамических и технологических ограничений делает мембранные модули типа «фильтр-пресс» непригодными для мембранной обработки в условиях нестационарной гидродинамики.

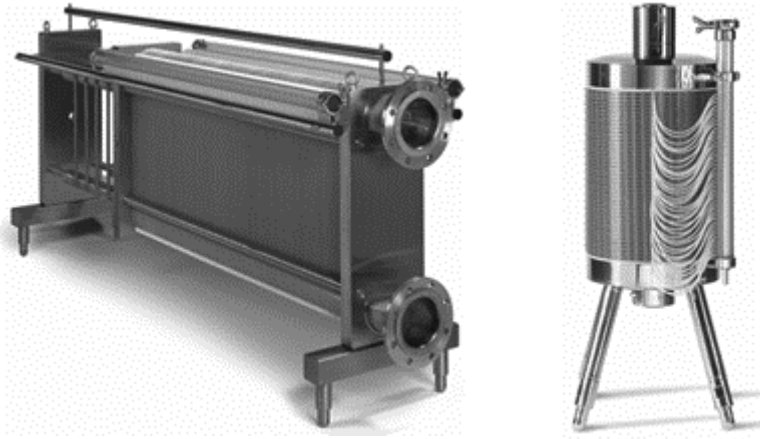


Рис. 1. Мембранные модули типа «фильтр-пресс» (изображение из открытых источников)

2. *Мембранные модули рулонного типа* (Рис. 2) получили широкое распространение благодаря высокой удельной площади мембраны

[18] *Мулдер М.* Введение в мембранную технологию. М., 1999. 513 с.

на единицу объема, относительно низкой стоимости и хорошей эффективности в стационарных режимах, например, при опреснении морской воды или очистке промышленных стоков с постоянным составом. Однако при работе в условиях нестационарной гидродинамики такие модули демонстрируют фундаментальные конструктивные и эксплуатационные ограничения, также делающие их применение нецелесообразным по следующим причинам:



Рис. 2. Мембранные модули рулонного типа
(изображение из открытых источников)

— нестабильность потока в межлистовых каналах высотой 0,5—1,2 мм; из-за малой гидравлической высоты канала числа Рейнольдса остаются низкими (Re < 200), что не обеспечивает развитой турбулентности и усиливает концентрационную поляризацию особенно в начальных участках мембранного модуля;

— конструктивная невозможность интеграции средств интенсификации массообмена в виде турбулизирующих устройств, пульсационных элементов, а также изменения геометрии канала в процессе эксплуатации;

— механическая уязвимость при циклических перепадах давления, что неминуемо сопровождается микросмещениями слоев мембраны и сетки-спейсера, истиранием и расслоением мембранного пакета, повреждением клеевых швов, фиксирующих края мембраны, что приводит к смешиванию потоков пермеата и концентрата и потере селективности;

— накопление загрязнений и закупоривание напорных каналов, приводящее к срывам уже осевших частиц с одних участков и их отложению в узких зонах (например, у выхода в центральную трубу), формированию «пробок», которые блокируют течение в отдельных витках

мембранного модуля, резкому росту гидравлического сопротивления и локальному перегреву (в случае использования мембранного модуля в процессе электродиализа)[4].

Таким образом, конструктивные особенности рулонных мембранных модулей: узкие каналы, жесткая неразборная упаковка мембран, хрупкость полимерных слоев и отсутствие возможностей для адаптации нестационарных гидродинамических условий — делают их категорически непригодными для эксплуатации в данных режимах.

*3. Половолоконные мембранные модули*, состоящие из пучков полимерных волокон с внутренним диаметром от 0,3 до 2 мм (Рис. 3), широко используются в системах очистки воды, в биотехнологической и фармацевтической промышленности благодаря высокой удельной площади поверхности и хорошей проницаемости. Однако при работе в условиях нестационарной гидродинамики данные мембранные модули сталкиваются с рядом существенных конструктивных и физико-механических ограничений, также делающих их применение технически нецелесообразным по следующим причинам:

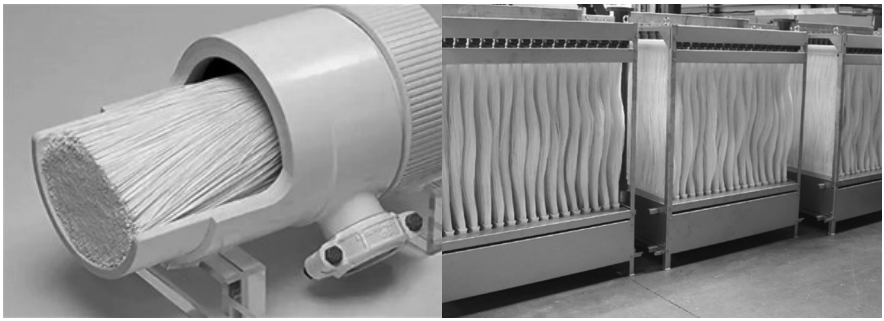


Рис. 3. Мембранные модули половолоконного типа (изображение из открытых источников)

— механическая неустойчивость полых волокон в условиях нестационарных гидродинамических условий, приводящая к необратимым деформациям и повреждениям полого волокна (толщина стенки 20—100 мкм);

— неравномерное распределение потока и локальные перегрузки отдельных полых волокон по причине зависимости гидравлического сопротивления каждого волокна от его длины, диаметра, изгиба и степени загрязнения;

— возрастание загрязнения полых волокон при изменении направления и скорости потока, в результате чего уже сформированный высококонцентрированный слой разрушается, но вместо его уноса

с потоком концентрата он перераспределяется и откладывается в узких или изогнутых участках мембранного модуля, что способствует накоплению твердых частиц в устьях волокон или между ними;

— отсутствие технической возможности турбулизации потока внутри волокна[4].

Таким образом, несмотря на высокую удельную производительность в стационарных условиях, половолоконные мембранные модули принципиально не приспособлены к работе в условиях нестационарной гидродинамики. Их тонкостенная хрупкая конструкция, неспособность к равномерному распределению переменных потоков, усиленная склонность к загрязнению и низкая усталостная прочность делают эксплуатацию в условиях нестационарной гидродинамики неэффективной и экономически невыгодной.

*4. Трубчатые мембранные модули* (Рис. 4) являются одними из наиболее конструктивно гибких и надежных типов мембранных систем, особенно при обработке сложных, неоднородных и склонных к загрязнению жидких технологических сред. Их способность эффективно функционировать в условиях контролируемой нестационарной гидродинамики (пульсации, турбулизация, циклические режимы) обусловлена рядом ключевых преимуществ:

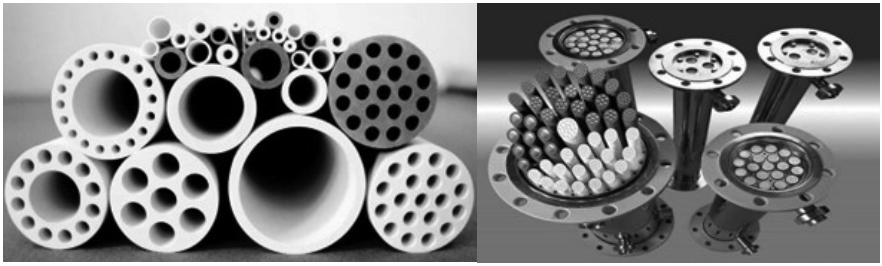


Рис. 4. Мембранные модули трубчатого типа (изображение из открытых источников)

— конструктивная устойчивость к знакопеременным механическим и гидравлическим нагрузкам, обусловленная высокой прочностью керамических мембран, способных выдерживать рабочие давления до 1—2 МПа;

— широкий ассортимент выпускаемых керамических мембран с различными типоразмерами и конфигурациями каналов (внутренний диаметр 5—25 мм и более);

— конструктивная возможность для размещения турбулизирующих элементов в виде статических и динамических турбулизаторов, спиральных лент, перфорированных вставок и т. д.;

— применение изменяемой геометрии канала: конических переходов, местных сужений/расширений для реализации эффекта Вентури, изогнутых участков для создания центробежных сил;

— полная совместимость с пульсационными и циклическими гидродинамическими режимами без риска повреждения мембраны;

— устойчивость керамических мембран к загрязнению и облегченная регенерация за счет увеличенного диаметра мембранного канала и гладкой поверхности мембраны, снижающей вероятность механического захвата твердых частиц;

— высокая ремонтопригодность и масштабируемость, позволяющая производить замену отдельных мембран без замены всего модуля; легко масштабировать мембранные модули за счет их параллельного соединения; гибкая настройка гидродинамического режима под конкретную среду (например, изменение частоты пульсации в зависимости от вязкости)[19].

Примером успешной технической реализации нестационарной гидродинамики с использованием трубчатого мембранного модуля может служить мембранный аппарат (Рис. 5), в котором исходный раствор подается через патрубок 3 в межстенное пространство, ограниченное полупроницаемой мембраной 6 и наружной поверхностью непроницаемого эластичного рукава 9, имеющего сложную геометрическую форму, под давлением, превышающим осмотическое давление растворенных компонентов.

При движении вдоль оси модуля исходный раствор свободно обтекает участки эластичного рукава 9, деформированные шаровыми элементами 14. Пермеат, прошедший сквозь полупроницаемую мембрану 6, поступает в кольцевую полость, образованную внутренними стенками пористого цилиндра 1, непроницаемого цилиндра 2 и торцевых крышек 7 (левой и правой), откуда отводится наружу через патрубок 5. Концентрат, прошедший по мембранному каналу со сложной геометрией, выводится через патрубок 4.

В случае снижения селективности и проницаемости полупроницаемой мембраны 6 на обмотки электродвигателя 20 подается напряжение. Создаваемый им крутящий момент передается через пружину 19

[19] *Ключников А.И.* Развитие мембранной техники, реализующей гидродинамическую неустойчивость на межфазной границе «мембрана — исходный раствор» // Агропромышленные технологии центральной России. 2023. Вып. 3 (№ 29). С. 99—115; *Лобасенко Б.А., Иванец В.Н., Сазонова Е.К., Стефанкин А.Е., Котляров Р.В.* Моделирование мембранных установок непрерывного действия, укомплектованных аппаратами с отводом диффузионного слоя // Техника и технология пищевых производств. 2016. № 3. С. 112—117.

на вал 11, на котором закреплен набор турбулизаторов 13, равномерно распределенных по длине вала и смещенных относительно друг друга по окружности на заданный угол. Вращение вала 11 с турбулизаторами 13 инициирует формирование винтообразных вихревых потоков исходного раствора, обеспечивающих мембранную обработку в условиях развитой гидродинамической нестабильности.

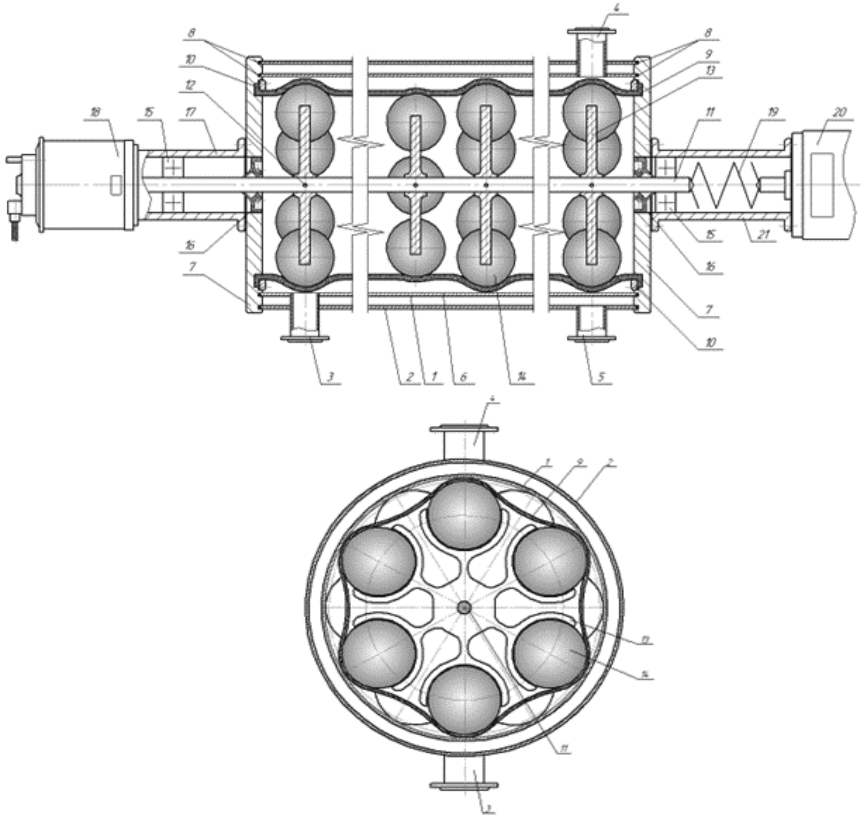


Рис. 5. Пример использования трубчатого мембранного модуля с керамической мембраной большого диаметра и реализации нестационарной гидродинамики (авторы изображения: А.И. Ключников, Д.В. Ключникова, И.А. Никитин [20])

[20] Пат. № 2846390 РФ МПК B01D 63/06 (2006.01) Мембранный аппарат / *А.И. Ключников, Д.В. Ключникова, И.А. Никитин;* заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова». № 2025104842, заявл. 03.03.2025; опубл. 04.09.2025. Бюл. № 25.

При вращении вала 11 с турбулизаторами 13 перед каждым шаровым элементом 14 со стороны потока исходного раствора возникают чередующиеся зоны повышенного и пониженного давления. Обрабатываемая жидкость, проходя через эти зоны, испытывает резкие колебания гидродинамических параметров, что способствует разрушению и отмыву отложений с поверхности полупроницаемой мембраны 6.

В зоне повышенного давления скорость потока возрастает по мере сужения зазора между эластичным рукавом 9 и мембраной 6 в месте контакта с шаровым элементом 14, в то время как статическое давление постепенно падает. При выходе потока из этого сужения скорость резко снижается, вызывая формирование интенсивных завихрений в области пониженного давления, что приводит к отрыву концентрированного слоя от поверхности мембраны 6 и его транспортировке с концентратом к патрубку отвода.

Для обеспечения осевого перемещения вала 11 с турбулизаторами 13 и шаровыми элементами 14, а также его фиксации в крайнем левом положении на определенное время подается напряжение на обмотки электромагнита 18.

При возвратно-поступательном (осевом) движении вала 11 с турбулизаторами 13 перед каждым шаровым элементом 14 также формируются зоны высокого и низкого давления. Проходя через них, жидкость вновь подвергается резким гидродинамическим воздействиям, способствующим удалению концентрированного слоя с мембраны 6.

По мере приближения потока к сужающемуся зазору между рукавом 9 и мембраной 6 в точке контакта с шаровым элементом 14 скорость возрастает, а давление снижается, что приводит к возникновению касательных напряжений, сдвигающих концентрированный слой вдоль поверхности мембраны 6 по винтовой траектории. При выходе потока из зазора скорость резко падает, формируя область разрежения с интенсивными вихрями, которые окончательно отрывают загрязнения и уносят их с концентратом к месту отвода.

Комбинированное вращательное и возвратно-поступательное движение вала 11 с турбулизаторами 13 и шаровыми элементами 14 создает знакопеременные гидродинамические условия, обеспечивающие эффективную очистку всей поверхности полупроницаемой мембраны 6 как в продольном, так и в поперечном направлениях, исключая образование застойных зон.

По завершении цикла очистки напряжение с обмоток электромагнита 18 снимается, и вал 11 с турбулизаторами 13 и шаровыми элементами 14 под действием пружины 19 возвращается из крайнего левого положения в исходное — крайнее правое. После этого описанные процессы повторяются в автоматическом режиме.

Таким образом, трубчатые мембранные модули обладают уникальным сочетанием прочности, геометрической гибкости и гидродинамической управляемости, что делает их наиболее предпочтительным выбором для реализации мембранных процессов в условиях контролируемой нестационарной гидродинамики. Данные модули не просто допускают работу в нестационарных условиях — они наилучшим образом реализуют преимущества управляемой нестационарности, превращая ее из помехи в инструмент интенсификации мембранного разделения.

*Список литературы*

1. *Горбунова Ю.А., Тимкин В.А.* Гидродинамика процессов микро- и ультрафильтрационного разделения молока и творожного калье // Аграрный вестник Урала. 2016. № 6 (148). С. 70—75.

2. *Ключников А.И.* Развитие мембранной техники, реализующей гидродинамическую неустойчивость на межфазной границе «мембрана — исходный раствор» // Агропромышленные технологии центральной России. 2023. Вып. 3. № 29. С. 99—115.

3. *Лобасенко Б.А., Иванец В.Н., Сазонова Е.К., Стефанкин А.Е., Котляров Р.В.* Моделирование мембранных установок непрерывного действия, укомплектованных аппаратами с отводом диффузионного слоя // Техника и технология пищевых производств. 2016. № 3. С. 112—117.

4. *Мулдер М.* Введение в мембранную технологию / Пер. с англ. М.: «Мир», 1999. 513 с., ил.

5. Патент № 2846390 РФ МПК B01D 63/06 (2006.01) Мембранный аппарат / *А.И. Ключников, Д.В. Ключникова, И.А. Никитин;* заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова». № 2025104842, заявл. 03.03.2025; опубл. 04.09.2025. Бюл. № 25.

6. *Тушкина Т.М., Павлова Н.В.* Численное исследование гидродинамики и массообмена в трубчатом мембранном канале // Ползуновский вестник. 2008. № 1—2.С. 33—37.

7. *Чесноков Ю.Г.* Течение жидкостей по трубкам с проницаемыми стенками при наличии проскальзывания на стенке // Известия СПбГТИ (ТУ). 2018. № 47 (73).С. 102—107.

*Сведения об авторах*

*Ключников Андрей Иванович*, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры технологии виноделия, бродильных производств и химии им. Г.Г. Агабальянца, МГУТУ им. К.Г. Разумовского. E-mail: *kaivanov@mail.ru*

*Ключников Даниил Андреевич*, студент ВГАУ им. императора Петра I. E-mail: *McDaniel31@mail.ru*

*Information about the authors*

*Klyuchnikov Andrey Ivanovich*, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of winemaking technology, fermentation production and chemistry named after G.G. Agabal'yants, K.G. Razumovsky MSUTM. E-mail: *kaivanov@mail.ru*

*Klyuchnikov Daniil Andreevich*, Student of the Emperor Peter I Voronezh State Agrarian University. E-mail: *McDaniel31@mail.ru*

Статья поступила в редакцию 16.02.2026; одобрена после рецензирования 02.03.2026; принята к публикации 05.03.2026.