

АГРОИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

AGROENGINEERING SYSTEMS AND TECHNOLOGIES

Научная статья

УДК 66.067

DOI 10.24888/2541-7835-2023-29-99-115

РАЗВИТИЕ МЕМБРАННОЙ ТЕХНИКИ, РЕАЛИЗУЮЩЕЙ ГИДРОДИНАМИЧЕСКУЮ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ НА МЕЖФАЗНОЙ ГРАНИЦЕ «МЕМБРАНА – ИСХОДНЫЙ РАСТВОР»

Ключников Андрей Иванович✉

Московский государственный университет технологий и управления

им. К. Г. Разумовского (ПКУ), Москва, Россия

kaivanov@mail.ru✉

Аннотация. Концентрационная поляризация в мембранных процессах разделения и концентрирования рассматривается как неизбежное отрицательное явление, приводящее к снижению удельной пропускной способности мембран вплоть до полной их остановки под воздействием слоя высокой концентрации на межфазной границе «мембрана – исходный раствор». Большое многообразие способов снижения концентрационной поляризации на поверхности мембраны зависит от решающих факторов, обуславливающих вид мембранного процесса, природу обрабатываемой технологической жидкости, организацию гидродинамических условий на межфазной границе, величину поверхностных сил, удерживающих слой высокой концентрации на мембране и т.д. По своей сути, универсальных способов снижения явления концентрационной поляризации на межфазной границе просто не существует, прежде всего, по причине сложности явлений и процессов, происходящих и взаимодействующих друг с другом в примембранной области. Специфика и многокомпонентность состава большинства обрабатываемых с помощью мембран технологических жидкостей диктует свои условия по обеспечению стабильной удельной пропускной способности, отличающиеся воздействием на примембранный слой и, в частности, гидродинамическую структуру потока. В настоящей работе рассматривается научная концепция по созданию мембранной техники с низким уровнем концентрационной поляризации за счет использования различных технических средств, размещаемых в трубчатом мембранном канале и работающих по определенному алгоритму с целью создания контролируемой гидродинамической неустойчивости на межфазной границе «мембрана – исходный раствор».

Ключевые слова: мембрана, межфазная граница, концентрационная поляризация, поверхностные силы, примембранная область, гидродинамическая неустойчивость.

Для цитирования: Ключников А.И. Развитие мембранной техники, реализующей гидродинамическую неустойчивость на межфазной границе «мембрана – исходный раствор» // Агропромышленные технологии Центральной России. 2023. № 3(29). С. 99-115. <https://doi.org/10.24888/2541-7835-2023-29-99-115>.

Original article

DEVELOPMENT OF MEMBRANE TECHNOLOGY REALIZING HYDRODYNAMIC INSTABILITY AT THE INTERFACE «MEMBRANE – INITIAL SOLUTION»

Andrey I. Klyuchnikov✉

K.G. Razumovsky Moscow State University of Technologies and Management (the First Cossack University), Moscow, Russia

kaivanov@mail.ru✉

Abstract. Concentration polarization in membrane processes of separation and concentration is considered as an inevitable negative phenomenon, leading to a decrease in the specific throughput of mem-

branes up to their complete stop under the influence of a high-concentration layer at the “membrane-initial solution” interface. A wide variety of ways to reduce the concentration polarization on the membrane surface depends on the decisive factors that determine the type of membrane process, the nature of the processed process fluid, the organization of hydrodynamic conditions at the interface, the magnitude of the surface forces that hold the high-concentration layer on the membrane, etc. In essence, there are simply no universal ways to reduce the phenomenon of concentration polarization at the interface, primarily due to the complexity of the phenomena and processes occurring and interacting with each other in the near-membrane region. The specificity and multicomponent nature of the composition of most process fluids processed using membranes dictate their own conditions for ensuring a stable specific throughput, which differ in their effect on the near-membrane layer and, in particular, the hydrodynamic structure of the flow. In this paper, we consider a scientific concept for the creation of membrane technology with a low level of concentration polarization through the use of various technical means placed in a tubular membrane channel and working according to a certain algorithm in order to create a controlled hydrodynamic instability at the “membrane – initial solution” interface.

Keywords: membrane, interface, concentration polarization, surface forces, near-membrane region, hydrodynamic instability.

For citation: Klyuchnikov A.I. Development of membrane technology realizing hydrodynamic instability at the interface «membrane – initial solution». *Agro-industrial technologies of Central Russia*, 2023, no. 3(29), pp. 99-115. <https://doi.org/10.24888/2541-7835-2023-29-99-115>.

Введение

Как показывает отечественный опыт, интенсивность использования мембранных процессов разделения и концентрирования в различных отраслях АПК России постоянно нарастает [1, 9]. Дальнейшее развитие пищевой промышленности видится в привлечении новых прогрессивных и безотходных технологий, к которым и относятся процессы с использованием мембран. Однако существующая техника мембранных технологий, к сожалению, не позволяет в полной мере задействовать направления по совершенствованию процессов обработки жидких технологических сред, т.к. в случае использования полимерных, многоканальных керамических, полволоконных мембран физически невозможно разместить технические средства для создания гидродинамической неустойчивости на межфазной границе «мембрана – продукт». Поэтому приходится прибегать к таким методам интенсификации, которые бы позволили обеспечить воздействие на слой высокой концентрации и удалить его с поверхности мембраны.

Керамические материалы на основе оксидов алюминия, титана, циркония на сегодняшний день являются самыми универсальными материалами в технологии производства пористых структур для мембранных процессов разделения и концентрирования [3, 5]. Следует отметить уникальные свойства получаемых пористых керамических материалов, среди которых прочно занимают место высокая механическая прочность, химическая стабильность к большинству моющих и дезинфицирующих растворов, термическая устойчивость, нейтральность к обрабатываемым технологическим жидкостям и т.д.

Для реализации различных способов интенсификации мембранных процессов гидродинамическими методами необходимо создание пористых трубок относительно большого диаметра для возможности размещения внутри них статических или движущихся по заданному алгоритму турбулизирующих устройств (рис. 1, а), а также пористых структур сложных геометрических форм для создания каналов переменного сечения (рис. 1, б).

В настоящее время процессы создания пористых трубок большого диаметра могут быть реализованы с помощью:

– аддитивных технологий 3D-печати с помощью диоксида циркония, оксида алюминия, нитрида кремния, пористой керамики «Silicore», трикальцийфосфата, гидроксиапатита, нитрида алюминия, кордиерита и других гибридных композитных материалов;

– композиционных металлокерамических мембран «Trumem[®]» и «Rusmem[®]», состоящих из подложки из нержавеющей стали и тонкого керамического слоя из оксида титана,

алюминия, циркония или кремния, обладающих гибкостью и поэтому позволяющих спаивать их в пористые трубки большого диаметра или тела со сложной геометрией.

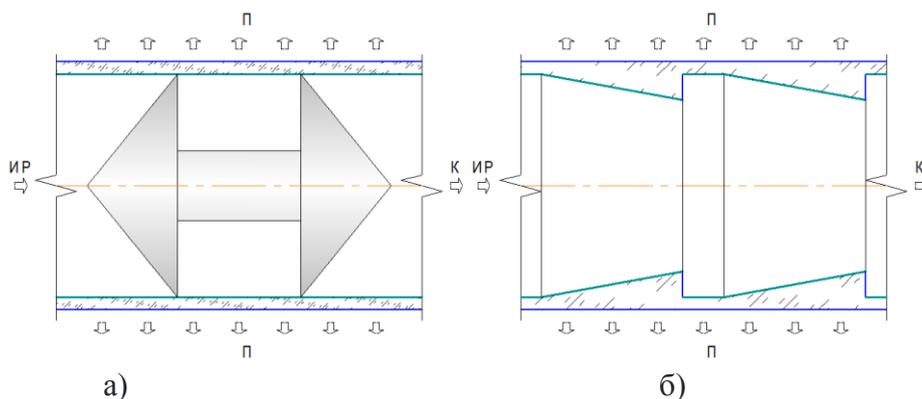


Рисунок 1. Пористые структуры, реализующие интенсификацию мембранных процессов гидродинамическими методами: а) – создание пористых трубок большого сечения; б) – создание пористых трубок сложной геометрической формы: ИР – исходный раствор; П – пермеат; К – концентрат

Целью настоящей работы является разработка научной концепции по развитию техники мембранных технологий, реализующей гидродинамическую неустойчивость на межфазной границе «мембрана – исходный раствор».

Материалы и методы исследований

При выполнении настоящей работы использовались общепринятые для пивоваренной отрасли методы анализа: ГОСТ 12786 – 80 «Пиво. Правила приемки и методы отбора проб», ГОСТ 12787 – 81 «Пиво. Методы определения спирта, действительного экстракта и расчет сухих веществ в начальном сусле», ГОСТ 12788 – 87 «Пиво. Методы определения кислотности», ГОСТ 12789 – 87 «Пиво. Методы определения цвета», ГОСТ 30060 – 93 «Пиво. Методы определения органолептических показателей и объема продукции», ГОСТ 30518 – 97 / ГОСТ Р 50474 – 93 Продукты пищевые. Методы выявления и определения количества бактерий группы кишечных палочек (колиформных бактерии), ГОСТ 30519 – 97 / ГОСТ Р 50480 – 93 Продукты пищевые. Метод выявления бактерий рода *Salmonella*. ГОСТ Р 51154 – 98 «Пиво. Методы определения двуоксида углерода и стойкости».

Специальные методики были основаны на подготовке мембранной техники (модулей, полимерных и керамических мембран) к проведению процессов обработки жидких сред в условиях гидродинамической неустойчивости.

При исследовании фронтальной микрофльтрации использование дисковых перемешивающих устройств остается практически единственным и эффективным способом создания гидродинамической неустойчивости на межфазной границе. Для создания различных вариаций окружных скоростей дискового перемешивающего устройства применяли блок питания Б5 – 47, частоту вращения измеряли тахометром ТЧ 10 – Р.

С учетом всей сложности оценки уровня концентрационной поляризации на поверхности мембраны, ставилась задача анализа удельной проницаемости мембран при различных технических способах создания гидродинамических неустойчивостей на межфазной границе.

Результаты исследований и их обсуждение

Аддитивные технологии 3D-печати пористых керамических материалов. По опыту работы многих лабораторий и фирм по 3D-печати («Smartech Publishing», «Supsi», «MEMTi», «Sintratec», «EngCer SA» и др., существуют два направления использования аддитивных технологий 3D-печати гибридных композиционных материалов [11]:

– одноступенчатая 3D-печать, в ходе которой мембрана изготавливается за одну операцию, с одновременным формированием необходимой геометрической формы и разделительных свойств;

– многоступенчатая 3D-печать в сочетании с дополнительными процессами обработки, в ходе которых сначала изготавливается мембрана требуемой геометрической формы, а затем осуществляется формирование ее разделительных свойств за счет использования связующих компонентов, удаляемых впоследствии при дальнейшей термической обработке.

В основе одно- и многоступенчатой 3D-печати керамических мембран находятся селективное лазерное спекание (SLS-технология), селективное лазерное плавление (SLM-технология), экструзия, струйная печать (3DP и NPj-технологии), двухфотонная полимеризация (TRP-технология), лазерная стереолитография (SLA-технология).

Следует отметить многообещающие перспективы в изготовлении пористых керамических мембран с помощью SLS-технологии – селективном лазерном спекании полимерных порошков, в то время как, например, стереолитографические системы достигли на сегодняшний день предела в технологии 3D-печати элементов со сложной геометрией. Более того, получить пористую структуру, свойственную керамическим мембранам, с помощью SLA-технологии невозможно. На рис. 2 показаны примеры геометрических форм, полученных в результате 3D-печати керамическими материалами по SLS-технологии.

На сегодняшний день в мировой практике существуют технологии, позволяющие успешно изготавливать из пористой керамики различные по геометрической форме и диаметру мембраны для размещения внутри нее различных технических устройств, функционирующих по заданному алгоритму с целью реализации гидродинамической неустойчивости переменной интенсивности [21, 24, 30]. Создание подобных условий на межфазной границе «мембрана – исходный раствор» позволит вывести мембранные процессы на качественно иной уровень обработки технологических жидкостей и решить большинство задач, не реализованных ранее по причине отсутствия технологий и материалов по созданию мембран требуемой конфигурации.

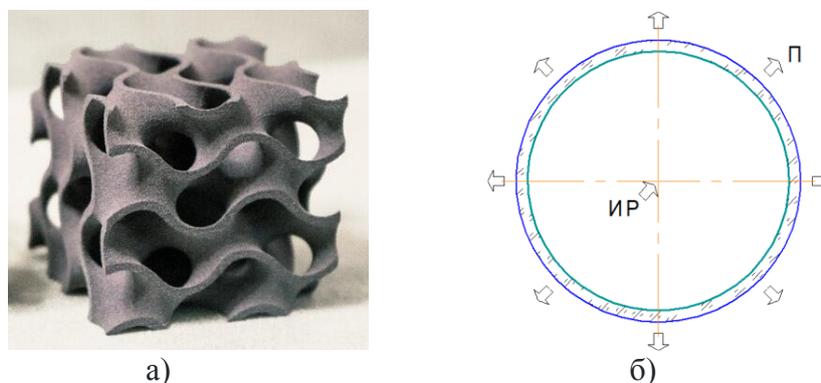


Рисунок 2. Примеры геометрических форм, полученных в результате 3D-печати по SLS-технологии: а) прототип гироидного каталитического нейтрализатора, закручивающих поток отработанных газов «Sintatec» (лаборатория «Supsi» (Швейцария)); б) керамическая пористая трубка большого диаметра: ИР – исходный раствор; П – пермеат

Композиционные металлокерамические мембраны «Trumem[®]» и «Rusmem[®]». Для мембран «Trumem[®]» характерна трехслойная структура, в состав которой входят фильтрующий и промежуточный слои, выполненные на основе оксидов металлов (Al_2O_3 , TiO_2 , ZrO_2), а также подложка, изготовленная из пористого металла (Ni, Fe, Ag, Ti) или пористых сплавов (инконель, хастеллой, фекраллой) [25]. Следует отметить, что подложка, выполненная из металлов, позволяет изготавливать пористые трубки большого диаметра, что представляет определенный научно-практический интерес в совершенствовании мембранных процессов, реализующих принципы создания на межфазной границе «мембрана – исходный раствор» гидродинамической неустойчивости переменной интенсивности. Для мембран «Rusmem[®]» также

характерна многослойная структура, с той лишь разницей, что подложка должна проводить электрический ток [27].

Рассмотренные выше неорганические мембраны обладают высокой стойкостью к истиранию, что особенно актуально для мембранных процессов, организованных по проточной схеме, для обработки технологических жидкостей, содержащих твердые включения. Также характерна высокая устойчивость данных мембран к образованию и распространению трещин. В условиях гидродинамической неустойчивости, созданной, например, динамическими турбулизаторами, струйными устройствами, перемещающимися или вращающимися мембранами, знакопеременными усилиями, вызванными перепадами рабочего давления при реализации пульсационных режимов, данное свойство мембран, безусловно, обладает весомым преимуществом при выборе разделительных систем и условий [4, 13, 22].

Согласно общепринятой классификации способов снижения слоя высокой концентрации на межфазной границе «мембрана – исходный раствор» (рис. 3), существуют [1]:

– технологические приемы, в основу которых заложены принципы, обеспечивающие низкие значения рабочего давления, а также подбор мембраны с таким расчетом, чтобы ей было присуще высокое гидродинамическое сопротивление;

– технологические приемы, реализующие малую разность концентраций между обрабатываемой технологической жидкостью и слоем высокой концентрации на межфазной границе «мембрана – исходный раствор»;

– технологические приемы, обеспечивающие низкие концентрации растворенного вещества в обрабатываемой технологической жидкости.

Техническая реализация гидродинамической неустойчивости на межфазной границе «мембрана – исходный раствор». Следует отметить, что создание низких значений рабочего давления в примембранной области (направление № 1) совершенно не подходит для баромембранных процессов, в частности процессов нанофильтрации и обратного осмоса, прежде всего, из-за их осуществимости, т.к. рабочее давление является основной составляющей движущей силы. В отношении процессов микро- и ультрафильтрации большинства технологических жидкостей, т.е. где не требуется создание высоких значений рабочего давления, данные методы могут быть реализованы за счет использования мембран с высоким гидродинамическим сопротивлением, как правило, с увеличенной толщиной пористой подложки, что также противоречит условиям по обеспечению на межфазной границе «мембрана – исходный раствор» развитой гидродинамической неустойчивости, которая зависит не только от скорости потока, но и от его давления. Вполне очевидно, что данное направление не нашло своего развития в создании определяющих условий по интенсификации мембранных процессов гидродинамическими методами.

Обеспечение низкой концентрации растворенного вещества в исходном растворе (направление № 2) является вполне очевидным правилом как с теоретической, так и технической точек зрения. Однако мембранное разделение и/или концентрирование технологических жидкостей с низкой концентрацией является скорее исключением, чем правилом, в связи с чем данное противоречивое направление не нашло практической реализации.

Обеспечение малой разности концентраций между исходным раствором и слоем высокой концентрации (направление № 3), безусловно, является основополагающим принципом по обеспечению интенсификации мембранных процессов гидродинамическими методами.

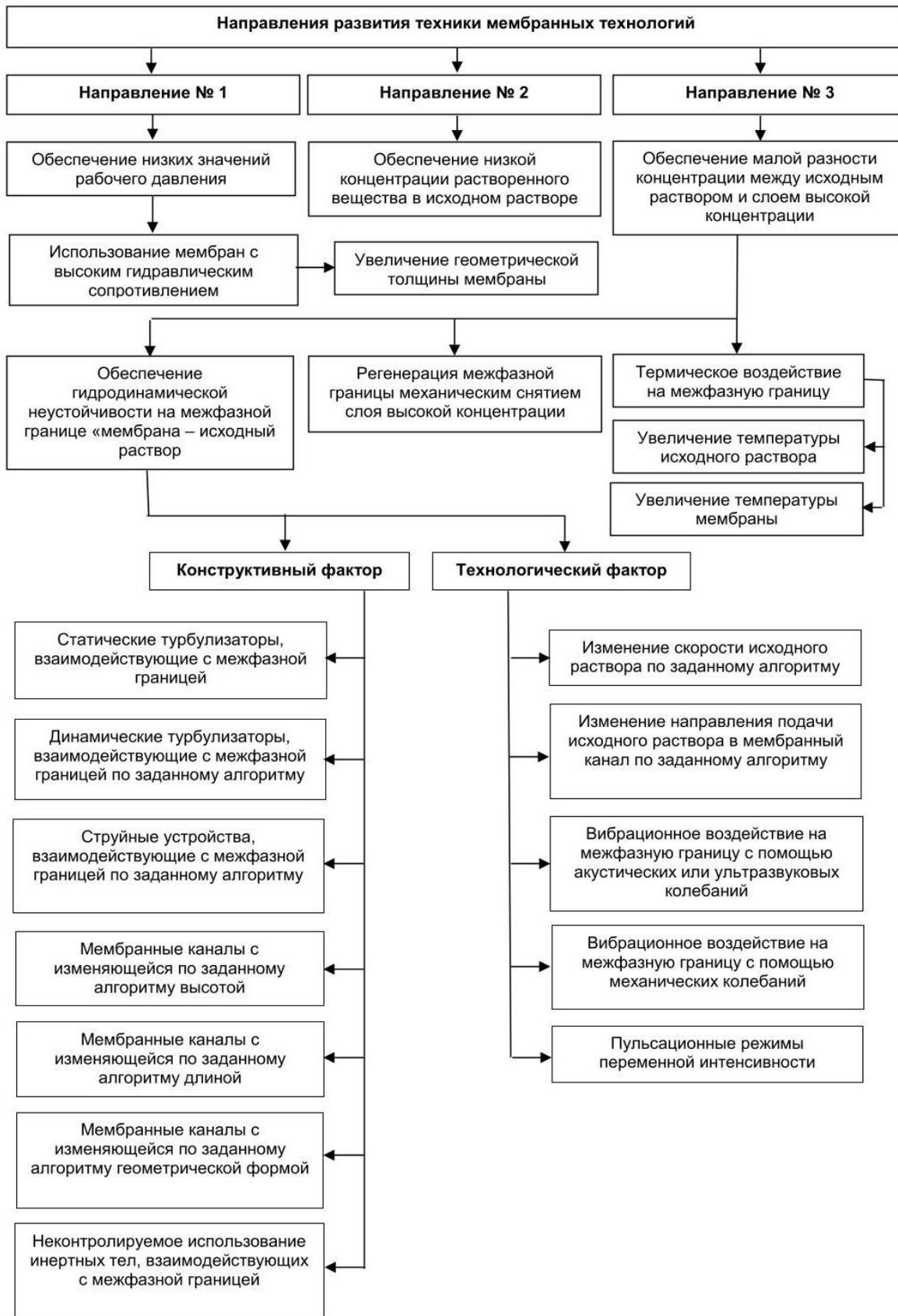


Рисунок 3. Основные направления развития техники мембранных технологий

Рассмотрим некоторые варианты технической реализации гидродинамической неустойчивости на межфазной границе «мембрана – исходный раствор» в рамках данной научной концепции.

Регенерация межфазной границы механическим снятием слоя высокой концентрации. Использование упругого каната с набором перемещающихся и вращающихся турбулизирующих дисков с эластичными лопастями (рис. 4, а) позволяет мягко воздействовать на межфазную границу, исключая механическое повреждение керамической мембраны. Закручивание упругого каната с набором турбулизирующих дисков с эластичными лопастями и последующее устранение его упругой деформации по заданному алгоритму обеспечивает многозадачный режим интенсификации гидродинамических условий, механическое снятие слоя высокой концентрации с поверхности мембраны и его удаление вместе с концентратом из мембранного модуля. Применение эластичных тороидальных турбулизаторов с лопатками (рис. 4, б), попеременно перемещающихся в прямом и обратном направлениях, также позволяет воздействовать на межфазную границу с различным уровнем интенсификации. При этом полностью исключается механическое повреждение керамической мембраны эластичными лопатками тороидального турбулизатора, механическое снятие слоя высокой концентрации с ее поверхности и его удаление вместе с концентратом из мембранного модуля.

Многозадачный режим работы рассмотренных мембранных аппаратов и, как следствие, различный уровень гидродинамического воздействия на межфазную границу, обеспечивается вариациями скорости перемещения технических средств, их количеством, шагом, характером упругости каната, дисков с лопастями, тороидальных турбулизаторов с лопатками и т.д. [16, 18].

Данная мембранная техника весьма эффективна для обработки высоковязких технологических сред или жидкостей, содержащих взвешенные частицы или волокнистые материалы [8, 10, 23].

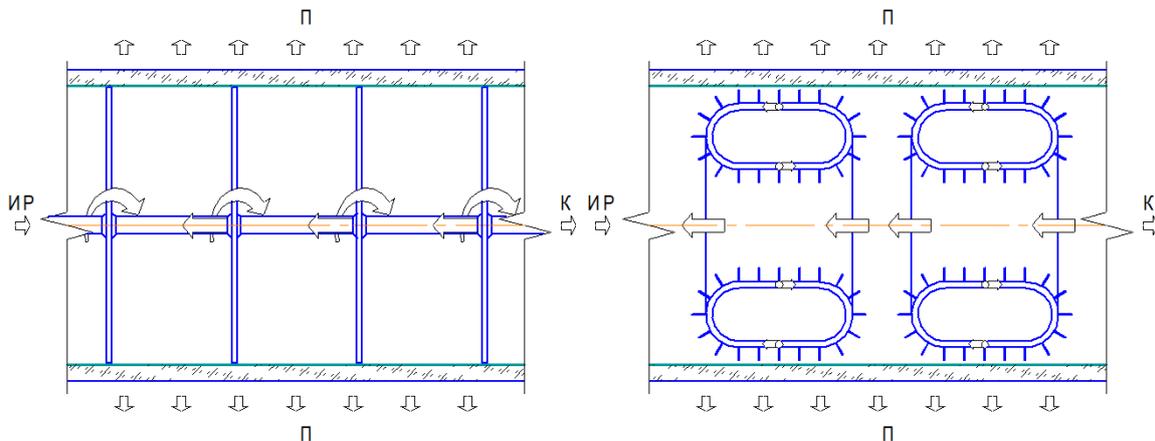


Рисунок 4. Регенерация межфазной границы механическим снятием слоя высокой концентрации: а) упругий канат с набором перемещающихся и вращающихся турбулизирующих дисков; б) тороидальные турбулизаторы с лопатками, перемещающиеся попеременно в прямом и обратном направлениях вдоль межфазной границы

Статические турбулизаторы, взаимодействующие с межфазной границей. Традиционно статические турбулизаторы (рис. 5), размещенные в трубчатых мембранных каналах, признаны решать ограниченный круг вопросов, связанный с гидродинамическим воздействием на межфазную границу [1]. Несмотря на применение статических турбулизаторов со сложной геометрией, достигнуть существенных результатов в снижении уровня концентрационной поляризации не удастся по причине ограниченности технологических приемов и функциональности подобных устройств.

По аналогии со статическими смесителями, размещаемыми в трубчатых каналах для интенсивного перемешивания систем «газ – жидкость» или «жидкость – жидкость», исполь-

зование подобных устройств в случае разделения и/или концентрирования биотехнологических сред чревато деструкцией биологически активных веществ и снижением активности в случае обработки ферментных препаратов [28, 29]. Следует отметить возможное снижение эффективности статических турбулизаторов при смене обрабатываемой технологической жидкости из-за существенного изменения характера оказываемого ими воздействия.

Тем не менее, статические турбулизаторы с успехом могут быть использованы в мембранных процессах очистки воды, обработки технологических сред, не содержащих компонентов, чувствительных к воздействию касательных напряжений.

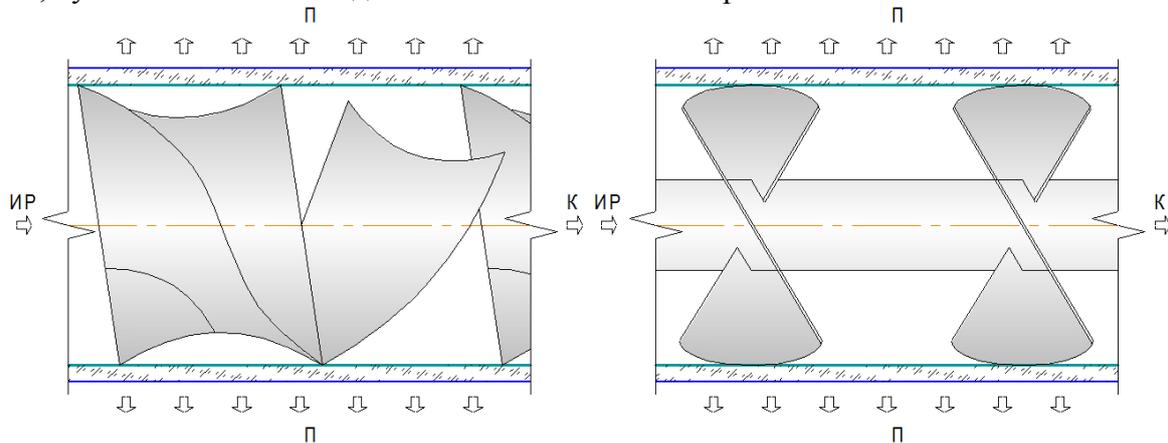


Рисунок 5. Статические турбулизаторы, взаимодействующие с межфазной границей: ИР – исходный раствор; П – пермеат; К – концентрат

Динамические турбулизаторы, взаимодействующие с межфазной границей по заданному алгоритму. Реализация технических решений, представленных на рис. 6 а, позволяет полностью исключить механическое повреждение керамической мембраны во время перемещения турбулизатора за счет удерживания его при помощи направляющих и двойное изменение условий по созданию гидродинамической неустойчивости на межфазной границе за счет конструктивных особенностей детали.

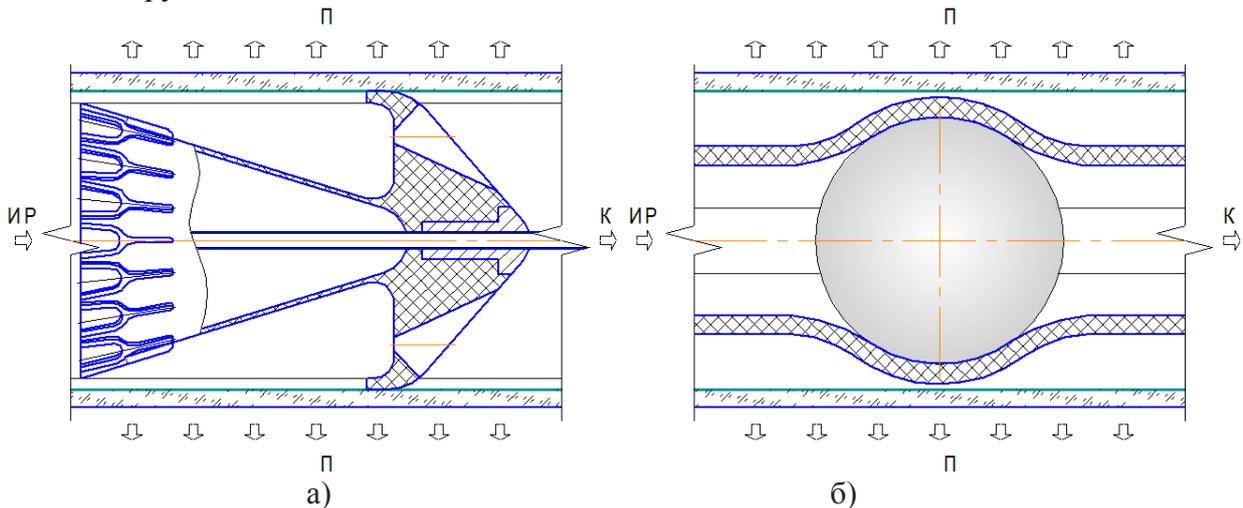


Рисунок 6. Динамические турбулизаторы, взаимодействующие с межфазной границей по заданному алгоритму: а) турбулизатор двойного назначения, перемещающийся навстречу потоку исходного раствора; б) шарообразные элементы, перемещающиеся внутри эластичного непроницаемого рукава навстречу потоку исходного раствора:

ИР – исходный раствор; П – пермеат; К – концентрат

Использование эластичного непроницаемого рукава (рис. 6, б) позволяет обеспечить полную герметичность мембранного аппарата, исключение механического повреждения ке-

рамической мембраны за счет расположения перемещающихся элементов внутри рукава. Многозадачный режим работы мембранных аппаратов с рассмотренными динамическими турбулизаторами обеспечивается вариациями скорости перемещения технических средств, их количеством и конструктивным исполнением, шагом, характером упругости непроницаемого рукава и т.д. Данные технические решения успешно зарекомендовали себя для обработки чувствительных к воздействию касательных напряжений биотехнологических сред, а также культуральных сред, содержащих живые культуры [15, 20]. За счет тщательно подобранного характера гидродинамического воздействия технических средств на межфазную границу, зачастую удается достигнуть компромисса между снижением уровня концентрационной поляризации на поверхности мембраны и качественными показателями обрабатываемой среды.

Струйные устройства, взаимодействующие с межфазной границей по заданному алгоритму. Оригинальным техническим решением по созданию гидродинамической неустойчивости на межфазной границе является использование струйных устройств (рис. 7) для тангенциальной подачи исходного раствора к поверхности мембраны. В этом случае гидродинамическое воздействие струй обрабатываемого потока обеспечивает постоянную регенерацию поверхности мембраны и непрерывное удаление слоя высокой концентрации [17]. Многозадачный режим работы струйного мембранного аппарата обеспечивается вариациями скорости перемещения толкателя с поршнем, за счет которого изменяется давление потока на выходе из форсунок и, следовательно, уровень гидродинамического воздействия на межфазную границу.

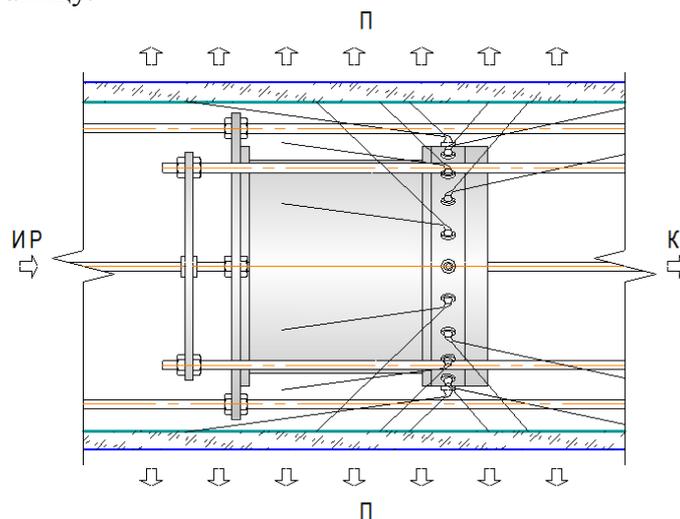


Рисунок 7. Струйные устройства, взаимодействующие с межфазной границей по заданному алгоритму: ИР – исходный раствор; П – пермеат; К – концентрат

Мембранные каналы с изменяющейся по заданному алгоритму геометрической формой. При существующей технической возможности создания керамических мембран со сложными геометрическими формами (рис. 8, а, б) становится возможным проведение процесса в условиях организации развитой гидродинамической неустойчивости в мембранном канале переменного сечения. В этом случае гидродинамические характеристики обрабатываемой среды постоянно изменяются, а слой высокой концентрации уже не может образовывать прочные связи с мембраной из-за непрерывного перераспределения полей скорости и давления в мембранном канале с изменяемой конфигурацией [2, 12, 19]. Многозадачный режим работы данного мембранного аппарата обеспечивается изменением скорости возвратно-поступательного перемещения внутренней подвижной керамической мембраны относительно наружной неподвижной керамической мембраны. Это позволяет в достаточно широких пределах изменять уровень гидродинамического воздействия на межфазную границу.

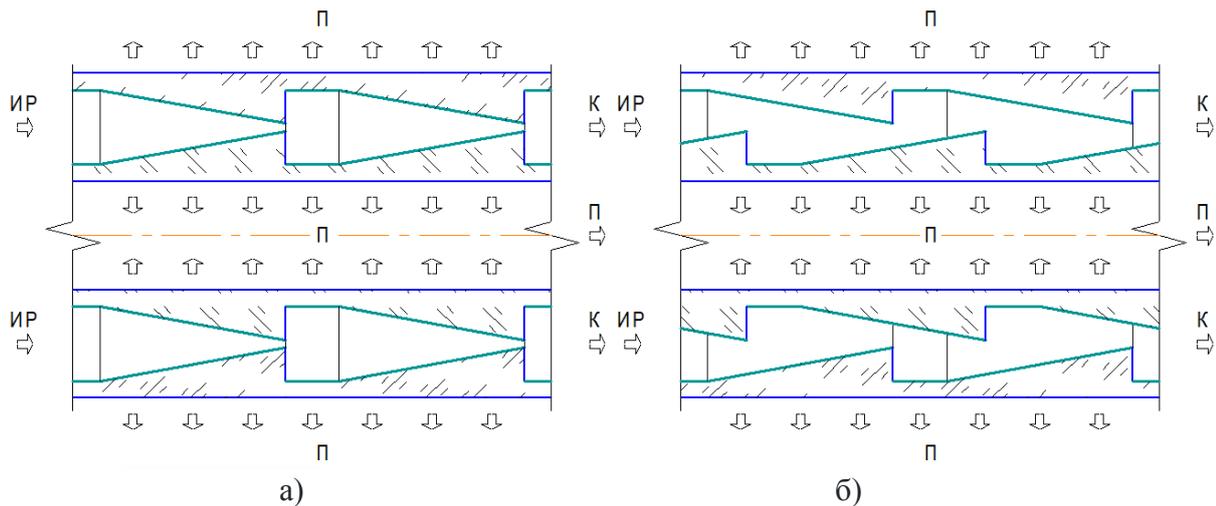


Рисунок 8. Мембранные каналы с изменяющейся по заданному алгоритму геометрической формой: а) геометрическая форма мембранного канала при одном взаимном расположении пористых керамических мембран друг относительно друга; б) геометрическая форма мембранного канала при другом взаимном расположении пористых керамических мембран друг относительно друга: ИР – исходный раствор; П – пермеат; К – концентрат

Неконтролируемое использование инертных тел, взаимодействующих с межфазной границей. Направление по использованию инертных тел в трубчатом мембранном модуле (рис. 9 а, б) технически ограничено по степени интенсивности, которая напрямую зависит от скорости потока исходного раствора. Повлиять на предсказуемый характер воздействия технических средств на межфазную границу, в принципе, невозможно, поэтому данный способ создания гидродинамической неустойчивости нашел ограниченное применение в технике мембранных технологий [1, 6].

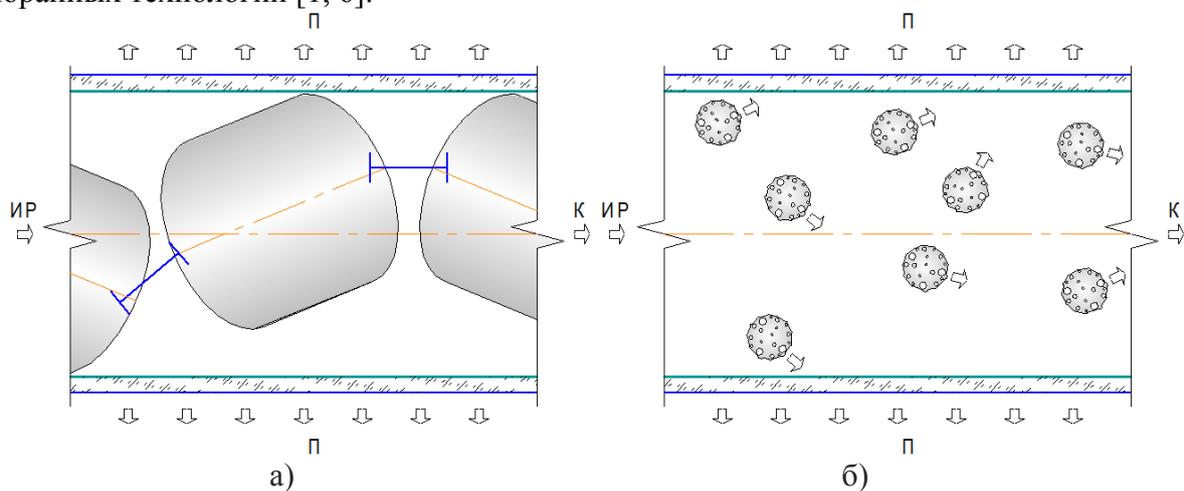


Рисунок 9. Неконтролируемое использование инертных тел, взаимодействующих с межфазной границей: а) полые элементы, соединенные между собой и имеющие возможность перемещения в горизонтальной и вертикальной плоскостях; б) инертные тела, вводимые в мембранный канал, перемещающиеся и соударяющиеся друг с другом и керамической мембраной: ИР – исходный раствор; П – пермеат; К – концентрат

Пульсационные режимы переменной интенсивности. Данный эффект достигается в мембранном канале с помощью возвратно-поступательного движения исходного раствора и/или концентрата, создаваемого различными по конструкции и принципу действия техническими средствами [7, 13, 26]. Гидродинамическое воздействие на межфазную границу обес-

печивается импульсом потенциальной энергии потока, создаваемым образующимися кольцевыми выступами непроницаемого рукава и кольцами, размещенными на поверхности керамической мембраны (рис. 10).

Многозадачный режим работы мембранного аппарата обеспечивается изменением конфигурации профильных элементов, их относительным расположением на валу и частотой вращения последнего [15].

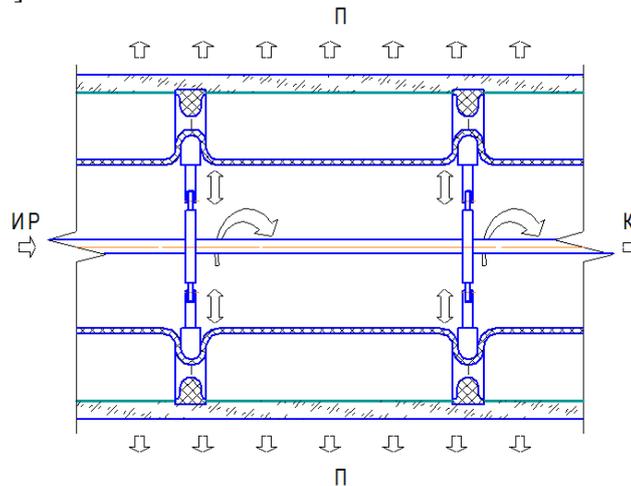


Рисунок 10. Пульсационные режимы переменной интенсивности: ИР – исходный раствор; П – пермеат; К – концентрат

Создание гидродинамической неустойчивости на межфазной границе за счет изменения скорости исходного раствора реализовывали в мембранном модуле с дисковой мешалкой, вращающейся с переменной частотой вращения. Как следует из рис. 11, при увеличении частоты вращения дисковой мешалки до 900 мин^{-1} удельная проницаемость мембраны также возрастала, но до определенного момента, по достижению которого дальнейшее увеличение скорости вращения дисковой мешалки не только не приводило к увеличению производительности, а в отдельных случаях – к ее снижению.

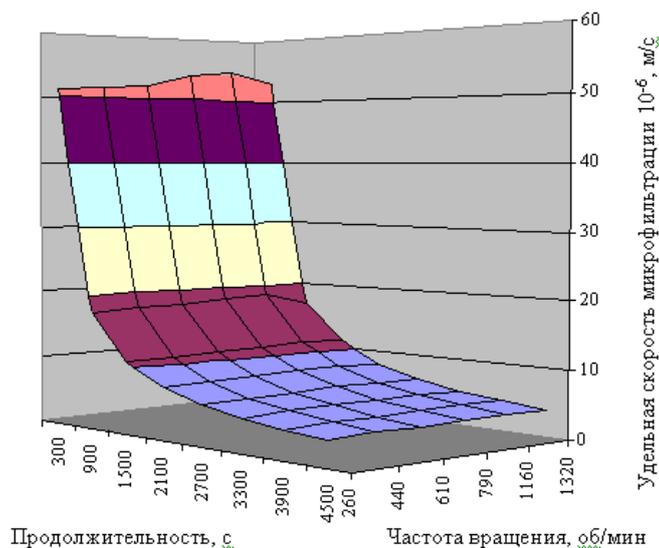


Рисунок 11. Зависимость удельной проницаемости полимерной мембраны от частоты вращения дисковой мешалки

Это происходило за счет образования в центральной части мембраны «нерабочего» участка мембраны из-за высококонцентрированного слоя, непроницаемого для исходного

раствора. В связи с этим не рекомендуется использование больших значений (свыше 900 мин⁻¹) частоты вращения дисковой мешалки. Дополнительное воздействие на межфазную границу может быть усилено вводом в мембранный канал губчатых шариков при совместно работающей мешалке с низкой частотой вращения.

Для исследования зависимости удельной проницаемости мембран от высоты мембранного канала использовался плоскосторонний мембранный модуль с набором уплотнительных прокладок высотой 0,5; 1,5 и 2,5 мм. Как следует из рис.12, удельная проницаемость мембран имела максимальные значения для мембранного канала минимальной высоты, т.е. 0,5 мм. С увеличением высоты мембранного канала уменьшалось значение скорости исходного раствора, следовательно, на межфазную границу оказывалось меньшее гидродинамическое воздействие.

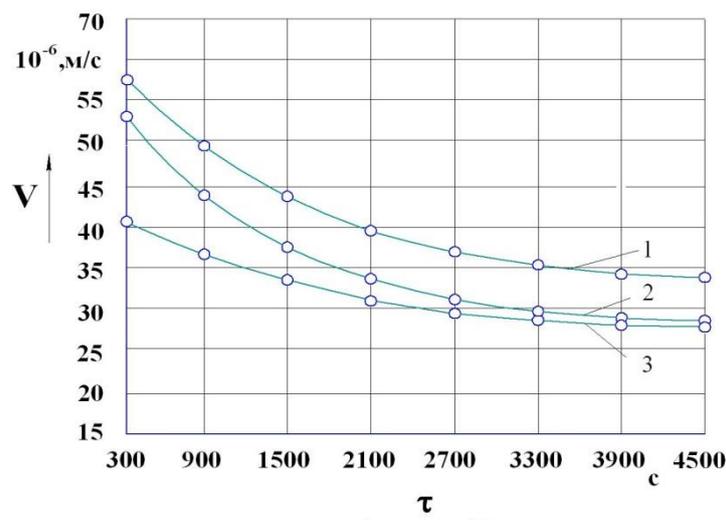


Рисунок 12. Зависимость удельной проницаемости полимерной мембраны от высоты мембранного канала: 1 – 0,5; 2 – 1,5; 3 – 2,5 мм

Таким образом, техническая реализация условий по изменению высоты мембранного канала по заданному алгоритму, безусловно, будет оказывать переменное гидродинамическое воздействие на межфазную границу и тем самым снижать уровень концентрационной поляризации на поверхности мембраны.

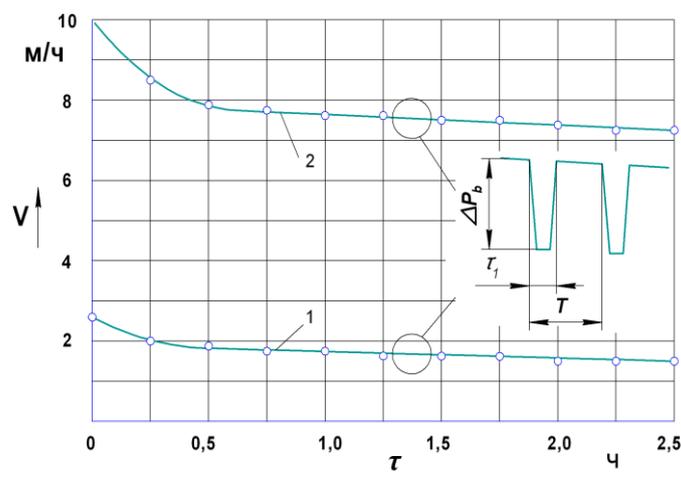


Рисунок 13. Зависимость удельной проницаемости трубочатых керамических мембран с различным размером пор при пульсационном воздействии на межфазную границу по заданному алгоритму: 1 – 0,4 мкм; $\Delta P_b = 0,25$ МПа; $\tau_1 = 3$ с; $T = 600$ с; 2 – 5,0 мкм; $\Delta P_b = 0,10$ МПа; $\tau_1 = 5$ с; $T = 600$ с

Были проведены исследования по влиянию пульсационного воздействия переменной интенсивности на удельную проницаемость трубчатых керамических мембран (рис. 13). При технической реализации пульсационного воздействия с параметрами: частота пульсационного поля – 0,002 Гц; периодичность – 3...5 с; амплитуда пульсационного поля – 0,1...0,25 МПа; удельная проницаемость керамических мембран увеличивается в 1,5...2,0 раза по сравнению с исходными значениями. Т. к. в результате постоянного пульсационного воздействия на межфазную границу у высококонцентрированного слоя не возникало устойчивых связей с поверхностью мембраны, следовательно, он достаточно легко может быть выведен из мембранного канала вместе с потоком концентрата. Благодаря эффекту «раскачивания» потока исходного раствора вблизи межфазной границы создавались более благоприятные условия для проведения мембранного процесса в условиях гидродинамической неустойчивости [1].

Выводы

1. На основании вышесказанного следует отметить положительную тенденцию в повышении эффективности мембранных процессов гидродинамическими методами воздействия на межфазную границу. В силу специфики мембранных процессов, особенно при разделении и концентрировании многокомпонентных технологических сред, трудно бывает остановиться на выборе того или иного способа создания гидродинамической неустойчивости без проведения предварительных исследований физических и физико-химических свойств исходного раствора, а также принципиальной применимости способа с позиций деструктивного воздействия на компоненты обрабатываемой жидкости.

2. Следует отметить резко возрастающую сложность при совместной реализации нескольких способов по созданию гидродинамической неустойчивости на межфазной границе, например, изменение высоты мембранного канала в сочетании с пульсационным воздействием или изменение геометрии мембранного канала при совместном использовании ультразвукового или акустического полей.

3. Сочетание различной геометрии технических средств, размещаемых в трубчатом мембранном модуле, их динамических характеристик, алгоритмов движения, с гидродинамическими параметрами потока исходного раствора создают эффективные условия для научной концепции по созданию техники мембранных технологий с низким уровнем концентрационной поляризации. Все это, в конечном итоге, позволит конструировать более универсальную мембранную технику для решения большинства технологических задач.

Список источников

1. Антипов С.Т., Ключников А.И. Интенсификация процессов переработки жидких пищевых сред мембранными методами: монография; Воронеж. гос. ун-т инж. Технол. Воронеж: ВГУИТ, 2017. 304 с.

2. Гидродинамика течения жидких сред в фильтрующих каналах со сложной формой проницаемой границы / С.А. Светлов, Ф.Ф. Спиридонов, Т.М. Тушкина, О.Р. Светлова // Ползуновский вестник. 2002. № 10. С. 89-94.

3. Гончарук С.Ю., Самборук А.Р. Разработка безвакуумной технологии синтеза пористых металлокерамических фильтров // Современные материалы, техника и технологии, №4 (26). 2019. С. 22-26.

4. Горбунова Ю.А., Тимкин В.А. Гидродинамика процессов микро- и ультрафильтрационного разделения молока и творожного калъе // Аграрный вестник Урала. 2016. № 06 (148). С. 70-75.

5. Гурьянов Д.А., Воронова Г.А. Получение керамических пористых мембран на основе оксида алюминия // Вестник Томского государственного университета. Химия. 2020. № 20. С. 6-19.

6. Жилин Ю.Н. Влияние скорости потока на разделение раствора NaCl в обратноосмотическом рулонном элементе // Вестник МГУЛ – Лесной вестник. 2015. №6. С. 126-131.
7. Исследование процессов гидродинамической очистки артезианских вод / А.Ю. Курбатов, Е.Н. Кузин, Ю.М. Аверина, М.А. Ветрова, А.В. Ситников // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2021. № 2 С. 118-133.
8. Кудряшов В.Л., Кислов А.С., Преснякова О.П. Комплексная линия переработки вторичного сырья пивзаводов на основе мембранных процессов // Пиво и напитки №2. 2008. С. 22-25.
9. Кулагин В.А., Ивченко О.А., Кулагина Л.В. Актуальные тенденции развития мембранных технологий // Журнал СФУ. Техника и технологии. 2017. № 1. С. 24-35.
10. Моделирование мембранных установок непрерывного действия, укомплектованных аппаратами с отводом диффузионного слоя / Б.А. Лобасенко, В.Н. Иванец, Е.К. Сазонова, А.Е. Стефанкин, Р.В. Котляров // Техника и технология пищевых производств. 2016. Т. 42. № 3. С. 112-117.
11. Лысыч М.Н., Шабанов М.Л., Качурин А.А. Обзор современных технологий 3D-печати // Современные наукоемкие технологии. 2015. № 6. С. 26 – 30.
12. Мысак А.П., Корж К.О., Ишмухаметова Р.И. Теоретическое исследование формы турбулизатора на эффективность систем обессоливания воды // Форум молодых ученых. 2019. №6 (34). С. 818-823.
13. Очистка водных потоков в мембранном аппарате пульсационного типа / А.М. Азимов, Р.Ш. Абиев, Б.С. Шакиров, К.Т. Жантасов // Известия СПбГТИ(ТУ). 2014. № 23. С. 62-65.
14. Пат. № 2174432 РФ МПК7 В01 D63/06. Мембранный аппарат с нестационарной гидродинамикой / Кретов И.Т., Шахов С.В., Ключников А.И., Ряжских В.И.; заявитель и патентообладатель Воронеж. гос. технол. акад. № 2000130308/12, заявл. 04.12.2000; опубл. 10.10.2001; Бюл. № 28.
15. Пат. № 2238794 РФ МПК7 В01 D63/06 Мембранный аппарат с импульсным режимом фильтрации / Кретов И.Т., Востриков С.В., Ключников А.И., Ключникова Д.В.; заявитель и патентообладатель Воронеж. гос. технол. акад. № 2004113915/15, заявл. 05.05.2004; опубл. 27.05.2005; Бюл. № 15.
16. Пат. № 2251446 РФ МПК7 В01D63/06 Мембранный аппарат для фильтрации вязких жидкостей / Кретов И.Т., Востриков С.В., Ключников А.И., Ключникова Д.В.; заявитель и патентообладатель Воронеж. гос. технол. акад. № 2004106068/15, заявл. 01.03.2004; опубл. 10.05.2005; Бюл. № 13.
17. Пат. № 2252815 РФ МПК7 В01 D63/06 Мембранный аппарат со струйными потоками / Кретов И.Т., Востриков С.В., Ключников А.И., Ключникова Д.В.; заявитель и патентообладатель Воронеж. гос. технол. акад. № 2004113915/15, заявл. 05.05.2004; опубл. 27.05.2005; Бюл. № 15.
18. Пат. № 2269373 РФ МПК В01 D63/06 (2006.01) Мембранный аппарат с тороидальными турбулизаторами / Кретов И.Т., Ключников А.И.; заявитель и патентообладатель Воронеж. гос. ун-т инж. технол. №2004120588/15, заявл. 05.07.2004; опубл. 10.02.2006; Бюл. № 4.
19. Пат. № 2280496 РФ МПК В01 D63/06 (2006.01) Мембранный аппарат с переменным сечением потока / Кретов И.Т., Ключников А.И., Ключникова Д.В.; Воронеж. гос. технол. акад. № 2005101157/15, заявл. 19.01.2005; опубл. 27.07.2006; Бюл. № 21.
20. Пат. № 2680459 РФ Мембранный аппарат с турбулизатором двойного действия / Ключников А.И., Шахов С.В., Ключникова Д.В., Корышева Н.Н., Самохин С.А.; заявитель и патентообладатель Воронеж. гос. ун-т инж. технол. № 2018111226, заявл. 29.03.2018; опубл. 21.02.2019; Бюл. № 6.

21. Перспективность использования аддитивных методов в технологии производства керамических материалов / А.Н. Рогова, М.С. Чувикина, А.В. Беляков, М.А. Вартамян, Е.А. // Успехи в химии и химической технологии. Т. XXXIV. 2020. № 5. С. 83-85.
22. Повышение проницаемости мембран при разделении жидких высокомолекулярных полидисперсных систем / С.П. Бабенышев, С.А. Емельянов, В.Е. Жидков, Д.С. Мамай, Н.А. Шапаков // Вестник АПК Ставрополя. 2014. № 4(16). С. 12-16.
23. Совершенствование технологии переработки молочного сырья с использованием мембранных аппаратов нового типа / Б.А. Лобасенко, Р.В. Котляров, Е.К. Сазонова, Е.А. Вагайцева, А.В. Скоморохов // Техника и технология пищевых производств. 2019. Т. 49. № 4. С. 587-593.
24. Технология получения керамических изделий сложной формы из ZrO_2 посредством DLP 3D-печати / С.В. Смирнов, К.В. Малютин, П.В. Проценко, Т.О. Оболкина, М.А. Антонова, О.А. Гольдберг, Г.П. Кочанов, Д.Р. Хайрутдинова, С.М. Баринов // Труды Кольского научного центра РАН. Химия и материаловедение. Вып. 5. 2021. Т. 11. № 2. С. 239-242.
25. Трусов Л.И. Новые мембраны «Trumem[®]» и «Rusmem[®]», основанные на гибкой керамике // Крит. Технологии. Мембраны. 2001. № 9. С. 20-27.
26. Усынина А.Е., Бородина Л.В. Новый подход к изучению процесса ультрафильтрации с турбулентными пульсациями и переменным давлением // Вестник РУДН. 2015. № 4. С. 50-58.
27. Фарносова Е.Н., Степаненко А.В., Степаненко Е.В. Получение керамических мембран золь-гель методом // Успехи в химии и химической технологии. Т. XXXIV. 2020. № 6. С. 41-43.
28. Effect of spacer and crossflow velocity on the critical flux of bidisperse suspensions in microfiltration H.J. Tanudjaja, W. Pee, A.G. Fane, J.W. Chew // Journal of Membrane Science. Vol. 513. 1 September 2016. P. 101-107.
29. Beer microfiltration under conditions of hydrodynamic instability at the «membrane-product» interface / Klyuchnikov A.I., Ovsyannikov V.Yu., Lobacheva N.N., Toroptsev V.V., Klyuchnikova D.V. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall. Krasnoyarsk, Russian Federation. 2021. Pp. 22-28.
30. Chen Z., Li Z., Li J., Liu C., Liu C., Li Y., Wang P., Yi H., Lao C., Yuelong F. 3D printing of ceramics: A review // Journal of the European Ceramic Society. Vol. 39. Issue 4. April 2019. Pp. 661-687.

References

1. Antipov S.T., Klyuchnikov A. I. Intensification of the processes of processing liquid food media by membrane methods: monograph. Voronezh. state un-t engineer Technol. Voronezh: VGUIT Publ., 2017. 304 p.
2. Hydrodynamics of the flow of liquid media in filter channels with a complex shape of the permeable boundary. S.A. Svetlov, F.F. Spiridonov, T.M. Tushkina, O.R. Svetlova. Polzunovskiy Bulletin, 2002, no. 10, pp. 89-94.
3. Goncharuk S.Yu., Samboruk A.R. Development of a vacuum-free technology for the synthesis of porous metal-ceramic filters. Modern materials, equipment and technologies, no. 4 (26), 2019, pp. 22-26.
4. Gorbunova Yu.A., Timkin V.A. Hydrodynamics of the processes of micro- and ultrafiltration separation of milk and curd cauliflower. Agrarian Bulletin of the Urals, 2016, no. 06 (148), pp. 70-75.
5. Guryanov D.A., Voronova G.A. Obtaining ceramic porous membranes based on aluminum oxide. Tomsk State University Bulletin. Chemistry, 2020, no. 20, pp. 6-19.
6. Zhilin Yu.N. Influence of the flow rate on the separation of the NaCl solution in a reverse osmosis roll element. Vestnik MGUL – Forest Bulletin, 2015, no 6, pp. 126-131.

7. Kurbatov A.Yu., Kuzin E.N., Averina Yu.M., Vetrova M.A., Sitnikov A.V. Study of the processes of hydrodynamic purification of artesian waters. Bulletin of the Moscow State Technical University. N. E. Bauman. Ser. Natural Sciences, 2021, no. 2, pp. 118-133.
8. Kudryashov V.L., Kislov A.S., Presnyakova O.P. Complex line for processing secondary raw materials of breweries based on membrane processes. Beer and drinks, 2008, no. 2, pp. 22-25.
9. Kulagin V.A., Ivchenko O.A., Kulagina L.V. Actual trends in the development of membrane technologies. Journal of Siberian Federal University. Technics and technology, 2017, no. 1, pp. 24-35.
10. Modeling of continuous membrane installations equipped with devices with diffusion layer removal. B.A. Lobasenko, V.N. Ivanets, E.K. Sazonova, A.E. Stefankin, R.V. Kotlyarov. Food technology and technology productions, 2016, vol. 42, no. 3, pp. 112-117.
11. Lysych M.N., Shabanov M.L., Kachurin A.A. Overview of modern 3D printing technologies. Modern science-intensive technologies, 2015, no. 6, pp. 26-30.
12. Mysak A.P., Korzh K.O., Ishmukhametova R. I. Theoretical study of the shape of the turbulator on the efficiency of water desalination systems. Forum of Young Scientists, 2019, no. 6 (34), pp. 818-823.
13. Purification of water flows in a membrane apparatus of a pulsating type. A.M. Azimov, R.Sh. Abiev, B.S. Shakirov, K.T. Zhantasov. News SPbGTI(TU), 2014, no. 23, pp. 62-65.
14. Pat. No. 2174432 RU MPK7 B01 D63/06. Membrane apparatus with non-stationary hydrodynamics. Kretov I.T., Shakhov S.V., Klyuchnikov A.I., Ryazhskikh V.I.; applicant and patent holder Voronezh. state technol. acad. No. 2000130308/12, appl. 04.12.2000; publ. 10.10.2001; bull. no. 28.
15. Pat. No. 2238794 RU MPK7 B01 D63/06 Membrane apparatus with pulsed filtration mode. Kretov I.T., Vostrikov S.V., Klyuchnikov A.I., Klyuchnikova D.V.; applicant and patent holder Voronezh. state technol. acad. No. 2004113915/15, appl. 05/05/2004; publ. May 27, 2005; bull. no. 15.
16. Pat. No. 2251446 RU MPK7 B01D63/06 Membrane apparatus for filtration of viscous liquids. Kretov I.T., Vostrikov S.V., Klyuchnikov A.I., Klyuchnikova D.V.; applicant and patent holder Voronezh. state technol. acad. No. 2004106068/15, appl. 03/01/2004; publ. May 10, 2005; bull. no. 13.
17. Pat. No. 2252815 RU MPK7 B01 D63/06 Membrane apparatus with jet streams. Kretov I.T., Vostrikov S.V., Klyuchnikov A.I., Klyuchnikova D.V.; applicant and patent holder Voronezh. state technol. acad. No. 2004113915/15, appl. 05/05/2004; publ. May 27, 2005; bull. no. 15.
18. Pat. No. 2269373 RU MPK7 B01 D63/06 (2006.01) Membrane apparatus with toroidal turbulators. I.T. Kretov, A.I. Klyuchnikov; applicant and patent holder Voronezh. state un-t engineer technol. No. 2004120588/15, appl. 07/05/2004; publ. 02/10/2006; bull. no. 4.
19. Pat. No. 2280496 RU MPK7 B01 D63/06 (2006.01) Membrane apparatus with variable flow cross section. Kretov I.T., Klyuchnikov A.I., Klyuchnikova D.V.; Voronezh. state technol. acad. No. 2005101157/15, appl. 01/19/2005; publ. 07/27/2006; bull. no. 21.
20. Pat. No. 2680459 RU MPK7 B01 D63/06 (2006.01) Membrane apparatus with a double-acting turbulator. Klyuchnikov A.I., Shakhov S.V., Klyuchnikova D.V., Korysheva N.N., Samokhin S.A.; applicant and patent holder Voronezh. state un-t engineer technol. No. 2018111226, appl. 03/29/2018; publ. 02/21/2019; bull. no. 6.
21. Prospects of using additive methods in the production technology of ceramic materials. A.N. Rogova, M.S. Chuvikina, A.V. Belyakov, M.A. Vartanyan, E.A. Advances in chemistry and chemical technology, vol. XXXIV, 2020, no. 5, pp. 83-85.
22. Increasing the permeability of membranes during the separation of liquid high-molecular polydisperse systems. S.P. Babenyshev, S.A. Emelyanov, V.E. Zhidkov, D.S. Mamai, N.A. Shapakov. Bulletin of the APK of Stavropol, 2014, no. 4 (16), pp. 12-16.

23. Lobasenko B.A., Kotlyarov R.V., Sazonova E.K., Vagaitseva E.A., Skomorokhov A.V. Improving the technology of processing dairy raw materials using membrane devices of a new type. *Technique and technology of food production*, 2019, vol. 49, no. 4, pp. 587-593.
24. Technology for obtaining ceramic products of complex shape from ZrO₂ using DLP 3D printing. S.V. Smirnov, K.V. Malyutin, P.V. Protsenko, T.O. Obolkina, M.A. Antonova, O.A. Goldberg, G.P. Kochanov, D.R. Khairutdinova, S.M. Barinov. *Proceedings of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. Chemistry and materials science*, issue. 5, 2021, vol. 11, no. 2, pp. 239-242.
25. Trusov L.I. New membranes «Trumem[®]» and «Rusmem[®]» based on flexible ceramics. *Krit. Technologies. membranes*, 2001, no. 9, pp. 20-27.
26. Usynina A.E., Borodina L.V. A new approach to the study of the process of ultrafiltration with turbulent pulsations and variable pressure. *Herald RUFU University*, 2015, no. 4, pp. 50-58.
27. Farnosova E.N., Stepanenko A.V., Stepanenko E.V. Production of ceramic membranes by the sol-gel method. *Advances in chemistry and chemical technology*, vol. XXXIV, 2020, no. 6, pp. 41-43.
28. Effect of spacer and crossflow velocity on the critical flux of bidisperse suspensions in microfiltration H.J. Tanudjaja, W. Pee, A.G. Fane, J.W. Chew. *Journal of Membrane Science*, vol. 513, 1 September 2016, pp. 101-107.
29. Beer microfiltration under conditions of hydrodynamic instability at the «membrane-product» interface. Klyuchnikov A.I., Ovsyannikov V.Yu., Lobacheva N.N., Toroptsev V.V., Klyuchnikova D.V. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall. Krasnoyarsk, Russian Federation, 2021, pp. 22-28.
30. Chen Z., Li Z., Li J., Liu C., Liu C., Li Y., Wang P., Yi H., Lao C., Yuelong F. 3D printing of ceramics: A review // *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 39, issue 4, April 2019, pp. 661-687.

Информация об авторе

А.И. Ключников – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры технологии виноделия, броидильных производств и химии им. Г.Г. Агабальянца.

Information about the author

A.I. Klyuchnikov – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Winemaking Technology, Fermentation and Chemistry named after. G.G. Agabalyants.