

ОЦЕНКА ГАЗОТРАНСПОРТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕМБРАН В МОДЕЛИРОВАНИИ: ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА РАЗДЕЛЕНИЯ ВОЗДУХА

© К. А. Смородин¹, А. А. Атласкин¹, С. С. Крючков¹, А. Н. Степакова¹,
Н. С. Цивковский¹, М. Е. Атласкина¹, А. Н. Петухов¹, А. В. Воротынцев²,
И. В. Воротынцев¹

¹ Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева,
125047, г. Москва, Миусская пл., д. 9

² Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского,
603950, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, д. 23
E-mail: smorodin.k.a@muctr.ru

Поступила в Редакцию 12 июля 2024 г.

После доработки 26 февраля 2025 г.

Принята к публикации 26 февраля 2025 г.

Определены газотранспортные характеристики полиимидной полуволоконной мембраны методом постоянного объема–переменного давления с масс-спектрометрическим детектированием. Рассмотрены случаи транспорта через мембрану как индивидуальных газов, так и компонентов реальной газовой смеси — воздуха. Выполнено моделирование газоразделительного процесса, проведена его технико-экономическая оценка с последующим сравнением результатов расчета с экспериментальными данными, полученными в широком диапазоне значений площади мембраны. Выявлено, что проведение технико-экономической оценки процесса, основанной на использовании газотранспортных характеристик мембраны, полученных для индивидуальных газов, приводит к ошибкам в оценке необходимой площади мембраны для достижения целевых показателей процесса, последнее приводит к некорректному определению себестоимости проведения процесса. Так, расхождение в значениях требуемой площади мембраны для получения необходимого состава потока продукта достигает 33%, что может вести к неверной оценке капитальных затрат или вовсе к недостижению задачи газоразделения.

Ключевые слова: мембранное газоразделение; полиимид; математическое моделирование; азот; кислород; разделение воздуха; технико-экономический анализ; газотранспортные характеристики

DOI: 10.31857/S0044461825010043; EDN: LJXIIU

Одним из важных процессов химической технологии является разделение воздуха на компоненты — чистые азот, кислород и благородные газы (гелий, аргон, ксенон, неон, криптон). Чистый азот может быть использован как инертная среда в химической и нефтегазовой промышленности; азот — основное сырье для производства аммиака и азотистых удобрений.

В промышленности для разделения воздуха на компоненты чаще всего используют криогенную ректификацию, короткоцикловую адсорбцию и мембранное газоразделение.

Криогенная ректификация — наиболее популярный и развитый метод [1]. Его применение позволяет

обеспечить высокий выход продукта, однако имеет ряд весомых недостатков: крайне высокое энергопотребление, сложное технологическое оформление, а также плохо масштабируется, что делает его применение в производстве весьма нетривиальной задачей.

Часто применяют для разделения воздуха метод короткоцикловой адсорбции [2]. Метод достаточно эффективен для среднетоннажных производств, хотя также имеет ряд недостатков, удорожающих производство чистых компонентов воздуха: сложность технологического оформления и высокое энергопотребление.

Поскольку многие производства стремятся к снижению энергопотребления, привлекательной альтернативной технологией разделения воздуха становится метод мембранного газоразделения. Мембранные установки способны разделять газовые смеси на компоненты при комнатной температуре без каких-либо фазовых переходов, что снимает потребность в подаче и (или) отведении тепла [3]. В ряде исследований отмечается, что мембранное газоразделение позволяет в одну стадию получить азот чистотой >99 об% и кислород чистотой 50 об% [4].

Большинство исследований, посвященных изучению газотранспортных характеристик газоразделительных мембран, предоставляют данные только о проницаемости индивидуальных газов и на основе этих данных рассчитывают идеальную селективность [5, 6]. Однако подобных данных может быть недостаточно при выборе мембранных материалов для использования в той или иной задаче разделения, будь то разделение дымовых газов или разделение воздушной смеси. Такой подход нельзя назвать адекватным, так как в реальности идеальные условия не достигаются и на процесс разделения влияет множество факторов.

Одним из ключевых методов проектирования любой промышленной установки сегодня является математическое моделирование [7, 8]. К сожалению, эффективность применения математического моделирования в значительной степени ограничивается качеством используемых моделей [9].

Как правило, для расчетов параметров мембранных установок используют газотранспортные характеристики мембран, полученные для чистых газов, что не позволяет проводить адекватную оценку эффективности технологической схемы в условиях разделения реальных газовых сред нефтегазовой и химической промышленности. Это может приводить к ошибкам при проектировании мембранных аппаратов и некорректной оценке операционных и капитальных расходов. При использовании газотранспортных характеристик не учитывается главным образом взаимодействие между молекулами индивидуальных газов — их взаимная диффузия, различие в растворимостях в полимере и другие факторы, которые могут приводить к значительным ошибкам при расчетах.

Цель работы — исследование влияния применения смесевых газотранспортных характеристик коммерчески доступных полимерных мембран на основе полиимида на результаты технико-экономического анализа процесса газоразделения.

Экспериментальная часть

Определение газотранспортных характеристик полуволоконной мембраны в рамках настоящего исследования было проведено на коммерчески доступной мембране из полиимида производства компании FRSTEC (Shandong Furuishi Technology & Equipment Co., Ltd). Для исследования проницаемостей индивидуальных газов использовали чистые газы, являющиеся основными компонентами воздуха, а именно N_2 (99.9995 об%), O_2 (99.99 об%). Также в работе использовали He (99.995 об%) в качестве продувочного газа для очистки мембранного модуля и газораспределительной системы между экспериментами и Ar (99.999 об%) в качестве внутреннего стандарта масс-спектрометра в составе экспериментального стенда. Газы, применяемые в работе, были произведены в ООО «НИИ КМ».

Для исследования газотранспортных характеристик мембран были изготовлены мембранные модули на основе трубки из нержавеющей стали марки AISI 316 (Hy-lok). Внутри кожуха модуля помещали полуволоконные мембраны на основе полиимида, герметизацию торцов осуществляли с помощью эпоксидного компаунда с глубиной заливки около 10 мм (рис. 1).

Исследование газотранспортных характеристик полуволоконных мембран проводили на экспериментальном стенде с масс-спектрометрическим детектированием компонентов газовой смеси (рис. 2). Газораспределительная система установки включает в себя регуляторы расхода газа. Три регулятора расхода газа (Bronkhorst FG-201CV) отвечают за подачу в систему индивидуальных газов. Также с их помощью получают газовые смеси в режиме динамического смешения в камере смешивания. Остальные регуляторы расхода газа — Bronkhorst F201CV, Bronkhorst F201CM — необходимы для продувки системы ге-



Рис. 1. Модуль для исследования газотранспортных характеристик полуволоконных газоразделительных мембран на основе полиимида.

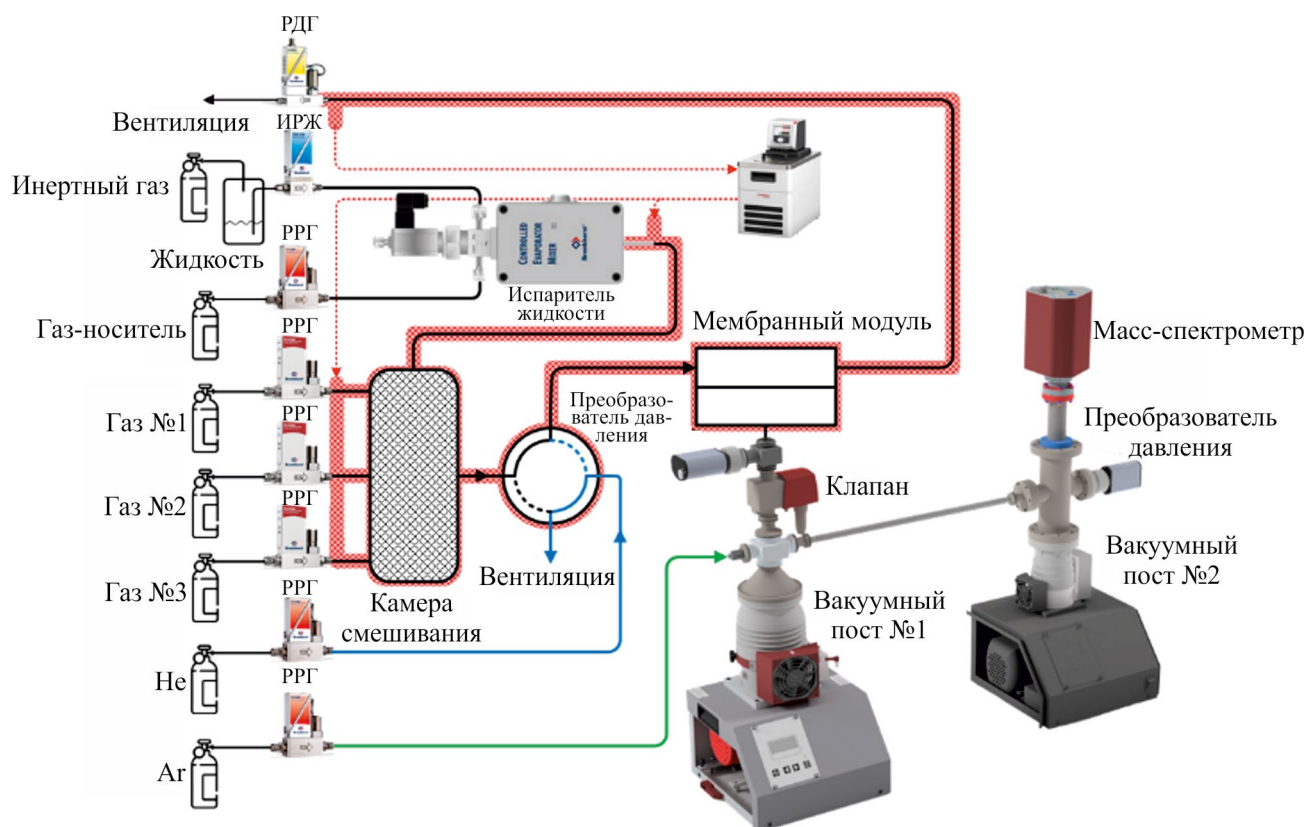


Рис. 2. Принципиальная схема установки для определения газотранспортных характеристик мембраны в сопряжении с масс-спектрометром.

РРГ — регулятор расхода газа, ИРЖ — измеритель расхода жидкости, РДГ — регулятор давления газа.

лием, а также для подачи аргона, используемого в качестве внутреннего стандарта масс-спектрометра.

Полость высокого давления мембранного модуля через четырехходовой двухпозиционный клапан соединяется с камерой смешивания или линией подачи гелия. С помощью регулятора давления, функционирующего в режиме «до себя» (Bronkhorst P702CM), в полости высокого давления происходит поддержание постоянного значения давления. Полость низкого давления мембранного модуля через KF-фланец соединена с вакуумным постом, который включает в себя мембранный и турбомолекулярный насосы (Pfeiffer Hi-Cube ECO 300), обеспечивающие необходимое разрежение в подмембранном пространстве. Контроль показаний давления в подмембранном пространстве осуществляют с помощью преобразователя давления (Pfeiffer MPT200); в систему также интегрирован мембранный клапан с электромагнитным приводом (Pfeiffer DVC 025 PX), который необходим для отключения вакуумного оборудования от подмембранного пространства в случае повреждения мембраны и резкого роста давления. Первый откачной пост соединен через патрубок со вторым

откачным постом. Второй вакуумный пост (Pfeiffer Hi-Cube 80 Eco) через крестовину присоединяется к камере масс-спектрометра (Pfeiffer PrismaPro QMG 250 M2), где создает необходимое разрежение для работы прибора.

Перед началом эксперимента осуществляют подготовку газораспределительной системы: из подмембранного пространства, камеры смешивания газов и магистралей удаляют газ с помощью двух вакуумных постов до достижения необходимых значений давления в системе. Для очистки газовых магистралей перед проведением эксперимента мембранный модуль прокачивается постоянным потоком гелия ($50\text{--}150\text{ см}^3\cdot\text{мин}^{-1}$); одновременно с этим необходимые газы/газовая смесь подаются в камеру смешивания через РРГ (общий объемный расход $200\text{ см}^3\cdot\text{мин}^{-1}$). Аргон, используемый в качестве внутреннего стандарта масс-спектрометра, подают в вакуумную часть газораспределительной системы со скоростью $4\text{ см}^3\cdot\text{мин}^{-1}$. Концентрацию газов отслеживают с помощью квадрупольного масс-спектрометра Pfeiffer Vacuum Prisma Pro QMG 250 M2, функционирующего в режиме мониторинга выбранных ионов, где спектр

формируется с задержкой опроса детектора 1 мс. Подмембранное пространство вакуумируют с помощью турбомолекулярных насосов вакуумных постов до тех пор, пока спектральные сигналы примесных компонентов воздуха не достигнут стабильных минимальных значений; далее осуществляют запуск эксперимента.

В начале эксперимента двухпозиционный кран переводят в положение, которое соединяет камеру смешивания и полость высокого давления в мембранном модуле (время переключения крана составляет 8 мс), где газ из камеры смешивания попадает в полость высокого давления и начинает проникать через мембрану, далее из подмембранного пространства попадает в камеру масс-спектрометра. В данном режиме снимают показания с контрольно-измерительной аппаратуры. Регистрацию показаний давления в полости высокого давления и объемных расходов газов осуществляют через программное обеспечение FLOW PLOT. Давление в подмембранном пространстве и в камере масс-спектрометра отслеживают через программное обеспечение PV TurboViewer. Масс-спектр компонентов газовых смесей записывают в программе PV MassSpec.

Для изучения газотранспортных характеристик мембран изначально были созданы мембранные модули на основе трубки из нержавеющей стали. Исследования газотранспортных характеристик проводили по компонентам, входящим в состав воздуха, а именно O_2 и N_2 . По каждому исследуемому компоненту рассчитывают объемный поток пермеата. На основе имеющихся данных об эффективной площади мембраны, величине потока пермеата и данных о перепаде давления проводят расчет проницаемости, измеряемой в графических единицах GPU.

Было проведено исследование газотранспортных характеристик по компонентам воздуха. Эксперимент проводили в аналогичных условиях, только в данном случае вместо чистых газов в газораспределительную систему установки подавали воздух с помощью воздушного компрессора. Измерение проводили при величине доли отбора, равной 0.01.

Значение проницаемости рассчитывали в соответствии с выражением

$$Q = \frac{J_i}{\Delta p A}, \frac{\text{см}^3}{\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{см рт. ст.}}, \quad (1)$$

где J_i — объемный расход i -того компонента в пермеате ($\text{см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$), Δp — разность парциальных давлений газа через мембрану (см рт. ст.), A — площадь мембраны (см^2).

Программное обеспечение масс-спектрометра позволяет преобразовать сигнал каждого компонента в значение его парциального давления. Исходя из этого, можно получить объемный расход пермеата по следующей формуле:

$$\frac{J_i}{J_{Ar}} = \frac{p_i}{p_{Ar}}, \quad (2)$$

где J_{Ar} — известный объемный расход аргона ($\text{см}^3 \cdot \text{мин}^{-1}$), p_i — парциальное давления компонента i в пермеате (см рт. ст.), p_{Ar} — парциальное давление аргона в пермеате (см рт. ст.).

Для представления значений проницаемости в единицах GPU использовали выражение

$$1 \text{ GPU} = 10^{-6} \frac{\text{см}^3}{\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{см рт. ст.}}. \quad (3)$$

Селективность по паре газов рассчитывали по формуле

$$\alpha_{A/B} = \frac{Q_A}{Q_B}, \quad (4)$$

где Q_A — проницаемость компонента А, Q_B — проницаемость компонента В.

Эксперименты по разделению воздушной газовой смеси проводили на мембранных модулях с разными эффективными площадями мембран. При увеличении эффективной площади мембраны, с учетом того что питающий газовый поток не изменяется, происходит закономерное увеличение потока пермеата и значения доли отбора:

$$\theta = \frac{l_{\text{perm}}}{l_{\text{feed}}}, \quad (5)$$

где l_{perm} — объемный расход пермеата ($\text{см}^3 \cdot \text{мин}^{-1}$), l_{feed} — объемный расход питающего потока ($\text{см}^3 \cdot \text{мин}^{-1}$).

Были изготовлены модули с небольшим количеством полволоконных мембран: 40, 45, 50, 55, 60 волокон, а также использованы модули с известной эффективной площадью мембраны: 2000, 5000, 8000 см^2 .

Во время эксперимента проводили разделение воздуха, который подавали из воздушного компрессора в полость высокого давления с определенной величиной расхода, задаваемой РРГ в газораспределительной системе установки. Анализ потока пермеата, попадающего в подмембранное пространство, проводили с помощью масс-спектрометра; поток ретентата в свою очередь поступал на анализ в газовый хроматограф Хромос ГХ-1000 (ООО «Хромос»). Применяемая в настоящей работе конфигурация газо-

Таблица 1
Условия хроматографического анализа

Компонент	Условия
Детектор	ДТП 120°C, 111 мА
Хроматографическая колонка	СаА5А, 60/80 сетка, 4 м × 3 мм, нержавеющая сталь
Температура колонки	120°C
Дозирующая петля	1 см ³ , 120°C
Газ-носитель	He 99.9999 об%, 20 см ³ ·мин ⁻¹

вого хроматографа Хромос ГХ-1000 была оснащена детектором по теплопроводности (табл. 1).

В рамках технико-экономического анализа будут рассмотрены две пары случаев: получение концентрата азота с его содержанием в потоке ретентата 95 и 99.5 мол% с учетом газотранспортных характеристик мембраны по индивидуальным газам и компонентам смеси. Для создания движущей силы (перепада парциальных давлений компонентов смеси) используют компрессор, установленный на линии ввода питающей смеси. Расчет выполнен на примере концентратора азота производительностью по сырью 1 м³·ч⁻¹. Технические характеристики и условия расчета представлены в табл. 1.

Для расчета себестоимости концентрирования 1 м³ N₂ была использована следующая формула:

$$C_c = \frac{PTE + 0.2C}{F_{N_2}T}, \quad (6)$$

где C_c — стоимость выделения единицы продукта (₽·л⁻¹), P — работа компрессии (кВт), T — коэффициент функционирования концентратора азота (время функционирования за год) (ч·год⁻¹), E — стоимость электроэнергии (₽·кВт⁻¹·ч⁻¹), C — капитальные за-

траты на оборудование (₽), F_{N_2} — расход потока продукта (л·ч⁻¹) (табл. 2).

Капитальные затраты на оборудование рассчитаны из следующей упрощенной формулы:

$$C = AS_M + S_{C_1}, \quad (7)$$

где A — площадь используемой мембраны (м²), S_M — стоимость 1 м² мембраны (₽·м⁻²) (~8765 ₽·м⁻²) исходя из данных производителя мембраны, S_{C_1} — стоимость компрессорной установки (₽).

Работу компрессии рассчитывали согласно формуле

$$P = \frac{L_{in} \frac{\gamma}{(\gamma - 1)} \frac{RT_{in}}{n_v} \left[\left(\frac{P_{out}}{P_{in}} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} - 1 \right]}{1000}, \quad (8)$$

где P — работа компрессии (кВт), L_{in} — входящий в компрессор поток (моль·с⁻¹), γ — коэффициент адиабатического расширения газовой смеси, R — универсальная газовая постоянная, T_{in} — температура входящего газа (К); n_v — КПД компрессора, P_{out} и P_{in} — давление на входе и выходе из компрессора.

Таблица 2
Основные технологические параметры мембранного концентратора азота

Параметр	Значение	
	индивидуальные газы	компоненты смеси
Давление в полости высокого давления, МПа	0.2	
Давление в полости низкого давления, МПа	0.1	
Площадь мембраны, м ² :		
95 мол% N ₂	125.25	105.21
99.5 мол% N ₂	192.05	175.35
Проницаемость мембраны по O ₂ , GPU	22.62	26.65
Селективность мембраны для O ₂ /N ₂	3.76	3.85

Коэффициент адиабатического расширения газовой смеси был рассчитан по формуле

$$\gamma = \frac{C_p^{O_2} y_{O_2} + C_p^{N_2} y_{N_2}}{C_v^{O_2} y_{O_2} + C_v^{N_2} y_{N_2}}, \quad (9)$$

где C_p и C_v — теплоемкость чистых компонентов при постоянном давлении и температуре соответственно ($\text{Дж} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$), y_{O_2} и y_{N_2} — мольные доли O_2 и N_2 во входящем потоке соответственно. Значения теплоемкостей чистых компонентов были получены из базы данных AspenTM Properties.

Для расчета КПД была применена формула, устанавливающая соответствие между КПД и отношением давления на входе и выходе ступени аппарата (что позволяет не рассчитывать КПД отдельных ступеней):

$$n_v = 0.1058 \ln \left(\frac{P_{in}}{P_{out}} \right) + 0.8746. \quad (10)$$

Стоимость компрессорного оборудования, обеспечивающего производительность $\sim 170 \text{ м}^3 \cdot \text{ч}^{-1}$, составляет около 450 000 Р (по данным производителя¹). При стоимости 1 м^2 мембраны (включая затраты на корпус) 8765 Р (~ 50 \$) капитальные затраты составят 1 372 166 и 1 547 816 Р при концентрировании азота до 95 мол% и 1 986 943 и 2 133 318 Р при концентрировании азота до 99.5 мол% при использовании проницаемости мембраны по компонентам смеси и индивидуальным газам соответственно. Таким образом, если принять коэффициент функционирования концентратора равным $7446 \text{ ч} \cdot \text{год}^{-1}$, а стоимость электроэнергии — $6.5 \text{ Р} \cdot \text{кВт}^{-1}$, себестоимость концентрирования 1 м^3 азота составляет 1518.86 и 1523.57 Р (95 мол%) и 1553.37 и 1539.30 Р (99.5 мол%). При условии функционирования такого концентратора $7446 \text{ ч} \cdot \text{год}^{-1}$ (коэффициент функционирования 0.85) в годовой перспективе разница составит 35 130 и 29 275 Р для концентрата азота 95 и 99.5 мол% соответственно.

Обсуждение результатов

При использовании смеси газов проницаемость по кислороду составляет 26.65 GPU, а при исследовании индивидуальных газов — 22.62 GPU. В то же время значения проницаемости по азоту практически не различаются — 7.07 GPU для чистых газов, 7.09 GPU — для смеси. Можно отметить, что в случае массопереноса компонентов воздуха селективность

по паре газов O_2/N_2 повышается из-за роста значения проницаемости O_2 в составе смеси в сравнении с проницаемостью чистого газа. Так, проницаемость O_2 на 15% ниже для случая массопереноса чистого газа, чем для компонентов смеси. Из полученных значений проницаемости мембраны можно определить значения селективности, которые составляют 3.76 и 3.85 для индивидуальных газов и компонентов смеси.

С использованием полученных экспериментальных данных было выполнено моделирование процесса разделения воздушной смеси в технологической среде Aspen Plus (Bedford, MA) с интегрированным пользовательским блоком, описывающим массообмен в мембранном модуле, созданным с помощью программного пакета Aspen Custom Modeler.

Было проведено сравнение зависимостей концентрации азота и кислорода в потоках ретентата и пермеата от площади мембраны для двух способов расчета: по значениям проницаемости мембраны для индивидуальных газов и компонентов воздушной смеси. Зависимости содержания целевого компонента от площади мембраны, полученные в ходе моделирования на основе газотранспортных характеристик по индивидуальным газам, отличаются от значений, полученных моделированием процесса на основе проницаемостей по компонентам реальной газовой смеси (рис. 3). Такие различия впоследствии могут привести к ошибкам при проектировании установок, что в свою очередь может способствовать недостаточной эффективности разделения смеси и (или) повышению капитальных и операционных затрат.

Экспериментальные и расчетные значения концентрации компонентов хорошо соотносятся друг с другом, что подтверждается зависимостями, приведенными на рис. 4. Значения концентрации азота в потоке ретентата, полученные экспериментально и при расчете по характеристикам, полученным для компонентов газовой смеси, выше, чем такие же значения, полученные в расчетах с применением газотранспортных характеристик для индивидуальных газов. Аналогичные рассуждения справедливы также и для кислорода. Расчетная концентрация кислорода при применении характеристик для компонентов газовой смеси составила 49.33 об%, а при применении характеристик для индивидуальных газов — 45.42 об%. По N_2 значения концентраций равны 79.16 и 79.13 об% соответственно. Селективность также выше для случая проведения исследований с использованием смеси газов. Результаты экспериментов при разделении воздуха подтвердили зависимости,

¹ Remeza BA30 3300 (ЗАО «Ремеза», Беларусь).

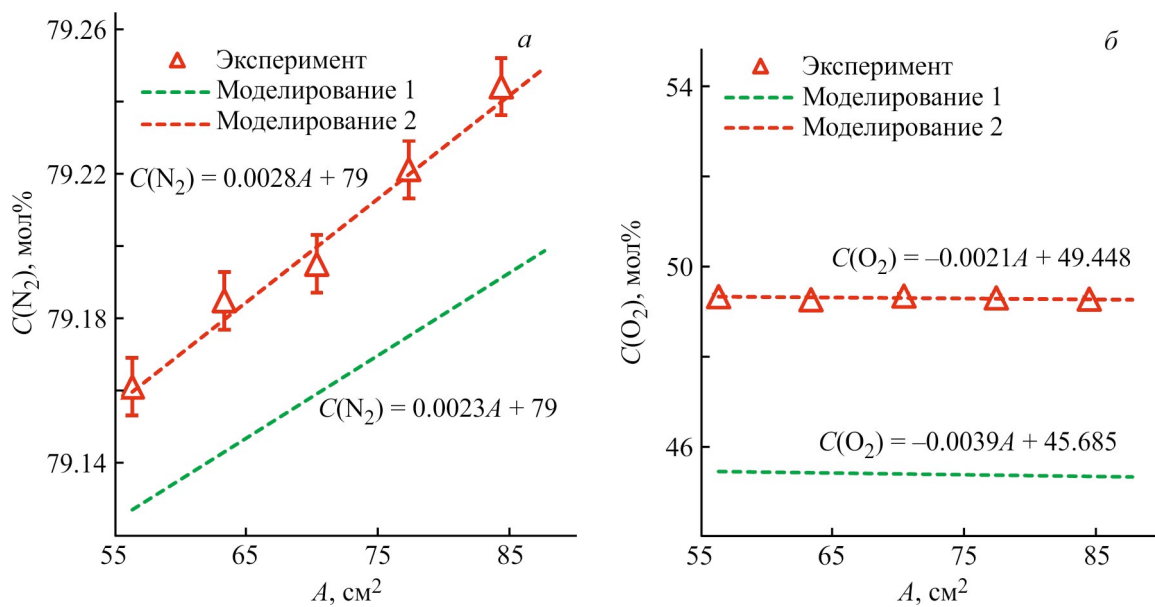


Рис. 3. Зависимость концентрации (а — N_2 в потоке ретентата, б — O_2 в потоке пермеата) от эффективной площади A мембраны из полиимида.

Эксперимент — экспериментально полученные концентрации компонентов; моделирование процесса газоразделения: 1 — с учетом газотранспортных характеристик по индивидуальным газам, 2 — с учетом смесевых газотранспортных характеристик.

описанные моделью, построенной на основании газотранспортных характеристик, полученных для смеси.

Построенные модельные прямые в малом диапазоне доли отбора описываются линейными урав-

нениями для полуволоконной мембраны на основе полиимида. На графиках (рис. 4) приведены расчетные зависимости и представлены экспериментальные данные, полученные при разделении на мембранных модулях.

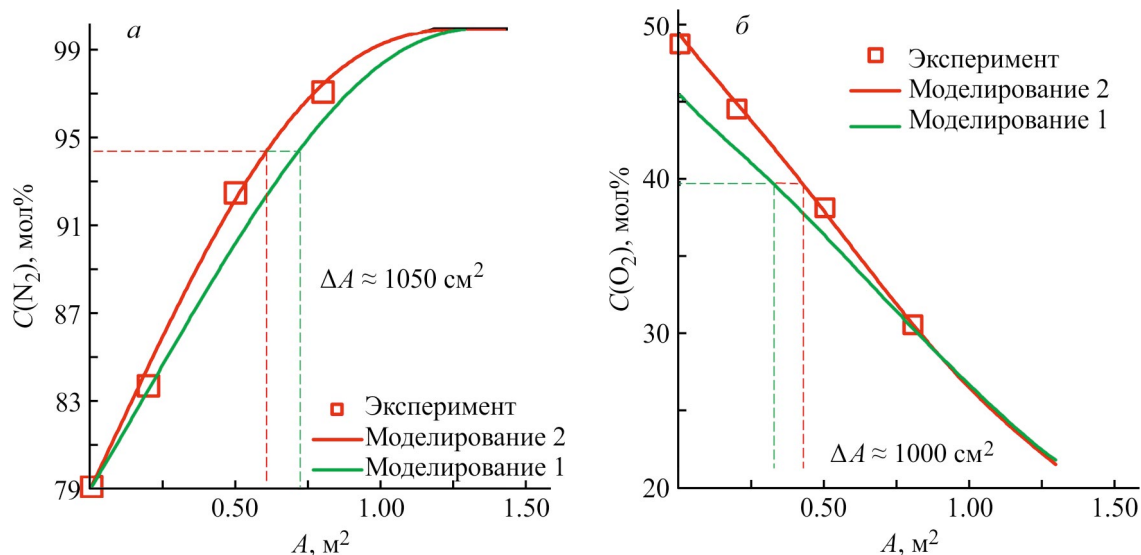


Рис. 4. Зависимость концентрации (а — N_2 в потоке ретентата, б — O_2 в потоке пермеата) от эффективной площади A мембраны из полиимида во всем диапазоне stage-cut.

Эксперимент — экспериментально полученные концентрации компонентов; моделирование процесса газоразделения: 1 — с учетом газотранспортных характеристик по индивидуальным компонентам, 2 — с учетом смесевых газотранспортных характеристик.

ΔA — разница между расчетной площадью мембран, полученной с помощью разных методов моделирования.

Кривая моделирования 2 на рис. 4 (построенная с использованием в расчетах смесевых характеристик) проходит выше кривой моделирования 1 (построенной с использованием в расчетах характеристик чистых газов), аналогично представленным выше результатам (рис. 3). Результаты моделирования демонстрируют хорошую корреляцию с экспериментально полученными значениями, что дополнительно верифицирует выбранную методику расчетов.

Практически во всем диапазоне площадей мембраны наблюдается значительное расхождение концентраций газов в ретентате и пермеате (рис. 4). При увеличении площади мембраны трудно проникающий компонент в потоке ретентата может быть получен с достаточно высокой степенью очистки, а поток пермеата по своему составу практически совпадает с исходной воздушной смесью, что отражается в совпадении кривых 1 и 2 (рис. 4, б) при площадях выше 0.8 м^2 .

Из полученных результатов можно сделать вывод о том, что при проектировании мембранного модуля необходимо опираться на значения проницаемостей, полученных для конкретной газовой смеси. Так, для достижения концентрации 95 мол% азота требуется площадь мембраны, равная 0.63 м^2 . В то же время в результате моделирования процесса на основе газотранспортных характеристик, полученных для индивидуальных газов, требуемая площадь составляет 0.74 м^2 . Обратная ситуация наблюдается по кислороду. Согласно моделированию на основе индивидуальных характеристик, требуемая для достижения концентрации кислорода 40 мол% площадь составляет 0.30 м^2 . В то же время при моделировании на основе смесевых характеристик расчетная площадь составляет уже 0.41 м^2 . Таким образом, при применении индивидуальных характеристик возможно недостижение задачи газоразделения. Ошибка при проектировании, основанном на индивидуальных характеристиках, по азоту — 14%, по кислороду — 33%.

Выводы

Применение смесевых газотранспортных характеристик мембран при моделировании мембранных аппаратов ведет к значительным различиям в рассчитываемых технико-экономических показателях процесса с таковыми, рассчитанными с помощью индивидуальных газотранспортных характеристик. В рамках работы показано, что для процессов разделения воздуха различия в определяемой моделированием площади мембран могут составлять 14–33%.

Такие различия естественным образом могут вести к неверной технико-экономической оценке процесса. Это в свою очередь может приводить как к росту капитальных затрат, так и в некоторых случаях к недостижению задачи газоразделения.

Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках научного проекта по государственному заданию № FSSM-2023-0004. Работа выполнена при поддержке Правительства Тульской области, соглашение № 14 от 14.09.2023.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

Информация о вкладе авторов

К. А. Смородин — разработка концепции статьи, экспериментальное определение газотранспортных характеристик; С. С. Крючков, Н. С. Цивковский — математическое моделирование процесса разделения воздуха на компоненты; А. А. Атласкин — формирование направления исследования и перечня решаемых задач, сборка экспериментального стенда; А. Н. Степакова, М. Е. Атласкина — иллюстрации, обработка результатов эксперимента по определению газотранспортных характеристик, подготовка образцов пленок мембран; А. В. Воротынцев — интерпретация масс-спектрометрических данных; И. В. Воротынцев — постановка цели и задачи, определение объекта и предмета исследования, концептуализация направления исследования.

Информация об авторах

Сморodin Кирилл Александрович
ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6950-3579>
Атласкин Артем Анатольевич, к.т.н.
ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9662-8115>
Крючков Сергей Сергеевич
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6868-5064>
Степакова Анна Николаевна
ORCID: <http://orcid.org/0009-0004-1530-9489>
Цивковский Никита Сергеевич
ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8566-708X>
Атласкина Мария Евгеньевна, к.т.н.
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4707-9567>

Петухов Антон Николаевич, к.т.н.

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4904-7622>

Воротынцев Андрей Владимирович, к.т.н.

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5447-5296>

Воротынцев Илья Владимирович, д.т.н., проф.

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2282-0811>

Список литературы

- [1] Cheng M., Verma P., Yang Z., Axelbaum R. L. Single-column cryogenic air separation: Enabling efficient oxygen production with rapid startup and low capital costs — application to low-carbon fossil-fuel plants // *Energy Convers. Manag.* 2021. V. 248. P. 114773. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114773>
- [2] Grande C. A. Advances in pressure swing adsorption for gas separation // *ISRN Chem. Eng.* 2012. V. 2012. P. 982934. <https://doi.org/10.5402/2012/982934>
- [3] Sidhikku Kandath Valappil R., Ghasem N., Al-Marzouqi M. Current and future trends in polymer membrane-based gas separation technology: A comprehensive review // *J. Ind. Eng. Chem.* 2021. V. 98. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2021.03.030>
- [4] Liu K. G., Bigdeli F., Panjehpour A., Hwa Jhung S., Al-Lawati H. A. J., Morsali A. Potential applications of MOF composites as selective membranes for separation of gases // *Coord. Chem. Rev.* 2023. V. 496. P. 215413. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2023.215413>
- [5] Da Conceicao M., Nemetz L., Rivero J., Hornbostel K., Lipscomb G. Gas separation membrane module modeling: A comprehensive review // *Membranes (Basel)*. 2023. V. 13. P. 639–662. <https://doi.org/10.3390/membranes13070639>
- [6] Atlaskin A. A., Petukhov A. N., Stepakova A. N., Tsivkovsky N. S., Kryuchkov S. S., Smorodin K. A., Moiseenko I. S., Atlaskina M. E., Suvorov S. S., Stepanova E. A., Vorotyntsev I. V. Membrane cascade type of «Continuous Membrane Column» for power plant post-combustion carbon dioxide capture. Part 1: Simulation of the binary gas mixture separation // *Membranes (Basel)*. 2023. V. 13. P. 270–283. <https://doi.org/10.3390/membranes13030270>
- [7] Thundiyil M. J., Koros W. J. Mathematical modeling of gas separation permeators — for radial crossflow, countercurrent, and cocurrent hollow fiber membrane modules // *J. Memb. Sci.* 1997. V. 125. P. 275–291. [https://doi.org/10.1016/S0376-7388\(96\)00218-9](https://doi.org/10.1016/S0376-7388(96)00218-9)
- [8] Chong K. C., Lai S. O., Lau W. J., Thiam H. S., Ismail A. F., Zulhairun A. K. Fabrication and characterization of polysulfone membranes coated with polydimethylsiloxane for oxygen enrichment // *Aerosol Air Qual. Res.* 2017. V. 17. P. 2735–2742. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2016.12.0571>
- [9] Chung Chong K., Chan Y. Y., Lau W. J., Lai S. O., Ismail A. F., Thiam H. S. Preparation and characterization of polysulfone membrane coated with poly(ether block amid) for oxygen enrichment process // *Malays. J. Fundam. Appl. Sci.* 2019. V. 15. P. 50–53. <https://doi.org/10.11113/mjfas.v15n2019.1226>