

# Мембранные технологии в установках получения азота из воздуха

**Ю.Л. Кузнецов**

к.т.н., генеральный конструктор

**А.В. Бураков**

начальник центрального конструкторского бюро

**А.С. Перминов**

начальник конструкторского отдела

**С.Н. Серебrenников**

ведущий инженер

ООО «Компрессор Газ», Санкт-Петербург, Россия

**Рассмотрены вопросы мембранного воздухоразделения, проанализирован опыт применения предприятием мембран для воздухоразделения, выявлены основные факторы, влияющие на процесс воздухоразделения, определены оптимальные рабочие параметры для энергоэффективного получения азота чистотой 99% и выше.**

**Ключевые слова**

азот, мембраны, компрессор, воздухоразделение

ООО «Компрессор Газ» — предприятие по комплексному проектированию, разработке, серийному изготовлению, вводу в эксплуатацию «под ключ» высокотехнологичного оборудования для газовой и нефтяной промышленности. Тесное сотрудничество с эксплуатирующими организациями позволяет оперативно реагировать на потребности рынка и совершенствовать образцы газового и компрессорного оборудования, заменяющие аналоги импортного производства. Предприятие выпускает широкий ассортимент следующей серийной продукции:

- компрессоры и компрессорные станции с конечным давлением от 0,7 до 42,0 МПа (винтовые, поршневые, мембранные);
- азотные установки;
- установки подготовки топливного и импульсного газа;
- газораспределительные станции;
- блочные дожимные компрессорные станции;
- блочные воздушные компрессорные станции;
- блоки фильтров топливного газа;
- блоки очистки и осушки воздуха и других газов с давлением до 42,0 МПа.

В настоящее время для снижения выбросов загрязняющих веществ в атмосферу в промышленности и обеспечения

безопасности газоопасных и огневых работ на промышленных объектах, магистральных и технологических трубопроводах всё чаще применяют азотные технологии. Азот используется для заполнения и вытеснения газа из технологического оборудования и участков трубопроводов.

В качестве источников азота на промышленных объектах на сегодняшний день успешно применяются стационарные и передвижные азотные установки, основанные на технологии мембранного выделения азота из воздуха.

Принцип мембранного воздухоразделения состоит в том, что «быстрые» газы, такие как  $O_2$ ,  $CO_2$ , и  $H_2O$ , пропускаются материалом непористой полимерной мембраны больше чем  $N_2$  (рис. 1).

Воздухоразделительная эффективность мембраны определяется параметрами трансмембранного газопереноса материала рабочего селективного слоя (0,1–0,01 мкм) мембраны: газопроницаемостью и селективностью. В зависимости от соотношения газопроницаемости и селективности полимера, использованного при получении мембраны, а также от наличия мембран разной конфигурации (плоская, половолоконная), можно подобрать техническое решение при выборе схемы воздухоразделительного процесса [1].

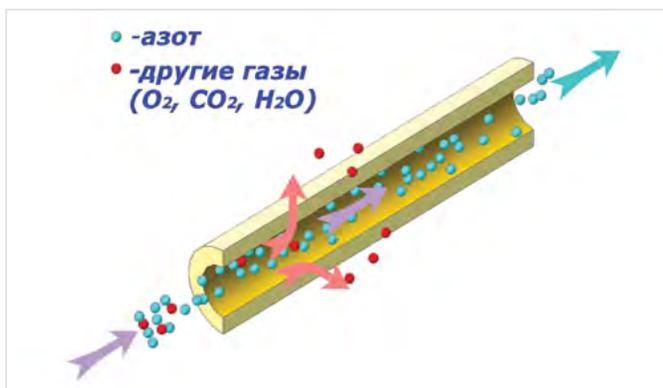


Рис. 1 — Принцип мембранного воздухоразделения

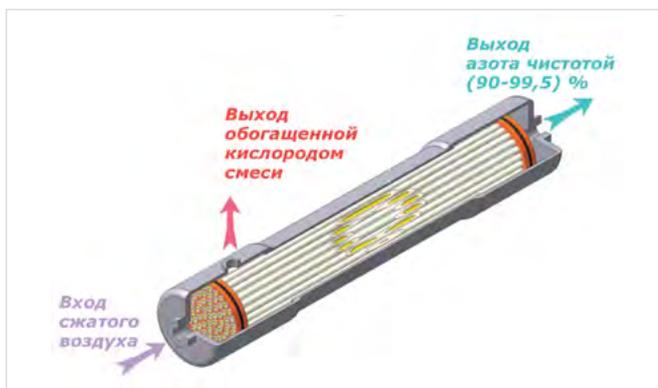


Рис. 2 — Схема работы мембранного модуля

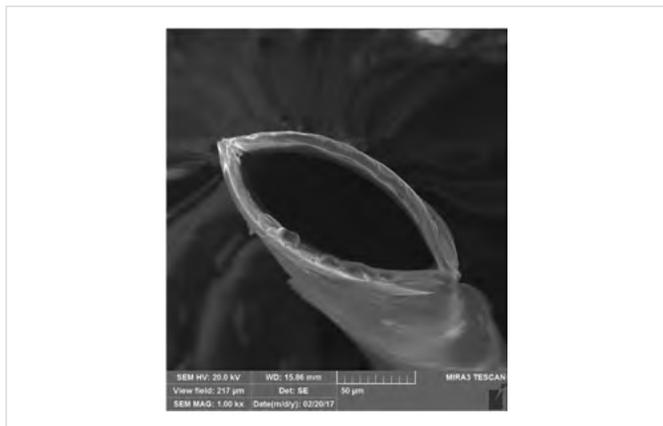


Рис. 3 — Фото мембранного волокна (диаметр порядка 150 мкм)

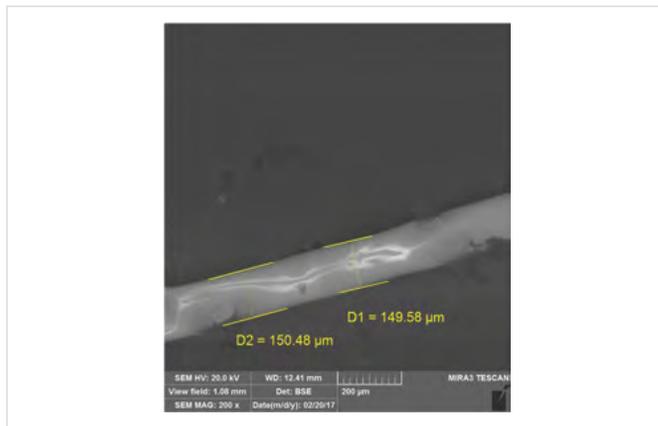


Рис. 4 — Фото стенки мембранного волокна (толщина стенки порядка 7 мкм)

Основные материалы, применяемые для изготовления воздуходелительных мембран, и компании, производящие мембраны в промышленном масштабе, приведены в таб. 1 [2].

На молекулярном уровне на процесс мембранного разделения газа существенно влияет величина удельной поверхности мембраны, в связи с чем в промышленности применяются преимущественно полые волокна, поскольку полые волокна имеют более высокую эффективную площадь поверхности на единицу объема мембранного модуля по сравнению с другими.

Плотность упаковки волокон (удельная площадь на единицу объема) для полволоконных мембранных модулей > 10000 м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>.

Площадь мембраны в каждом модуле ориентировочно составляет 300–600 м<sup>2</sup>.

Из материалов, указанных в таб. 1, формируются полые волокна, на внутренней либо наружной поверхности которых наносится селективный слой. Схема работы мембранного модуля приведена на рис. 2.

Внешний диаметр полых волокон может изменяться в зависимости от применения и варьироваться от 50 до 3000 мкм. Волокна могут быть изготовлены из одного или двух материалов. Два слоя используются для внешней или внутренней поверхности. Селективный слой может быть интегрирован с волокном или выполнен отдельным (покрытием), нанесенным на пористую подложку (волокно). Внешний диаметр от

50 до 200 мкм обычно называют «тонкими полыми волокнами». Это волокна высокого давления сепарации газа, так как они могут противостоять внешнему гидростатическому давлению до 1000 кПа [3].

В зависимости от требуемых эксплуатационных характеристик, а также конечных потребителей азота (продувка оборудования и трубопроводов, питание импульсным газом запорно-регулирующей арматурой (ЗРА) и т.п.), к установкам предъявляются следующие основные требования: чистота азота от 95 до 99,5 %; давление азота от 1,0 до 2,5 МПа, а также до 15,0 МПа для систем высокого давления; точка росы не более минус 70°С при использовании в качестве импульсного газа в системах ЗРА. При этом производительность установок по азоту может варьироваться от 100 до 1000 м<sup>3</sup>/ч и выше. На рис. 5 и рис. 6 показана блочная контейнерная мембранная азотная установка производительностью 600 м<sup>3</sup>/час, рабочим давлением от 1,0 до 2,5 МПа.

В качестве основного оборудования, входящего в мембранную азотную установку, можно выделить компрессорные агрегаты, системы подготовки воздуха и воздуходелительные блоки (мембранные модули), взаимодействие которых по установленному алгоритму позволяет обеспечить требуемые параметры выдачи азота потребителю. С точки зрения энергоэффективности целесообразно размещение модулей в отдельном отсеке с

автоматизированным поддержанием необходимой температуры. Пример подобного размещения мембранных модулей показан на рис. 6.

Опыт разработок и поставок ООО «Компрессор Газ» мембранных азотных установок позволяет изготавливать установки с оптимальным набором технологического оборудования для надежной эксплуатации и подтверждения заявленных характеристик. В процессе отработки технологической схемы и алгоритмов работы установок были получены практические результаты и зависимости, позволяющие моделировать оптимальные условия ведения процесса получения азота с минимальным набором необходимого оборудования, высокой эффективностью и оптимальными энергозатратами. Выявлено, что главными факторами, влияющими на процесс мембранного воздуходеления, являются параметры рабочей среды, а именно — давление и температура воздуха на входе в мембранные модули.

В соответствии с конструктивными особенностями и физико-химическими процессами, проходящими в мембранных модулях, известно, что удельная производительность единичной мембраны имеет прямо пропорциональную зависимость от давления протекания процесса. При этом в настоящее время на рынке серийных мембранных модулей существует ограничение по максимальному рабочему давлению 2,5 МПа.



Рис. 5 — Мембранная азотная установка для Заполярного НГКМ (вид снаружи)



Рис. 6 — Мембранная азотная установка Заполярного НГКМ (отсек с воздуходелительными мембранными модулями)

Полимер, из которого сделана мембрана	Газопроницаемость по кислороду P(O <sub>2</sub> ), Баррер	Селективность α (O <sub>2</sub> / N <sub>2</sub> )	Изготовители мембранных модулей
Полиимид (ПИ), Polyimide, polyaramide	0,27	6,9	Air Liquide medal (Франция)
Полисульфон, Polysulfone	1,4	5,6	Airproducts (США)
Полиимид (ПИ), Polyimide	0,27	6,9	Evonik (Германия)
Тетрабром-поликарбонат (ТБПК), Tetrabromopolycarbonate	1,4	7,6	IGS Generon membrane technology (США)
Полифениленоксид (ППО), Polyphenylene oxide	0,4	3,9	Parker (США)
Полиимид/Polyimide (ПИ), Upilex	0,27	6,9	UBE membranes (Япония)
Ацетат целлюлозы (АЦ), Separex	1,1	4,5	UOP LLC, A Honeywell Company (США)

Таб. 1 — Материалы и изготовители полволоконных мембранных модулей

Выбор величины давления, при котором протекает процесс воздуходеления, определяется на этапе проектирования установок в соответствии с технологическими и эксплуатационными потребностями конечного потребителя азота, а именно мобильностью, массогабаритными характеристиками установок, допустимыми энергозатратами и т.п.

В большинстве случаев для стационарных азотных установок целесообразно применение стандартных винтовых компрессоров, обеспечивающих максимальное давление нагнетания 1,3 МПа, а также применение стандартной ЗРА. При этом, учитывая потери давления в системах воздухоподготовки, давление процесса варьируется в диапазоне от 1,1 до 1,2 МПа. Данная величина давления в общих случаях удовлетворяет технологическим потребностям промышленных объектов.

Как отмечалось выше, температура процесса воздуходеления также оказывает влияние на эффективность протекания процесса следующим образом: чем ниже температура процесса, тем выше отношение производительности азота к потребляемому воздуху, однако при этом снижается общая производительность мембраны (выход азота); чем выше температура, тем выше производительность, однако конструктивные особенности мембран допускают протекание процесса при температуре в диапазоне от 5 до 80 °С. Условная

эффективность процесса воздуходеления в зависимости от температуры протекания процесса представлена на графике (зависимость получена при давлении процесса 1,15 МПа).

Условная эффективность — это отношение потребляемого воздуха к продуктовому азоту на относительную производительность мембраны (производительность мембраны при температуре процесса 80 °С принята за единицу, производительности при других температурах — как доли от единицы).

Из графика видно, что, несмотря на повышение производительности мембраны при повышении температуры среды, эффективность, при необходимости получения азота чистотой 98% и выше, падает после определенного значения температуры, либо растёт незначительно. К примеру, оптимальная температура получения азота чистотой 99% — 45–50 °С и дальнейшее повышение температуры процесса воздуходеления не дает существенных преимуществ, повышая при этом общие энергозатраты установки.

На рис. 8 представлен график зависимости потребляемой компрессором установки мощности от требуемой производительности при давлении процесса 1,15 МПа и температуре 42,5 °С. График позволяет оценить уровень энергозатрат на производство азота различной чистоты.

В заключении стоит отметить, что производство азота методом мембранного разделения воздуха имеет свои особенности и преимущества, для снижения инвестиционных и эксплуатационных затрат необходимо обеспечивать оптимальные технологические параметры мембранной азотной установки. Давление, температура, состав и тип применяемого оборудования должны выбираться на этапе проектирования и учитывать весь спектр требований конечного потребителя азота.

Дальнейшее направление научных исследований для развития мембранных технологий разделения газа связано с получением новых материалов или синтезом материалов мембран с более высокой эффективностью (высокой селективностью и проницаемостью), обеспечивающих повышение механических свойств мембраны, улучшение временной стабильности, стойкость к загрязняющим факторам, увеличение сроков службы мембраны, инертность по отношению к агрессивным примесям.

Перед предприятиями отечественной промышленности стоит сложная задача создания опережающих технологий и материалов с качественно новыми свойствами для создания конкурентоспособной на мировом рынке продукции. Решение задач необходимо осуществлять совместно с ведущими научными организациями, имеющими опыт, специализированные лаборатории и специальное исследовательское оборудование. Это в первую очередь относится к области мембранного воздуходеления.

Для развития отечественных мембранных технологий и обеспечения поставок газового и компрессорного оборудования с применением современных технологий ООО «Компрессор Газ» совместно с Политехническим университетом имени Петра Великого и «Российским научным центром «Прикладная химия» (ранее «ГИПХ») основал консорциум, базирующийся на опыте фундаментальных научных школ, имеющий собственную промышленную площадку, современную научно-исследовательскую и испытательную базу.

#### Список литературы

1. Тепляков В.В., Алентьев А.Ю., Малых О.В. Сравнительный анализ мембранных модулей различного типа для получения азотсодержащих газовых смесей из воздуха. Методическое руководство. М.: МГУ им. М.В. Ломоносова, 2007. 35 с.
2. Progress in Filtration and Separation. Ed. by E. Steven Tarleton, Academic Press, 2014, 698 p.
3. Membrane gas separation technologies for biogas upgrading, RSC Advances, February, 2015.

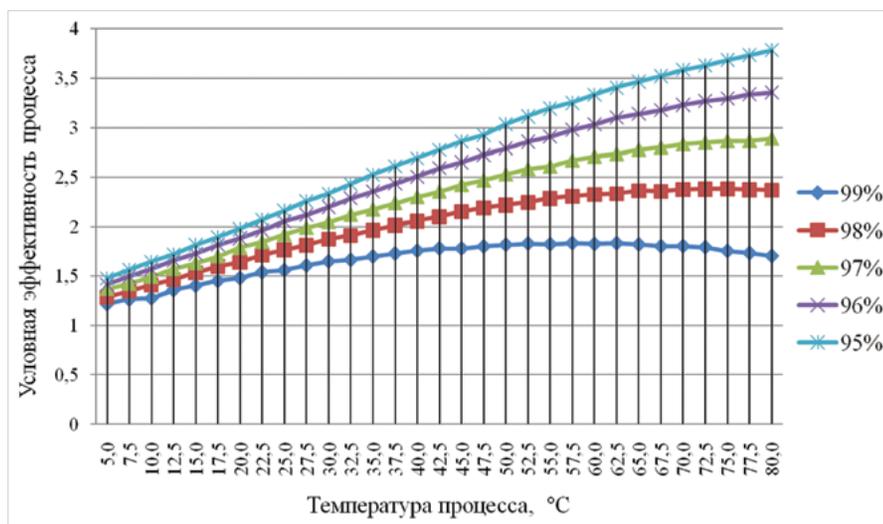


Рис. 7 — График зависимости эффективности от температуры

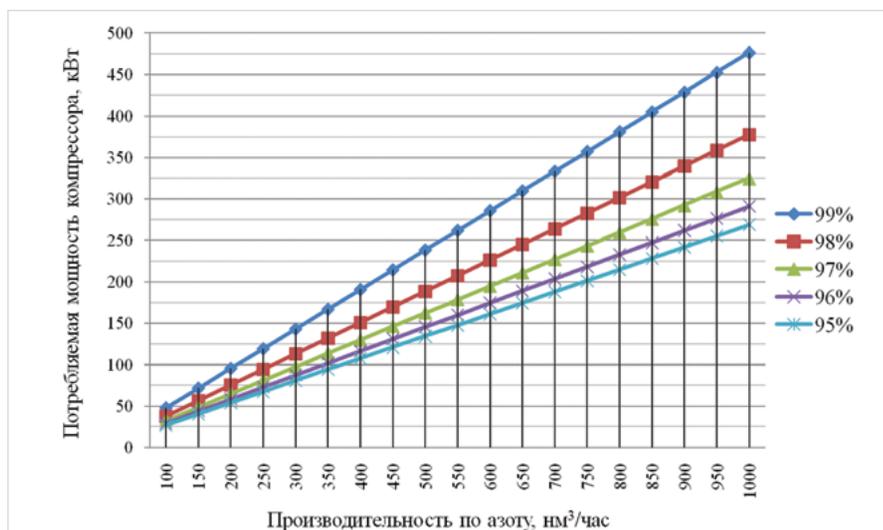


Рис. 8 — График зависимости потребляемой компрессором мощности от производительности установки



194044, г. Санкт-Петербург,  
Б. Сампсониевский пр-т, 64  
+7 (812) 295-30-27  
office@compressor-gaz.ru  
www.compressor-gaz.ru