

**Алиев Дмитрий Сергеевич,**  
ВУНЦ ВВС ВВА,  
г. Воронеж, РФ

**Кузнецов Станислав Александрович,**  
ВУНЦ ВВС ВВА,  
г. Воронеж, РФ

**Шкабура Даниил Валерьевич,**  
ВУНЦ ВВС ВВА,  
г. Воронеж, РФ

**Слюсарь Дмитрий Михайлович,**  
ВУНЦ ВВС ВВА,  
г. Воронеж, РФ

## МОБИЛЬНЫЕ ГАЗОРАЗДЕЛИТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ

**Аннотация:** Мобильные газоразделительные установки – это современные портативные устройства, предназначенные для эффективного разделения газовых смесей на составляющие компоненты. Эти устройства привлекли к себе значительное внимание благодаря своей гибкости, масштабируемости и способности работать в различных условиях: от удалённых биогазовых установок до крупных промышленных систем.

**Ключевые слова:** газоразделительные установки, мембраны, пермеат, цеолит

Технология мобильных газоразделительных установок быстро развивалась, причём значительный вклад внесли достижения в области мембранной технологии, криогенной обработки и адсорбционных методов.

Импульс развитию технологии разделения газа дали исследования в поиске альтернативной энергии во время нефтяных кризисов семидесятых годов прошлого столетия.

В это время резкий рост цен на нефть стимулировал разработку и поиск альтернативных источников энергии, что, в свою очередь, повысило интерес к биогазовой технологии. Это привело к быстрому росту строительства биогазовых установок во многих странах Азии, Латинской Америки и Африки.

Например, в Китае к концу 1988 года было зарегистрировано 4,7 миллиона биогазовых установок для бытового использования, а к 2007 году их число выросло до 26,5 миллионов. В свою очередь, Индия сообщила о более чем трёх миллионах установок для семейного использования в 1999 году, и еще около четырёх миллионов было построено к 2007 году по инициативам правительства [1].

История *анаэробного сбраживания* и использования биогаза восходит к древним временам. Биогаз использовался для приготовления пищи в Ассирии ещё в 10 веке до н. э., а анаэробное сбраживание твёрдых отходов практиковалось в Древнем Китае.

В записях Марко Поло упоминается, что закрытые канализационные резервуары использовались 3000 лет назад в Китае. К середине девятнадцатого века технология анаэробного сбраживания распространилась в Новой Зеландии и Индии, а к 1890-м годам биогаз из сточных вод использовался в качестве топлива для уличного освещения в Эксетере, Великобритания. В 1921 году в Гуандуне, Китай, был построен гидравлический биогазовый резервуар объемом 8 м<sup>3</sup>, в котором биогаз, получаемый из мусора, использовался для приготовления пищи и освещения [1, 2, 3, 4, 5].



Основные типы мобильных газоразделительных установок используют криогенную дистилляцию, абсорбцию, адсорбцию и мембранные процессы.

Немаловажную роль в эффективности газоразделительной установки играет её конструкция. Производители предлагают различные конструкции воздухозаборных устройств, состоящих из фильтров, осушителя газовой смеси и компрессора (насоса) [6].

На рисунке 1 представлена общая функциональная схема газоразделительной установки.

Эффективность работы газоразделения на мобильных установках в значительной степени зависит от хорошо спроектированных систем фильтрации.

Фильтры, устанавливаемые на входе газоразделительной установки, очищают газовую смесь от механических примесей в виде крупных и мелких твёрдых частиц, пыли, жидкостей в твёрдом и газообразном состоянии, различных аэрозолей. На качество очистки газовой смеси влияют размер, конструкция и характеристики фильтров [6].

Основу механических фильтров составляют сетчатые прокладки, имеющие пористую структуру. Они очищают газовую смесь от относительно крупных механических частиц. Недостатком сетчатых прокладок является то, что ячейки могут забиваться твёрдыми частицами, что снижает их пропускную способность, а также вызывает необходимость их периодической чистки [6].

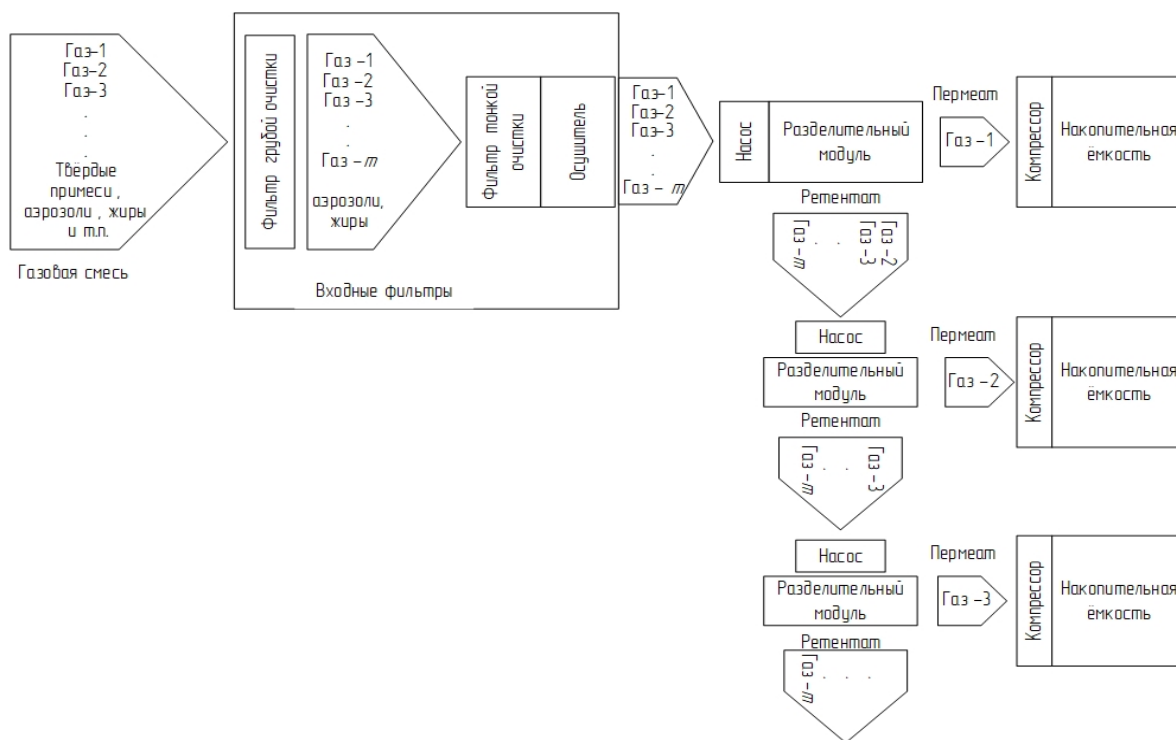


Рисунок 1 – Газоразделительная установка, функциональная схема.

Системы циклонной фильтрации работают за счёт усиления ускорения твёрдых частиц и капель жидкости, используя гравитационные силы, усиленные центробежным или циклоническим компонентом. Такая конструкция повышает эффективность удаления примесей [6].

Стадия окончательной очистки при кондиционировании исходного газа имеет жизненно важное значение для борьбы с примесями, которые могут вызвать серьезные сбои в работе установки. Примерно 50% всех жидких примесей в газовом потоке имеют размер менее



1 мкм, а 80% – менее 10 мкм. Для удаления мелкодисперсионных примесей применяются цеолиты, осаждающие на своей поверхности жиры, масла и т.п., и коагуляторы (кристаллизаторы) и осушители.

Компоненты мобильных газоразделительных установок изготавливаются из прочных коррозионностойких материалов, выдерживающих большие перепады температур, что обеспечивает длительную непрерывную работу с минимальным временем простоя [4].

*Мембранная технология* является краеугольным камнем мобильных газоразделительных установок. При этом газовая смесь высокого давления проходит вдоль одной стороны мембраны. Поток пермеата, состоящий из молекул, которые проникают через мембрану, выметается газом с противоположной стороны, в то время как непроникающие молекулы выходят в виде потока ретентата. Управление процессом происходит за счёт разности давлений на мембране. Мембранные установки компактны, энергоэффективны и могут обрабатывать различные газовые смеси, включая удаление углекислого газа из природного газа и извлечение водорода [7, 10].

В идеале мембраны должны обладать высокой селективностью и высокой проницаемостью, хотя часто между этими свойствами существует компромисс.

Неорганические мембраны, изготовленные из металлов, керамики, цеолитов или углеродных молекулярных сит (УМС), обеспечивают превосходную термическую и химическую стабильность. Эти мембраны обладают лучшей селективностью газового потока по сравнению с полимерными. Например, мембраны из цеолита или УМС обладают строго определённым размером пор, что обеспечивает превосходную селективность, особенно для выделения газов, таких как CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> [1].

*Криогенная разделение* является обычным методом, используемым на мобильных газоразделительных установках. Этот процесс включает охлаждение газовых смесей до чрезвычайно низких температур для сжижения и разделения компонентов на основе их точек кипения. Несмотря на высокое потребление энергии, криогенная дистилляция эффективна для получения газов высокой чистоты, таких как кислород и азот [8].

При *абсорбции* используется жидкий растворитель для селективного поглощения определенных газовых компонентов из смеси. В при переменном давлении используют адсорбирующие материалы, такие как цеолиты или активированный уголь, для улавливания молекул газа под высоким давлением. При снижении давления адсорбированные газы высвобождаются и собираются. Такие установки просты, обладают низким потреблением энергии и высокой скоростью регенерации, что делает их идеальными для производства кислорода и очистки водорода [8, 9].

В настоящее время мобильные газоразделительные установки используются для выделения высокочистого метана *из биогаза*. Криогенные методы обработки в этих установках позволяют эффективно удалять CO, и H<sub>2</sub>S. Этот метод не только обеспечивает высокие уровни чистоты, но и снижает потребление энергии в процессе разделения. Модульная конструкция этих установок обеспечивает масштабируемость и гибкость [4, 10].

В тех случаях, когда «здесь и сейчас» требуются стабильные и надёжные поставки кислорода, азота или аргона, мобильные газоразделительные установки являются оптимальным решением как альтернатива поставкам наливом или по трубопроводу.

Мобильные газоразделительные установки предлагают ряд существенных преимуществ [1, 9, 12]:

- стабильность и надёжность производства кислорода, азота, аргона;
- высокая чистота получаемых газов (до 99%);
- уменьшение количества операций по доставке газа потребителю;
- адаптивность к конкретным условиям эксплуатации;



- низкие эксплуатационные расходы и высокая производительность;
- высокая степень автоматизации.

Поскольку альтернативная энергетика продолжает развиваться, то принятие инновационных технологий становится всё более важным для достижения долгосрочного успеха и устойчивости в энергетическом секторе.

*Список литературы:*

1. Мембранные технологии разделения газа для повышения качества биогаза – URL: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2015/ra/c5ra00666j> (дата обращения 06.07.2024)
2. Грандиозные проблемы в мембранных приложениях – газ и пар – URL: <https://www.frontiersin.org/journals/membrane-science-and-technology/articles/10.3389/frmst.2022.853402/full> (дата обращения 26.05.2024).
3. Моделирование мембранного модуля для разделения газа – URL: <https://www.mdpi.com/2077-0375/13/7/639> (дата обращения 11.09.2024).
4. Мощь криогенной обработки газа в энергетических системах – URL: <https://alliedeq.com/the-power-of-cryogenic-gas-processing-in-energy-systems> (дата обращения 13.10.2024).
5. Лучший способ разделения газов – URL: <https://news.mit.edu/2022/membrane-separate-gases-0325> (дата обращения 10.07.2024).
6. Изучение технологий разделения газа на входе для повышения надёжности – URL: <http://gasprocessingnews.com/articles/2014/06/examine-inlet-separation-technologies-for-increased-reliability> (дата обращения 26.09.2024).
7. Мембраны-разделение газа – URL: <https://cen.acs.org/articles/83/i40/Membranes-Gas-Separation.html> (дата обращения 04.09.2024).
8. Мембраны для разделения газа – MDPI – URL: <https://www.mdpi.com/2077-0375/11/10/755> (дата обращения 04.09.2024).
9. Технология адсорбции при переменном давлении – как она работает – URL: <https://www.apexgasgenerators.com/post/pressure-swing-adsorption-technology-how-it-works> (дата обращения 01.10.2024).
10. Эффективное удаление кислых газов с помощью мембранных систем – Часть 2 – URL: <http://gasprocessingnews.com/articles/2018/08/efficient-acid-gas-removal-using-membrane-systems-part-2> (дата обращения 16.09.2024).
11. Последние достижения в моделировании проникновения газа через мембраны. – URL: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2021/ma/d1ma00026h> (дата обращения 16.09.2024).

