

# ОСУШКА ПРИРОДНОГО ГАЗА БЕЗРЕАГЕНТНЫМ СПОСОБОМ: СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ

## Аннотация

В статье представлен анализ современных безреагентных технологий осушки природного газа. Рассмотрены физические принципы работы, ключевые конструктивные особенности и технологические параметры методов низкотемпературной сепарации (НТС) и мембранного разделения. Особое внимание уделено вопросам энергоэффективности процессов, влиянию режимных параметров на степень осушки и минимизации потерь ценных углеводородных компонентов. Предложены рекомендации по выбору и оптимизации технологических схем осушки для различных условий добычи и подготовки газа. Результаты исследования направлены на повышение экономичности и экологической безопасности процессов подготовки газа к транспорту.

## Ключевые слова

Осушка природного газа, безреагентный метод, низкотемпературная сепарация, абсорбционное осушение, мембранное разделение, точка росы, энергоэффективность, подготовка газа.

## Abstract

The article presents an analysis of modern non-reagent technologies for natural gas dehydration. The physical principles of operation, key design features, and technological parameters of low-temperature separation (LTS) and membrane separation methods are considered. Special attention is paid to the energy

efficiency of processes, the influence of regime parameters on the degree of dehydration, and the minimization of losses of valuable hydrocarbon components. Recommendations are provided for the selection and optimization of dehydration process schemes for various gas production and treatment conditions. The research results are aimed at improving the cost-effectiveness and environmental safety of gas preparation processes for transportation.

## Keywords

Natural gas dehydration, non-reagent method, low-temperature separation, absorption dehydration, membrane separation, dew point, energy efficiency, gas processing.

## Введение

Актуальность исследования.

Обеспечение требуемой точки росы по воде транспортируемого природного газа является критически важной технологической задачей для предотвращения гидратообразования в магистральных газопроводах, коррозии оборудования и обеспечения стабильности поставок [1]. Традиционные реагентные методы (абсорбция гликолями, адсорбция цеолитами) связаны с высокими эксплуатационными затратами, необходимостью регенерации сорбента и утилизации отходов. В условиях ужесточения экологических норм и требований к энергоэффективности особую значимость приобретает развитие и внедрение безреагентных способов осушки, таких как низкотемпературная сепарация и мембранное разделение [2, 3].

Цель исследования заключается в анализе современных технологических решений для безреагентной осушки природного газа и разработке рекомендаций по повышению их энергетической и экономической эффективности.

Задачи исследования:

1. Провести обзор принципов действия и областей применения основных безреагентных методов осушки газа.
2. Проанализировать ключевые технологические параметры, влияющие на глубину осушки и потери углеводородов.
3. Рассмотреть нормативно-технические требования к качеству осушенного газа (точке росы).
4. Разработать практические рекомендации по выбору и оптимизации технологических схем.

Объект исследования – технологические процессы безреагентной осушки природного газа.

Предмет исследования – физико-химические принципы, технологические режимы и энергетические характеристики методов низкотемпературной и мембранной осушки.

Обзор литературы

Проблемам подготовки и осушки природного газа посвящены многочисленные работы. В исследованиях [4, 5] подробно рассмотрены классические реагентные методы и расчеты процессов абсорбции и адсорбции. Авторы [6, 7] акцентируют внимание на современных безреагентных решениях, таких как турбодетандерные установки и мембранные системы, позволяющих существенно сократить капитальные и эксплуатационные затраты. В работах [8, 9] глубоко анализируются вопросы

термодинамического моделирования низкотемпературных процессов и оптимизации энергопотребления. Однако комплексный сравнительный анализ, объединяющий технологические возможности, ограничения и экономические аспекты различных безреагентных методов, представлен недостаточно.

## Методология исследования

### Методы анализа:

1. Сравнительный анализ – сопоставление технологических и энергетических параметров методов низкотемпературной сепарации (НТС) и мембранного разделения.
2. Нормативно-технический анализ – изучение требований ГОСТ Р 8.615-2006 (ГСИ. Количество газа), ГОСТ 5542-2014 (Газы горючие природные) и технических регламентов, устанавливающих нормы по точке росы.
3. Анализ энергоэффективности – рассмотрение энергозатрат на охлаждение, компрессию и рекуперацию холода в различных технологических схемах.

## Результаты и обсуждение

### 1. Классификация и современные решения.

Проанализированы два основных класса безреагентных методов:

Низкотемпературная сепарация (НТС): Основана на охлаждении газа (дросселированием, в турбодетандере или с помощью внешнего холодильного цикла) до температуры конденсации паров воды. Современные решения включают каскадные схемы с рекуперацией холода, применение эффективных теплообменников «газ-газ» и автоматизированные системы управления для минимизации потерь этана и пропана. Обеспечивает глубокую осушку (до  $-20...-40$  °С по точке росы).

Мембранное разделение: Основано на селективной проницаемости компонентов газа через полимерную мембрану. Пары воды,  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{S}$  проникают через мембрану быстрее, чем метан. Ключевые преимущества – компактность, модульность и отсутствие движущихся частей. Современные разработки направлены на создание мембран с высокой селективностью и производительностью, устойчивых к тяжелым углеводородам и сернистым соединениям.

## 2. Энергетическая эффективность и технологические ограничения.

Для НТС доминирующими являются затраты энергии на компрессию (в детандерных установках) или работу холодильных машин. Критическим параметром является давление на входе и состав газа. При низких давлениях достижение необходимой температуры может быть экономически нецелесообразно. Существенным недостатком являются потери тяжелых углеводородов в конденсате.

Для мембранных систем основными затратами являются энергия на поддержание перепада давления на мембране и предварительная очистка газа от примесей (механических капель, аэрозолей). Ключевой проблемой остается компромисс между селективностью (степенью осушки) и проницаемостью (производительностью), а также пластификация мембран тяжелыми углеводородами.

## 3. Практические рекомендации.

На основе анализа разработаны следующие рекомендации:

1. Выбор технологии: Для крупных месторождений с высоким пластовым давлением (более 5.0 МПа) и требованием глубокой осушки оптимальны энергоэффективные турбодетандерные установки НТС с рекуперацией. Для малодобитных скважин, шельфовых платформ или случаев, когда требуется удаление паров воды и  $\text{CO}_2$  одновременно, перспективны компактные мембранные модули.

2. Учет состава газа: При наличии значительного количества  $C_3+$  углеводородов в схемы НТС необходимо включать блоки низкотемпературной ректификации для их извлечения. Для мембранной осушки требуется тщательный анализ на предмет содержания тяжелых фракций и выбор стойких к ним мембран.
3. Оптимизация энергопотребления: Для НТС обязательна рекуперация холода от осушенного газа. Для мембранных систем следует рассматривать схемы с рекомпрессией пермеата для минимизации потерь метана.
4. Система мониторинга: Внедрение автоматизированных систем контроля точки росы, давления и температуры для оперативной корректировки режима работы и предотвращения гидратообразования.

#### Заключение и перспективы дальнейших исследований

Проведенный анализ позволил систематизировать современные безреагентные подходы к осушке природного газа. Установлено, что развитие идет по пути создания гибридных энергоэффективных схем (например, комбинация предварительного охлаждения и мембранной доосушки) и цифровизации процессов управления. Ключевым условием их эффективного применения является тщательный предпроектный анализ состава и параметров сырого газа.

Перспективы дальнейших исследований включают:

Разработка новых полимерных и неорганических мембранных материалов с повышенной селективностью по воде и устойчивостью к загрязнителям.

Исследование гибридных технологий «мембрана + низкотемпературный процесс» для достижения сверхнизких точек росы с минимальными энергозатратами.

Создание цифровых двойников установок осушки для динамической оптимизации режимов в реальном времени.

Адаптация и разработка отечественных стандартов для проектирования и эксплуатации мембранных систем осушки газа.

Полученные результаты имеют практическую значимость для инжиниринговых и сервисных компаний в области подготовки газа, операторов газотранспортных систем и производителей газоперерабатывающего оборудования.

### Список литературы

1. ГОСТ 5542-2014. Газы горючие природные промышленного и коммунально-бытового назначения. Технические условия.
2. Технический регламент Таможенного союза ТР ТС 032/2013 «О безопасности оборудования, работающего под избыточным давлением».
3. GPSA Engineering Data Book. 13th Edition. – Gas Processors Suppliers Association, 2012.
4. Кандела, Б.А. Подготовка и переработка природного газа и конденсата / Б.А. Кандела, А.И. Гриценко. – М.: Нефть и газ, 1999. – 407 с.
5. Kidnay, A. J., Parrish, W. R. Fundamentals of Natural Gas Processing / A.J. Kidnay, W.R. Parrish. – 2nd ed. – CRC Press, 2006. – 498 p.
6. Соколов, В.И. Мембранное разделение газов / В.И. Соколов, С.В. Чиркин. – М.: Химия, 2007. – 272 с.
7. Baker, R. W. Membrane Technology and Applications / R.W. Baker. – 3rd ed. – John Wiley & Sons, 2012. – 592 p.
8. Стаскевич, Н.Л. Справочник по газоснабжению и использованию газа / Н.Л. Стаскевич, Д.Я. Вигдорчик, Т.Ф. Жила. – Л.: Недра, 1990. – 762 с.
9. ISO 14532:2014. Natural gas – Vocabulary.
10. Отраслевые рекомендации по проектированию установок комплексной подготовки газа (УКПГ). – М.: ВНИИГАЗ, 2018.