

УДК 66.074

АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЙ ПРОМЫСЛОВОЙ ПОДГОТОВКИ ПРИРОДНОГО ГАЗА

Китов Егор Сергеевич¹,
egorkitov3@gmail.com

Ерофеев Владимир Иванович¹,
erofeevvi@mail.ru

Джалилова София Насибуллаевна¹,
dzhaililovasn@mail.ru

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность. В последние годы в связи с сильным истощением нефтяных и газовых месторождений возникла острая необходимость в создании новых высокоэффективных технологий по повышению добычи нефти и газа на эксплуатируемых объектах. Большинство нефтяных и газовых месторождений находится на последних стадиях разработки, для которых характерно падающее пластовое давление, высокая обводненность, большое количество механических примесей и влаги в добываемом углеводородном сырье. Вследствие этого возникает острая необходимость в разработке новых процессов и совершенствовании технологий промышленной подготовки природного газа.

Цель: анализ современных промышленных процессов подготовки природного газа: абсорбционная и адсорбционная очистка природного газа от воды, низкотемпературная сепарация, технология сверхзвуковой сепарации газа; выбор наиболее экономически рентабельного и надёжного процесса и технологии глубокой очистки природного газа от примесей воды в условиях промышленной эксплуатации газовых и нефтяных месторождений Российской Федерации на основе проведенного анализа технологий.

Результаты. Выполнен анализ промышленных процессов и способов осушки природного газа: абсорбционная и адсорбционная осушка, низкотемпературная сепарация и технология сверхзвуковой сепарации газа от содержания влаги и механических примесей. Проанализированы особенности этих процессов, их свойства, технологические схемы, решения, а также достоинства и недостатки. Установлено, что применение абсорбционного процесса осушки природного газа от примесей воды позволяет получать осушенный газ до температуры точки росы по воде до -20 °С. Внедрение технологии адсорбционной осушки природного газа от примесей воды позволяет осушить газ до температуры точки росы по воде в интервале от -38 до -99 °С.

Ключевые слова:

абсорбционная очистка, адсорбционная очистка, диэтиленгликоль, низкотемпературная сепарация, турбодетандер, сверхзвуковая сепарация, 3S-технология.

Введение

Природный газ представляет собой углеводородную смесь, состоящую главным образом из C_nH_m и других соединений, выступающих основным сырьем в химической промышленности. Наиболее распространённым компонентом в природных газах является метан, содержание которого составляет более 90–95 %, и в небольших количествах содержатся высшие алканы C_{2+} . Также в природном газе содержатся неорганические и кислые компоненты: вода, гелий, азот, диоксид углерода и сероводород [1], которые сильно повышают коррозию оборудования. В результате реакции углеводородной группы C_{1+} с парами влаги на определенных участках трубопроводов происходит зарождение газогидратов, что ведет к локальным изменениям технологических параметров и к вероятным авариям. Вследствие этого возникает необходимость в разработке высокоэффективных способов и технологий по осушке и очистке газов [2].

Промысловая подготовка природного газа состоит из следующих технологических этапов: подготовки углеводородных газов, разделения и выделения целевых компонентов. В состав природного газа, не считая углеводородных соединений, также входят азот, диоксид углерода, сернистые смеси, гелий и другие компоненты. Промысловая подготовка газа дает необходимое товарное качество для придания газу необходимых параметров для

транспорта газа по трубопроводам. Для безопасной транспортировки газ должен соответствовать определенным физико-химическим характеристикам по содержанию сероводорода и точки росы по воде, и углеводородам для предотвращения образования газогидратов [3].

Наиболее эффективно зарекомендовали себя в процессе очистки газа от кристаллогидратов, а также удаления влаги и воды из газа до его поступления в технологическое оборудование и газопроводы следующие способы:

- 1) сорбционные – поглощение влаги жидкими и твердыми осушителями;
- 2) низкотемпературная сепарация с изохорным расширением газа – процесс подготовки газа при низких температурах за счет дроссель-эффекта и аппаратов воздушного охлаждения с введением ингибиторов образования гидратов.
- 3) технология сверхзвуковой сепарации газа (Super Sonic Separation) – охлаждение газа в сверхзвуковой закрученной среде природного газа.

Сорбционные способы осушки газа

Абсорбция является наиболее распространенным способом осушки газа в РФ. В процессе абсорбции извлекаются определенные компоненты из газовой смеси жидким абсорбентом. В природном газе обычно содержится вода, которая имеет точку росы от 15

до 50 °С, и для ее удаления используют абсорбенты: диэтиленгликоль или триэтиленгликоль.

К абсорбенту применяются следующие требования:

- высокая селективность;
- большая поглотительная способность;
- низкая летучесть паров;
- устойчивость в работе;
- удобство в работе;
- легкая регенерируемость [4].

Абсорбционная осушка наиболее эффективна в процессе подготовки сухих газов, в которых содержание тяжелых углеводородов не превышает допустимого уровня для безаварийной транспортировки газов по газопроводам. Наиболее качественными осушителями являются гликоли (диэтиленгликоли и триэтиленгликоли – ДЭГ и ТЭГ). Относительно высокая их стабильность к нагреву, химическому разложению и невысокая цена в масштабах производства послужили лучшими критериями при выборе гликолей как абсорбентов.

Физико-химические свойства гликолей (ДЭГ и ТЭГ) широко изучены в научной литературе [5]. В табл. 1 представлены основные свойства ДЭГ и ТЭГ.

Таблица 1. Физико-химические свойства диэтиленгликоля и триэтиленгликоля

Table 1. Physical properties of diethylene glycol and triethylene glycol

Определение Definition	Диэтиленгликоль Diethyleneglycol	Триэтиленгликоль Triethyleneglycol
Химическая формула Chemical formula	$C_4H_{10}O_3$	$C_6H_{14}O_4$
Относительная плотность Relative density	1,118	1,126
Температура кипения Boiling point, °C	244,8	278,3
Давление насыщенных паров при 20 °С, Па Saturated vapor pressure at 20 °C, Pa	1,31	1,31
Вязкость при 20 °С, мПа·с Viscosity at 20 °C, mPa·s	35,7	47,8

Ключевые физико-химические свойства ДЭГ и ТЭГ в табл. 1 сходны. Главные различия ДЭГ и ТЭГ заключаются в вязкости и температуре кипения, которые играют основную роль в массообменных процессах в абсорбере и десорбере [6]. Принципиальная технологическая схема осушки природного газа ДЭГ изображена на рис. 1 [7].

Природный газ, поступая в кубовую часть абсорбера, контактирует с абсорбентом, и осушенный газ отводится через шлемовую часть абсорбера, при этом ДЭГ, насыщенный влагой, отводится через теплообменник в выветриватель для отдува поглощенных углеводородов. Далее ДЭГ поступает на регенерацию в десорбер, где происходит испарение и отвод поглощенной ДЭГ в абсорбере влаги из газа. В схему входят насосы, запорная арматура и некоторое другое оборудование.

Подобные установки осушки газа, применяя абсорбционный процесс, позволяют получать температуру точки росы по воде до –20 °С.

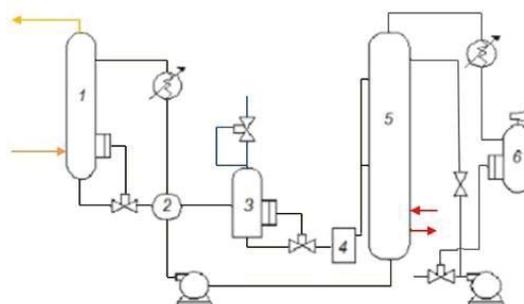


Рис. 1. Технологическая схема осушки газа диэтиленгликолем: 1 – абсорбер; 2 – теплообменник; 3 – выветриватель; 4 – фильтр; 5 – десорбер; 6 – сборник конденсата

Fig. 1. Absorption dehydration of natural gas with diethylene glycol: 1 – absorber; 2 – heat exchanger; 3 – weathering tank; 4 – filter; 5 – desorber; 6 – condensate collector

Абсорбционный метод наряду с другими методами осушки газа имеет свои достоинства и недостатки, которые указаны в табл. 2 [8].

Таблица 2. Достоинства и недостатки абсорбционного процесса

Table 2. Advantages and disadvantages of absorption

Достоинства Advantages	Недостатки Disadvantages
Низкие перепады давления Low pressure drops	Потери абсорбента Absorbent losses
Невысокие капитальные затраты Low capital costs	Относительная сложность регенерации Relative difficulty of regeneration
Осушка газов с веществами, разрушающими твердые сорбенты Drying of gases with substances that destroy solid sorbents	Средний уровень осушки Average drying level

В одном ряду с абсорбционным методом осушки газа массовое применение за рубежом получили установки адсорбционного типа, которые имеют преимущества в сравнении с абсорбционным методом.

Адсорбция – процесс поглощения целевых компонентов из газовой фазы или жидкости слоем твердого тела. Существует химическая и физическая адсорбция. Адсорбенты – это твердые поглотители, вступающие в массообменный процесс с молекулами газа или жидкости [9, 10].

Широкое применение получили следующие адсорбенты: силикагели, оксид алюминия, различные цеолиты. Конструктивная особенность адсорбентов, изготавливаемых в виде гранул и шариков, повышает их эффективность за счет снижения сопротивления в газе [11, 12].

Физическая адсорбция протекает при загрузке в адсорбер молекулярных сит. Загрузка цеолитов при эксплуатации сохраняет свои свойства по влагоемкости, это было подтверждено в работе [13]. При использовании адсорбционной осушки газа температура точки росы по воде достигает от –38 до –99 °С. Схема установки адсорбционной осушки природного газа изображена на рис. 2.

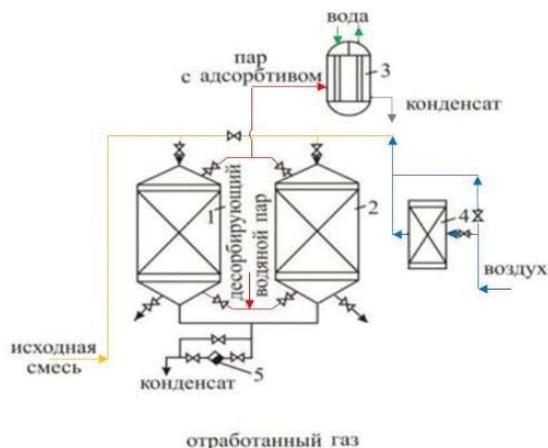


Рис. 2. Адсорбционная осушка природного газа: 1, 2 – адсорберы; 3 – конденсатор водяного пара; 4 – калорифер; 5 – конденсатоотводчик

Fig. 2. Adsorption drying of natural gas: 1, 2 – adsorbers; 3 – water vapor and vapor condenser; 4 – heater; 5 – condensate trap

Природный газ поступает в адсорбер – 1 и инициирует начало процесса. При завершении работы адсорбер – 1 переключается на стадию десорбции, исходный газ поступает в адсорбер – 2. Регенерация адсорбента происходит острым водяным паром, подаваемым в нижнюю часть колонны адсорбера. При этом пары адсорбата переходят в конденсатор – 3.

Конденсат в смеси с водой поступает на разделение, а адсорбент в адсорбере – 2 осушается под горячим воздухом, поступающим в адсорбер через калорифер – 4. Охлаждение адсорбента происходит атмосферным воздухом, подаваемым по байпасу.

На настоящий момент адсорбционная осушка газа в Российской Федерации еще не получила широкого применения, по сравнению с абсорбционной осушкой. Главным критерием сдерживания внедрения процесса адсорбционной осушки природного газа является увеличение капиталоемких затрат на техническое перевооружение абсорбционных установок газа.

Тем не менее адсорбционный процесс получил широкое распространение в Российской Федерации и ряде других зарубежных стран для осушки сжиженного природного газа для промышленного применения.

Адсорбционный процесс имеет также достоинства и недостатки в промышленном применении осушки природного газа (табл. 3).

Таблица 3. Достоинства и недостатки адсорбционного процесса

Table 3. Advantages and disadvantages of adsorption

Достоинства/Advantages	Недостатки/Disadvantages
Долгий срок эксплуатации Long service life	Довольно высокие экономические и капиталоемкие затраты Relatively high economic and capital-intensive costs
Получение низкой температуры точки росы Obtaining low dew point temperature	
Надежность эксплуатации Reliability of operation	

Основным критерием выбора технологии осушки газа является необходимая температура точки росы [14]. При использовании природного газа в промышленности учитывается ряд важных факторов, таких как параметры месторождения, необходимое оборудование средств измерения и автоматизации, климатические условия добычи и транспортировки газа и другие.

Для выбора и использования определенного метода подготовки газа необходимо рассчитать расход энергетических параметров: пар, электроэнергия и вода. На новых установках осушки газа они являются основными эксплуатируемыми затратами [15]. Эти параметры зависят как от термодинамических величин, так и от применяемого метода подготовки, глубины залегания компонентов, новизны оборудования и т. д. При расчете и моделировании установок осушки снижение энергозатрат достигается за счет:

- применения дифференциального ввода и отвода тепла;
- применения рекуперативных теплообменников с высоким коэффициентом теплоотдачи;
- выбора массообменного оборудования, работающего с распылением на тарелки. Здесь следует предусмотреть увеличенное количество тарелок, чтобы снизить количество среды, подаваемой на распыление. Важным критерием при проектировании является определение тарелки ввода сырья в колонну и подбор параметров теплоносителя;
- предварительной очистки сырья от механических примесей и обеспечения качества хладагента, как чистой, так и сухой поверхности оборудования;
- изменения температуры хладагентов в холодное время года, что помогает в технологическом цикле и приводит к уменьшению энергозатрат;
- изменения температуры точки росы ниже заданного параметра, что увеличивает энергозатраты на процесс.
- предотвращение потери тепла за счет качественной изоляции;
- использование тепла энергии отходящих дымовых газов;
- подбор давления в соответствии с параметрами компрессии на ступенчатых агрегатах.

Таким образом температура точки росы по влаге и углеводородам является основным требованием при подготовке газа.

При проектировании адсорбера решающее значение имеет рабочее давление аппарата, которое влияет на расчет количества металла, расход осушителя, подаваемого в абсорбер, а также энергоресурсы на работу циркуляционного насоса. Качество и количество адсорбента и параметры абсорбции газа зависят от качественных показателей: состав главного вещества в адсорбенте, расход вещества, вязкости, гигроскопичности. Качественные показатели влияют на температуру точки росы газа на выходе из адсорбера [16].

Получение точки росы до $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ является результативным адсорбционным процессом с водным раствором гликолей и содержанием адсорбента до 99,5 %.

Двух- и трехступенчатые установки НТС нашли большее применение на газоконденсатных месторождениях. Одноступенчатые установки НТС увеличивают потери целевых компонентов газа C_{2+} , при том что природный газ преимущественно состоит из метана и, следовательно, число ступеней не оказывает основного влияния на результат осушки газа. Из этого следует, что решающим значением при осушке газа методом НТС являются температура и перепад давлений.

Сверхзвуковая сепарация газа

На рис. 5 представлен 3S-сепаратор для иницирования ускорения закрученной среды природного газа до скорости выше звуковой, образования конденсата, разделения целевых фракций газа и торможения потока.

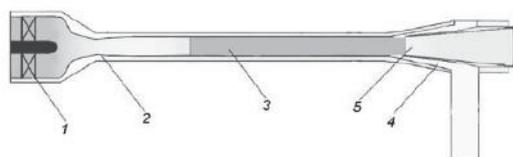


Рис. 5. Устройство 3S-сепаратора: 1 – лопатки неподвижного завихрителя; 2 – сопло Лавала; 3 – рабочая область; 4 – диффузор для торможения потока; 5 – диффузор

Fig. 5. 3S separator elements: 1 – fixed vortex tube blades; 2 – Laval nozzle; 3 – working area; 4 – diffuser for flow braking; 5 – diffuser

В 3S-сепараторе преобразование осевой скорости в тангенциальную происходит в дозвуковом режиме, поэтому после рабочей области аппарата не возникает косой ударной волны. В то же время газ расширяется до сверхзвуковой скорости в закрученном состоянии в расходящемся сечении сопла Лавала. Одновременное возникновение завихрения и конденсации может эффективно уменьшить негативные последствия по-

вторного испарения капель и повысить эффективность разделения сепаратора.

Закручивание потока газа выше скорости звука происходит в интервале от -50 до -100 °С, что ведет к глубокому извлечению заданных целевых углеводородов из природного газа в 3S-сепараторе. Слияние НТС с 3S-технологией применимо для получения фракции C_{5+} , воды, а также углеводородов C_{2+} (рис. 6).

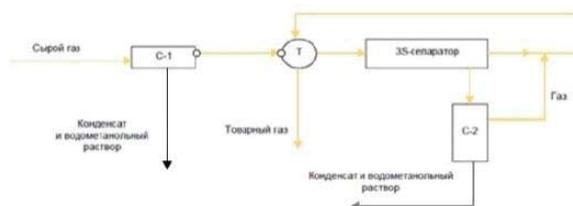


Рис. 6. НТС с 3S-сепаратором

Fig. 6. Low temperature separation with 3S separator

Устройство 3S-сепаратора с НТС состоит из блока охлаждения газа в сепараторе C-2, в который попадает частично поступивший газ – двухфазный поток из 3S-сепаратора. На основании этого при сверхзвуковом охлаждении газа в сверхзвуковом сепараторе происходит разделение на двухфазный поток, в первом потоке находятся образовавшиеся компоненты углеводородов, а во втором потоке – очищенный от углеводородов газ.

Применение схемы НТС с сверхзвуковым сепаратором конструктивно уменьшает размеры установки и влияет на металлоемкость всего оборудования при проектировании, что значительно сокращает эксплуатационные и обслуживающие затраты [19]. Отсутствие в сверхзвуковом сепараторе подвижных частей способствует высокой надежности.

Результаты исследования показывают, что тяжелые углеводороды C_{3+} в 3S-сепараторе разделяются качественнее, чем при эксплуатации схемы с дросселем и турбодетандером [20].

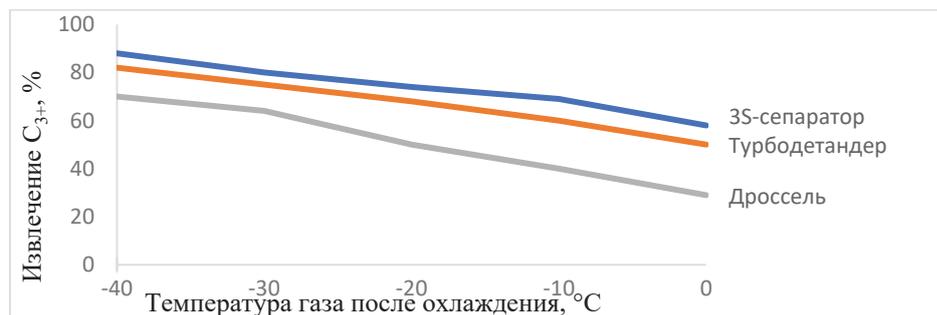


Рис. 7. Отделение C_{3+} в зависимости от температуры охлаждения различными методами

Fig. 7. C_{3+} separation depending on the cooling temperature by various methods

На основании зависимости из рис. 7 видно, что применение различных методов по извлечению компонентов C_{3+} из природного газа в зависимости от температуры показывают вариативные результаты [21, 22]. Исходный природный газ принят с температурой 20 °С и в пропорции: метан – 90 мол. %, этан – 2 мол. %, пропан – 4 мол. % и бутан – 4 мол. % [20].

Сверхзвуковой сепаратор исключает гидратообразование и процесс регенерации по причине короткого времени пребывания газа в устройстве, что удешевляет процесс подготовки природного газа и повышает экологическую безопасность производства. Однако сверхзвуковые сепараторы на сегодняшний день минимально представлены в полевых условиях, несмот-

ря на многочисленные преимущества по сравнению с другими методами обезвоживания газа. В основном это объясняется неизученным в полной мере конструктивом и рабочими параметрами, которые следует контролировать для обеспечения оптимального обезвоживания устройства для сверхзвуковой сепарации.

Заключение

В настоящей статье были подробно рассмотрены три различных процесса промышленной подготовки природного газа. Следует отметить, что каждый процесс имеет свои достоинства и недостатки.

Сорбционные процессы, а именно абсорбционный способ очистки газа, получили наибольшее распространение в России ввиду дешевизны абсорбента ДЭГ по сравнению с ТЭГ, хотя температура кипения у ТЭГ выше, чем у ДЭГ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wolany A. et al. Erdgas und erneuerbares Methan // Erdgas und erneuerbares Methan für den Fahrzeugantrieb. Der Fahrzeugantrieb / Ed. by R. van Basshuysen. – Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015. – 182 p. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-658-07159-2_4 (дата обращения 10.08.2022).
2. Джалилова С.Н., Ушева Н.В., Ерофеев В.И. Исследование и корректировка технологических режимов процессов подготовки нефтяного сырья // Успехи современного естествознания. – 2017. – № 4. – С. 19–23.
3. СТО Газпром 089-2010 «Газ горючий природный, поставляемый и транспортируемый по магистральным газопроводам. Технические условия». – М.: ОАО «Газпром», 2010. – 19 с.
4. Carroll J. Natural gas hydrates: a guide for engineer. – Burlington, Gulf Professional Publ., 2020. – 400 p.
5. Ланчаков Г.А., Кульков А.Н., Зиберт Г.К. Технологические процессы подготовки природного газа и методы расчета оборудования. – М.: Недра-Бизнесцентр, 2000. – 279 с.
6. Neagu M., Cursaru D. Technical and economic evaluations of the triethylene glycol regeneration processes in natural gas dehydration plants // Journal of Natural Gas Science and Engineering. – 2017. – V. 37. – P. 327–340.
7. Телешева К.С., Стародуб М.В. Абсорбционная осушка газа // Международный студенческий научный вестник. – 2018. – № 3–4. – С. 686–688. URL: <https://eduherald.ru/article/view?id=18396>
8. Процессы и аппараты нефтегазопереработки и нефтехимии / А.И. Владимирова, Ю.К. Молоканов, А.И. Скобло, В.А. Щелкунов. – М.: Недра, 2000. – 211 с.
9. Kidnay A.J., Parrish W.R., McCartney D.G. Fundamentals of natural gas processing. – Boca Raton, USA: CRC Press, 2012. – 574 p.
10. Garcia L., Poveda Y., Rodriguez G. Adsorption separation of oxidative coupling of methane effluent gases. Mini-plant scale experiments and modeling // Journal of natural gas science and engineering. – 2019. – V. 61. – P. 106–118.
11. Natural gas dehydration by desiccant materials / A.A. Farag Hassan, M.M. Ezzat, H. Amer, A.W. Nashed // Alexandria Engineering Journal. – 2011. – V. 50. – P. 431–439.

Информация об авторах

Китов Е.С., аспирант отделения нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Ерофеев В.И., доктор технических наук, профессор отделения нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Джалилова С.Н., кандидат технических наук, ассистент отделения нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Адсорбционный способ очистки газа от влаги применим в случае получения более низких температур росы по воде.

Метод низкотемпературной сепарации применяется во избежание образования газогидратов и для получения низкой точки росы по воде, что позволяет транспортировать природный газ по магистральным газопроводам на дальние расстояния в условиях Крайнего Севера.

Применение 3S-технологии выгодно отличает от установок с эффектом Джоуля–Томсона и турбодетандера, так как позволяет на выходе из установки осушки газа сохранять давление до 10 МПа. Это позволяет вести транспортировку подготовленного газа с морских месторождений на большом расстоянии от берега. В настоящее время технологии подготовки природного газа совершенствуются во многих странах мира.

12. Northrop S., Sundaram N. Modified cycles, adsorbents improve gas treatment, increase molsieve life // Oil and Gas Journal. – 2008. – V. 106. – № 29. – P. 54–60.
13. Algeri C., Drioli E. Zeolite membranes: synthesis and applications // Separation and purification technology. – 2021. – V. 278. – P. 295–312.
14. Energy separation and condensation effects in pressure energy recovery process of natural gas supersonic dehydration / Yang Liu, Xuewen Cao, Jian Yang, Yuxuan Li, Jiang Bian // Energy Conversion and Management. – 2021. – V. 245. – P. 557–572.
15. Сбор и промышленная подготовка газа на северных месторождениях России / А.И. Гриценко, В.А. Истомин, А.Н. Кульков, Р.С. Сулейманов. – М.: Недра, 1999. – 473 с.
16. Тронов В.П. Сепарация газа и сокращение потерь нефти. – Казань: Фэн, 2002. – 408 с.
17. Габдулов И.Н. Анализ низкотемпературной сепарации с изотермальным расширением газа // Научные исследования. – 2019. – № 5 (31). – С. 10–13.
18. Efficient utilization of energy of natural gas pressure drop / N.V. Kholod, V.V. Kholod, V.A. Kirii, Y.P. Yas'yan // Chemistry and Technology of Fuels and Oils. – 2021. – V. 57. – № 2. – P. 209–215.
19. Корытников Р.В., Яхонтов Д.А., Багиров Л.А. Промышленные испытания технологии сверхзвуковой сепарации на установке НТС УПИМТ УКПП-1С Заполярного НГКМ / Нефтепромышленное дело. – 2012. – № 6. – С. 34–40.
20. Alfyorov V., Bagirov L., Dmitriev L. Supersonic nozzle efficiently separates natural gas components // Oil & Gas Journal. – 2005. – V. 103. – № 20. – P. 53–58.
21. Dzhaliilova S.N., Erofeev V.I. The study of technological mode options for production of oil of required quality // Key Engineering Materials. – 2017. – V. 743. – P. 394–397.
22. Лиинтин И.А., Ерофеев В.И., Джалилова С.Н. Особенности промышленной подготовки природного газа // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 6. – С. 96–102.

Поступила 13.08.2022 г.

Прошла рецензирование 14.09.2022 г.

UDC 66.074

ANALYSIS OF TECHNOLOGIES OF NATURAL GAS FIELD PREPARATION

Egor S. Kitov¹,
egorkitov3@gmail.com

Vladimir I. Erofeev¹,
erofeevvi@mail.ru

Sofiya N. Dzhaliilova¹,
dzhaliilovasn@mail.ru

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

The relevance. In recent years, due to the severe depletion of oil and gas fields, there is an urgent need to create new highly efficient technologies to increase oil and gas production both in oil and gas fields. Most of these fields are at the last stages of development, which are characterized by falling reservoir pressure, high water cut, a large amount of mechanical impurities and moisture in the produced hydrocarbon feedstock. As a result, there is an urgent need to develop new processes and improve technologies for field preparation of natural gas.

Purpose: analysis of modern industrial processes of natural gas preparation: absorption and adsorption purification of natural gas from water, low-temperature separation, supersonic gas separation technology; choice of the most cost-effective and reliable process and technology for natural gas deep purification from water impurities in the conditions of industrial operation of gas and oil fields of the Russian Federation based on the analysis of technologies.

Results. The analysis of industrial processes and methods of drying natural gas: absorption and adsorption drying, low-temperature separation and technology of supersonic separation of gas from moisture content and mechanical impurities, is carried out. The features of these processes, their properties, technological schemes, solutions, as well as advantages and disadvantages are analyzed. It was established that the use of natural gas absorption drying from water impurities makes it possible to obtain dried gas to a water dew point temperature of up to -20 °C. The introduction of the technology of natural gas adsorption drying from water impurities makes it possible to dry gas to a water dew point temperature in the range from -38 to -99 °C.

Key words:

absorption purification, adsorption purification, diethylene glycol, low temperature separation, turbo expander, supersonic separation, 3S technology.

REFERENCES

- Wolany A. Erdgas und erneuerbares Methan. Erdgas und erneuerbares Methan für den Fahrzeugantrieb [Natural gas and renewable methane for vehicle propulsion]. *Der Fahrzeugantrieb*. Ed. by R. van Basshuysen. Wiesbaden, Springer Vieweg, 2015. 182 p. Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-658-07159-2_4 (accessed 10 August 2022).
- Dzhaliilova S.N., Usheva N.V., Erofeev V.I. Research and adjustment of technological regimes of the processes of preparation of petroleum raw materials. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*, 2017, no. 4, pp. 19–23. In Rus.
- STO Gazprom 089-2010. *Gaz goryuchiy prirodny, postavlyayemy i transportiruyemy po magistralnym gazoprovodam. Tekhnicheskoe usloviye* [STO Gazprom 089-2010. Natural gas, supplied and transported through main gas pipelines. Technical conditions]. Moscow, OAO Gazprom Publ., 2010. 15 p.
- Carroll J. *Natural gas hydrates: a guide for engineer*. Burlington, Gulf Professional Publ., 2020. 400 p.
- Lanchakov G.A., Kulkov A.N., Zibert G.K. *Tekhnologicheskie protsessy podgotovki prirodnogo gaza i metody rascheta oborudovaniya* [Technological processes of natural gas preparation and methods of equipment calculation]. Moscow, Nedra Publ., 2000. 279 p.
- Neagu M., Cursaru D. Technical and economic evaluations of the triethylene glycol regeneration processes in natural gas dehydration plants. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2017, vol. 37, pp. 327–340.
- Telishcheva K.S., Starodub M.W. Gas absorption drying. *International Student Scientific Bulletin*, 2018, no. 3–4, pp. 686–688. In Rus.
- Vladimirov A.I., Molokanov Yu.K., Skoblo A.I., Shchelkunov V.A. *Protsesy i apparaty neftegazopererabotki i neftekhimii* [Processes and apparatuses of oil and gas processing and petrochemistry]. Moscow, Nedra, 2000. 211 p.
- Kidnay A.J., Parrish W.R., McCartney D.G. *Fundamentals of natural gas processing*. Boca Raton, USA, CRC Press, 2012. 574 p.
- Garcia L., Poveda Y., Rodriguez G. Adsorption separation of oxidative coupling of methane effluent gases. Mini-plant scale experiments and modeling. *Journal of natural gas science and engineering*, 2019, vol. 61, pp. 106–118.
- Farag Hassan A.A., Ezzat M.M., Amer H., Nashed A.W. Natural gas dehydration by desiccant materials. *Alexandria Engineering Journal*, 2011, vol. 50, pp. 431–439.
- Northrop S., Sundaram N. Modified cycles, adsorbents improve gas treatment, increase molsieve life. *Oil and Gas Journal*, 2008, vol. 106, no. 29, pp. 54–60.
- Algieri C., Drioli E. Zeolite membranes: synthesis and applications. *Separation and purification technology*, 2021, vol. 278, pp. 295–312.
- Yang Liu, Xuewen Cao, Jian Yang, Yuxuan Li, Jiang Bian Energy separation and condensation effects in pressure energy recovery process of natural gas supersonic dehydration. *Energy Conversion and Management*, 2021, vol. 245, pp. 557–572.
- Gritsenko A.I., Istomin V.A., Kulkov A.N., Suleymanov R.S. *Sbor i promyslovaya podgotovka gaza na severnykh mestorozhdeniyakh Rossii* [Gathering and conditioning of gas on the northern gas fields of Russia]. Moscow, Nedra Publ., 1999. 472 p.
- Tronov V.P. *Separatsiya gaza i sokrashchenie poter nefti* [Gas separation and reduction of oil losses]. Kazan, Feng Publ., 2002. 408 p.
- Gabdulov I.N. Analis niskotemperaturnoy separatsii s isoentalpinym rasshireniem gaza [Analysis of low-temperature separation with isenthalpy gas expansion]. *Scientific research*, 2019, no. 5 (31), pp. 10–13.
- Kholod N.V., Kholod V.V., Kirii V.A., Yas'yan Y.P. Efficient utilization of energy of natural gas pressure drop. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*, 2021, vol. 57, no. 2, pp. 209–215.
- Korytnikov R.V., Yakhontov D.A., Bagirov L.A. Promishlennyye ispytaniya tekhnologii sverkhzvukovoy separatsii gaza na

- ustanovke NTS UPMT UKGP-1C Zapolyarnogo NGKM [Industrial tests of supersonic separation technology at the installation of NTS UPMT UKGP-1C Polar NGCM]. *Oilfield business*, 2012, no. 6, pp. 34–40.
20. Alfyorov V., Bagirov L., Dmitriev L. Supersonic nozzle efficiently separates natural gas components. *Oil & Gas Journal*, 2005, vol. 103, no. 20, pp. 53–58.
21. Dzhililova S.N., Erofeev V.I. The study of technological mode options for production of oil of required quality. *Key Engineering Materials*, 2017, vol. 743, pp. 394–397.
22. Liintin I.A., Erofeev V.I., Dzhililova S.N. Features of commercial treatment of natural gas. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 6, pp. 96–102. In Rus.

Received: 13 August 2022.
Reviewed: 14 September 2022.

Information about the authors

Egor S. Kitov, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

Vladimir I. Erofeev, Dr. Sc., academician of RANS, professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Sofia N. Dzhililova, Cand. Sc., assistant, National Research Tomsk Polytechnic University.