

МАШИНЫ И АППАРАТЫ, ПРОЦЕССЫ ХОЛОДИЛЬНОЙ И КРИОГЕННОЙ ТЯГИ / MACHINES AND APPARATUS, REFRIGERATION AND CRYOGENIC TRACTION PROCESSES

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.146.161>

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ИЗВЛЕЧЕНИЯ СОЕДИНЕНИЙ АЛКАНОВ И АЛКЕНОВ ИЗ ПРИРОДНОГО ГАЗА

Научная статья

Лихолитов Д.С.^{1,*}

¹ ORCID : 0009-0000-3580-7566;

¹ Университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (likhdima[at]yandex.ru)

Аннотация

В работе рассмотрены актуальность извлечения высококипящих компонентов из природного газа при его подготовке к сжижению, область применения этана, пропана, бутана и их производных, методы извлечения этана пропана и бутана из природного газа. Целью данной работы являлось улучшение методов извлечения высококипящих компонентов из природного газа за счет изменения технологических схем и введения в них новых конструктивных элементов. Приведены результаты сравнительного анализа двух низкотемпературных методов. Численный эксперимент проводился с применением программы Aspen HYSYS. Было установлено, что мольные доли метана выше в схеме с дросселем, чем в схеме низкотемпературной сепарации с впрыском метанола, что говорит о более полном извлечении компонентов. Однако мольные доли этана меньше в первой схеме, чем во второй.

Ключевые слова: алканы, низкотемпературная сепарация, высококипящие фракции.

INCREASING THE EFFICIENCY OF SYSTEMS FOR EXTRACTION OF ALKANE AND ALKENES COMPOUNDS FROM NATURAL GAS

Research article

Likholitov D.S.^{1,*}

¹ ORCID : 0009-0000-3580-7566;

¹ University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Saint-Petersburg, Russian Federation

* Corresponding author (likhdima[at]yandex.ru)

Abstract

The work reviews the relevance of extraction of high-boiling components from natural gas in its preparation for liquefaction, the field of application of ethane, propane, butane and their derivatives, methods of extraction of ethane propane and butane from natural gas. The aim of this paper was to improve the methods of extraction of high-boiling components from natural gas by changing the technological schemes and introducing new design elements into them. The results of comparative analysis of two low-temperature methods are presented. Numerical experiment was carried out using the Aspen HYSYS programme. It was found that the mole fractions of methane are higher in the choke scheme than in the low-temperature separation scheme with methanol injection, indicating a more complete extraction of components. However, the mole fractions of ethane are lower in the first scheme than in the second scheme.

Keywords: alkanes, low-temperature separation, high-boiling fractions.

Введение

Поступательный рост экономики Российской Федерации приводит к увеличению спроса на соединения алканов и алкенов на основе этана, пропана, бутана и др. Целью данной работы является улучшение методов извлечения высококипящих компонентов из природного газа за счет изменения технологических схем и введения в них новых конструктивных элементов. Во многих новых месторождениях Сибири и Дальнего Востока в газе содержится большое количество этана, этилена и других соединений, которые являются ценным сырьем для газохимической промышленности, что обуславливает необходимость внедрения и развития новых технологических процессов глубокого извлечения высококипящих компонентов из природного газа при его подготовке к сжижению [1].

Перед сжижением из газа следует удалить кислые соединения серы, углекислого газа, влаги и очистить его от высококипящих фракций. В большинстве месторождений РФ в природном газе содержатся высококипящие фракции углеводородов, в частности, алканов. С целью наибольшего извлечения углеводородов для их дальнейшей переработки и получения дорогого продукта следует исследовать и внедрять новые способы их извлечения из природного газа [2].

Когда высококипящие фракции подвергаются переработке, из них выделяются элементы, которые используются в последующих процессах. Этановая фракция используется для производства лакокрасочной продукции, а также в качестве хладагента в различных процессах. Пропан используется в качестве газа в бытовых нуждах и для заправки автомобилей, а также может использоваться как хладагент на многих перерабатывающих предприятиях. Бутан используется для изготовления синтетического каучука. Для извлечения высококипящих фракций из природного газа используется метод отбензинивания природного газа [3].

Этан – органическое вещество из класса насыщенных углеводородов – алканов [4]. В естественном состоянии он находится в составе природного газа, в сланцевом газе. Газ этан не растворяется в воде и других полярных растворителях, но растворяется в некоторых неполярных органических растворителях. Сжиженный этан, являясь

криогенной жидкостью, может использоваться для замораживания объектов, но способен нанести ожоги человеческой коже. Пары жидкого этана тяжелее воздуха и, находясь на земле, могут загореться. Также этан можно использовать в качестве хладагента в бытовых холодильниках.

Пропан [5] является одним из самых популярных алканов и находит широкое применение в различных областях. Пропан наиболее известен как альтернативное транспортное топливо, которое превосходит по своим характеристикам привычный бензин. Часто пропан используется вместе с бутаном, образуя смесь, которая имеет различные процентные соотношения компонент в зависимости от сезонных погодных условий. Пропан практически не растворим в воде, что определяет его преимущества при использовании для приготовления пищи, обогрева, а также в промышленных процессах, таких как сварка и пайка. Благодаря своим характеристикам и доступности смесь пропан-бутан является незаменимым ресурсом во многих отраслях.

Бутан [6] – органическое вещество класса алканов, состоящее из четырех атомов углерода и десяти атомов водорода. В природе он содержится в природном газе, который добывается из газовых и газоконденсатных месторождений. В воде и других полярных растворителях растворяется слабо, но растворяется в некоторых неполярных органических веществах. Бутан используется для получения бутилена, 1,3-бутадиена, компонентов бензинов с высоким октановым числом, для производства других химических веществ. В быту бутан используется в пищевой промышленности в качестве пищевой добавки, в смеси с пропаном для приготовления пищи, на транспортных средствах, в отопительных приборах и системах кондиционирования воздуха, в качестве хладагента в холодильниках и холодильных установках.

Методы и принципы исследования

Первоначально для извлечения высококипящих фракций широко применялся компрессионный метод. Принцип этого метода заключался в том, что газ сжимался до максимального давления 4 МПа и затем охлаждался до температуры максимально $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Затем широкое применение нашли масляная и низкотемпературная абсорбция. В этих методах температура устанавливалась на уровне до $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$ и давление – от 7 МПа. В качестве абсорбента в этой технологии использовались керосиновые фракции, при которых степень извлечения углеводородов составляла максимум 95%. Чтобы извлечь оставшиеся фракции в схеме с низкотемпературной абсорбцией может использоваться абсорбция на активированном угле [7].

В настоящее время наиболее эффективным методом извлечения фракций является низкотемпературная сепарация. Расчеты в данной работе выполнены с помощью программы AspenHYSYS [8], которая является одним из наиболее известных и распространенных в нефтегазовой отрасли симулятором. В расчетах использовано уравнение Пенга–Робинсона, которое позволяет рассчитать свойства материальных потоков, а также всех элементов схем. Достоинство этого уравнения заключается в том, что свойства чистого газа описываются этим уравнением с помощью только трех индивидуальных свойств: температуры и давления критической точки газа и ацентрического фактора. Эти параметры определены для широкого круга веществ.

Уравнение записывается в виде:

$$P = \frac{RT}{V-b} - \frac{a\alpha}{V^2+2bV-b^2}$$

где P – давление; R – постоянная газовая постоянная; T – температура; V – молярный объем; a , b – коэффициенты, α – универсальная функция.

Параметры в уравнении имеют вид:

$$a = a_0 \frac{R^2 T_c^2}{P_c};$$

$$b = b_0 \frac{RT_c}{P_c};$$

$$a_0 = 0,45724; b_0 = 0,07780;$$

$$\alpha = \left[1 + \left(0,37464 + 1,54226\omega - 0,26922\omega^2 \right) (1 - T_r) \right]^2$$

где ω – ацентрический фактор; T_c – критическая температура, P_c – критическое давление; T_r – относительная температура.

Мольные доли газа приняты в соответствии с данными предприятия Ямал СПГ приведены в табл. 1, расчетные параметры оборудования – в табл. 2, 3.

Таблица 1 - Исходный состав природного газа

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.146.161.1>

Состав газа	Мольное содержание компонента	Параметры газа	Значение
Азот	0,0018	Давление газа на входе, кПа	4000
CO ₂	0,0091		
Метан	0,8082	Температура газа на входе, °C	16
Этан	0,0646		
Пропан	0,0200	Расход газа, кмоль/	1000

н - Бутан	0,0336	час	
и - Бутан	0,0336		
Этилен	0,0291		

Таблица 2 - Аппараты, применяемые для процесса низкотемпературной сепарации природного газа с впрыском метанола

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.146.161.2>

Аппараты в схеме	Параметры аппаратов
Входной сепаратор	Температура 16 °С. Давление 40 бар
Теплообменник	Перепад давлений 0 бар. Температура на выходе 40 °С
Дроссельный клапан	Перепад давлений 39 бар
Низкотемпературный сепаратор	Температура 12,99 °С. Давление 1 бар
Теплообменник 2	Перепад давлений 0,2 бар. Температура на выходе 15 °С

Природный газ после сбора с месторождения отправляется на первую ступень сепарации (рис. 1). В первом сепараторе от газа отделяется нестабильный конденсат. Затем газ направляется в теплообменник для рекуперации холода дросселированного газа и охлаждается на 15 °С и более. После теплообменника охлажденный газ подается на дроссель, где охлаждается на 20 °С. Затем газожидкостная смесь поступает в низкотемпературный сепаратор. Там газ отделяется от жидкой фазы; очищенный холодный газ поступает в теплообменник с сырым газом и затем в газопровод как товарный газ. Перед теплообменником предусмотрен впрыск ингибитора гидратообразования – метанола. Углеводородный конденсат поступает в разделитель, в котором он дегазируется. Затем конденсат отправляется на установку стабилизации [9].

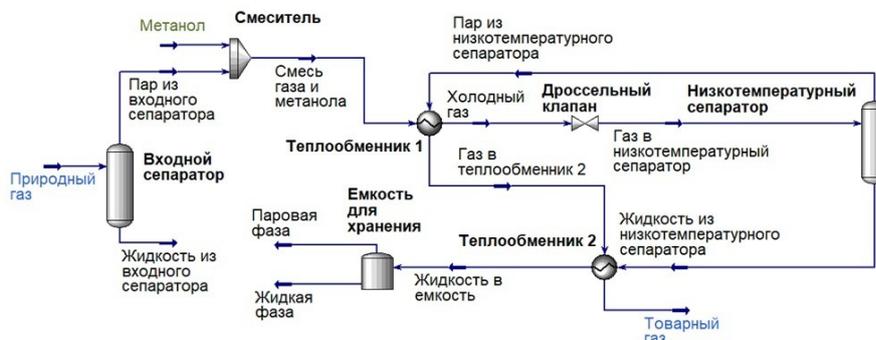


Рисунок 1 - Схема низкотемпературной сепарации природного газа с впрыском метанола

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.146.161.3>

Таблица 3 - Аппараты, применяемые для процесса низкотемпературной сепарации природного газа с дросселем, и их свойства

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.146.161.4>

Аппараты в схеме	Параметры аппаратов
Входной сепаратор	Температура 16 °С. Давление 40 бар
Низкотемпературный теплообменник	Перепад давлений 0,7 бар. Температура на выходе –5 °С
Дроссельный клапан	Перепад давлений 0,7 бар
Низкотемпературный сепаратор	Температура –5,370 °С. Давление 38,70 бар

Ректификационная колонна	Давление в ребойлере 14 бар. Давление в конденсаторе 13 бар. Температура в ребойлере 100 °С. Температура в конденсаторе 5 °С. Количество пропана в кубовой жидкости 2%
--------------------------	--

На рис. 2 изображена схема низкотемпературной сепарации природного газа с применением дросселя. Исходный поток природного газа направляется в сепаратор, где разделяется на паровую и жидкую фракции. Жидкость из входного сепаратора поступает в смеситель. В свою очередь, пар поступает в теплообменник для первоначального охлаждения. Из теплообменника выходит товарный газ для потребителей, а холодный газ направляется в дроссель для повторного охлаждения. Охлажденный газ идет в низкотемпературный сепаратор, откуда пар возвращается в теплообменник, а жидкость смешивается в смесителе с жидкостью из входного сепаратора. Затем весь конденсат направляется в колонну–депропанизатор для выделения продукта с пропановой фракцией [10].



Рисунок 2 - Схема низкотемпературной сепарации природного газа с применением дросселя

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.146.161.5>

Обсуждение

В результате численных экспериментов установлено, что мольные доли метана в схеме с дросселем выше, чем в схеме низкотемпературной сепарации с впрыском метанола, что говорит о более полном извлечении компонентов (табл. 4). Однако мольные доли этана меньше в первой схеме, чем во второй. Также, было установлено, что мощность установки низкотемпературной сепарации природного газа с дросселем значительно выше, чем установки низкотемпературной сепарации с впрыском метанола.

Таблица 4 - Сравнение мольных долей компонентов товарного газа

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.146.161.6>

Состав газа	Мольные доли в природном газе	Мольные доли в товарном газе (рис. 1)	Мольные доли в товарном газе (рис. 2)
Метан	0,8082	0,7515	0,8386
Этан	0,0646	0,0599	0,0631
Пропан	0,0200	0,0185	0,0167
Н-бутан	0,0336	0,0311	0,0219
И-бутан	0,0336	0,0309	0,0191
Этилен	0,0291	0,0270	0,0294

При уменьшении температуры холодного газа в схеме с дросселем, мольные доли метана увеличиваются, мольные доли этана, пропана и бутана уменьшаются (табл. 5).

Таблица 5 - Влияние температуры холодного газа на мольные доли в товарном газе в схеме низкотемпературной сепарации с применением дросселя

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.146.161.7>

Состав газа	T = -5 °С	T = -15°С	T = -25°С	T = -35 °С	T = -45°С	T = -55°С
Метан	0,8386	0,8566	0,8730	0,8888	0,9049	0,9233
Этан	0,0631	0,0609	0,0575	0,0525	0,0457	0,0369
Пропан	0,0167	0,0140	0,0112	0,0083	0,0058	0,0037
Н-бутан	0,0219	0,0155	0,0105	0,0067	0,0041	0,0024

И-бутан	0,0191	0,0125	0,0080	0,0049	0,0029	0,0017
Этилен	0,0294	0,0292	0,0287	0,0276	0,0258	0,0229

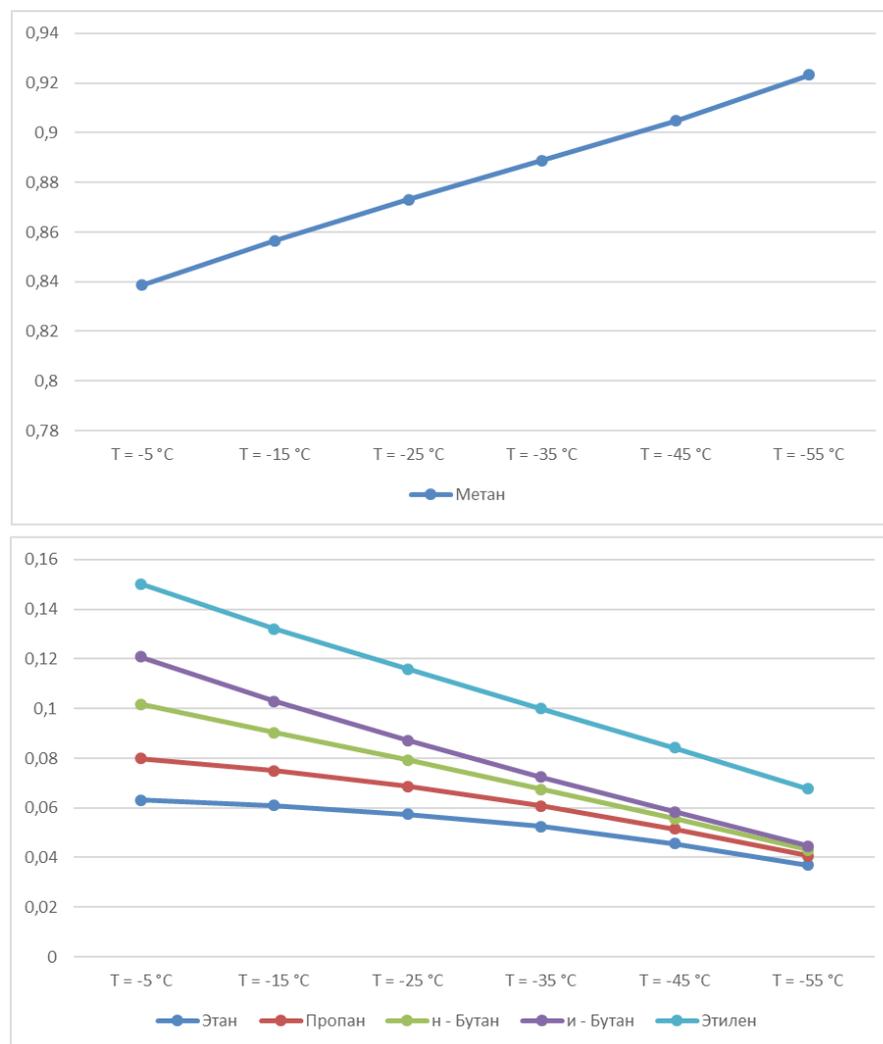


Рисунок 3 - Зависимость мольных долей в товарном газе от температуры холодного газа в схеме низкотемпературной сепарации с применением дросселя

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.146.161.8>

Заключение

Таким образом, исследованы варианты технологических схем переработки природного газа, которые могут быть использованы при выделении из него высококипящих фракций. Рассчитан процесс низкотемпературной сепарации природного газа по двум схемам. Расчет проведен в программе AspenHysys. Установлено, что мольные доли пропана в товарном газе уменьшаются в схеме низкотемпературной сепарации с дросселем по сравнению со схемой низкотемпературной сепарации с впрыском метанола. Однако, процесс дезтанизации в рассмотренных условиях происходит лучше в установке с впрыском метанола. Мощность установки низкотемпературной сепарации природного газа с дросселем значительно выше, чем установки низкотемпературной сепарации с впрыском метанола, что приводит к увеличению энергозатрат. При уменьшении температуры холодного газа в схеме с дросселем, мольные доли метана увеличиваются, мольные доли этана, пропана и бутана уменьшаются. Предпочтение конкретной схеме следует отдавать в результате углубленного моделирования с учетом дополнительно сформулированных технических, экономических и экологических критериев и в зависимости от местных условий и требований заказчика.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Акимова И. Ю. Экспорт российского природного газа: проблемы и перспективы / И.Ю. Акимова. — М. : Олимп-Бизнес — 2005.
2. Федорова Е. Б. Современное состояние развитие мировой индустрии сжиженного природного газа: технологии, оборудование / Е.Б. Федорова. — М. : РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина. — 2011. — 159 с.
3. Лихолитов Д. С., Зайцев А. В. Выбор методики извлечения этановой и пропановой фракции из природного газа на заводе СПГ / Д. С. Лихолитов, А. В. Зайцев. // Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке : материалы Международной науч.-технич. конф. 27-29 октября 2021 г., Санкт-Петербург / М-во образования и науки Рос. Федерации, Федер. гос. автоном. образоват. учреждение высш. образования «Национальный исследовательский университет ИТМО». — Санкт-Петербург. — 2021.
4. ИТС 50-2017. Переработка природного и попутного газа : Справочник НДТ : [Дата введения: 01 мая 2018 г.] — М. : Бюро НДТ. — 2017. — 213 с.
5. Петров А.А. Органическая химия: Учебник для вузов. / А.А. Петров, Х.В. Бальян, А.Т. Трощенко ; под редакцией М.Д. Стадничука. — СПб.: «Иван Фёдоров» — 2002. — 624 с.
6. Перспективы и опыт применения СПГ на объектах народного хозяйства. — М.: ИРЦ Газпром — 2004.
7. Журавлева, И. И. Высокомолекулярные соединения : учеб. пособие / И. И. Журавлева, В. А. Акопян ; М-во образования и науки Рос. Федерации, Самар. гос. ун-т. — Ч. 6. — 2014. — 528 с.
8. Aspen HYSYS. Руководство пользователя. AspenTechnology, Inc. — 2010. — 28 с.
9. Люгай Д.В. Проблемные вопросы разработки и реализации проектов СПГ / Д.В. Люгай, А.З. Шайхутдинов, Ю.Г. Мutowin, Г.Э. Одишария // Научно-технический сборник «Вести газовой науки». — 2017. — С. 218-226.
10. Тараканов Г.В. Основы технологии переработки природного газа и конденсата / Г.В. Тараканов, А. К. Мановян ; под ред. Г. В. Тараканова ; Астраханский гос. технический ун-т. — Астрахань : Изд-во АГТУ. — 2010. — 192 с.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Akimova I. Yu. Jeksport rossijskogo prirodno gaza: problemy i perspektivy [Export of Russian natural gas: problems and prospects] / I. Yu. Akimova. — М.: Olimp-Business. — 2005. [in Russian]
2. Fedorova E.B. Sovremennoe sostojanie razvitie mirovoj industrii szhizhennogo prirodno gaza: tehnologii, oborudovanie [Current state of development of the world liquefied natural gas industry: technologies, equipment] / E.B. Fedorov. — М. : Russian State University of Oil and Gas named after I.M. Gubkina, 2011. — 159 p. [in Russian]
3. Likholtov D. S., Zaitsev A. V. Vybor metodiki izvlechenija jetanovoj i propanovoj frakcii iz prirodno gaza na zavode SPG [Selection of methods for extracting ethane and propane fractions from natural gas at an LNG plant] / D. S. Likholtov, A. V. Zaitsev. // Nizkotemperaturnye i pishhevye tehnologii v XXI veke : materialy Mezhdunarodnoj nauch.-tehnich. konf. 27-29 oktjabrja 2021 g., Sankt-Peterburg [Low-temperature and food technologies in the 21st century: materials of the International Scientific and Technical. conf. October 27-29, 2021, St. Petersburg] / M-vo obrazovanija i nauki Ros. Federacii, Feder. gos. avtonom. obrazovat. uchrezhdenie vyssh. obrazovanija «Nacional'nyj issledovatel'skij universitet ITMO» [Ministry of Education and Science of Russia. Federation, Feder. state autonomous education institution of higher education Education "National Research University ITMO"]. — St. Petersburg. — 2021.[in Russian]
4. ITS 50-2017. Pererabotka prirodno i poputno gaza [ITS 50-2017. Processing of natural and associated gas] : BAT Handbook: [Introduction date: May 01, 2018] — М.: NDT Bureau. — 2017. — 213 p. [in Russian]
5. Petrov A.A. Organicheskaja himija: Uchebnik dlja vuzov [Organic chemistry: Textbook for universities]. / A.A. Petrov, H.V. Balyan, A.T. Troshchenko ; edited by M.D. Stadnichuka. — St. Petersburg.: "Ivan Fedorov" — 2002. — 624 p. [in Russian]
6. Perspektivy i opyt primenenija SPG na ob'ektah narodno ghozjajstva [Prospects and experience of using LNG at national economic facilities]. — М.: IRC Gazprom — 2004. [in Russian]
7. Zhuravleva, I. I. Vysokomolekuljarnye soedinenija : ucheb. posobie [High-molecular compounds: manual] / I. I. Zhuravleva, V. A. Akopyan ; Ministry of Education and Science of Russia. Federation, Samar. state univ. — Part 6. — 2014. — 528 p. [in Russian]
8. Aspen HYSYS. Rukovodstvo pol'zovatelja. AspenTechnology [User guide. AspenTechnology], Inc. — 2010. — 28 p. [in Russian]
9. Lyugai D.V. Problemnye voprosy razrabotki i realizacii proektov SPG [Problematic issues in the development and implementation of LNG projects] / D.V. Lyugai, A.Z. Shaikhutdinov, Yu.G. Mutowin, G.E. Odishariya // Nauchno-tehnicheskij sbornik «Vesti gazovoj nauki» [Scientific and technical collection "News of Gas Science"]. — 2017. — pp. 218-226. [in Russian]
10. Tarakanov G.V. Osnovy tehnologii pererabotki prirodno gaza i kondensata [Fundamentals of technology for processing natural gas and condensate] / G.V. Tarakanov, A.K. Manovyan; edited by G. V. Tarakanova ; Astrakhan state technical university — Astrakhan: Publishing house of ASTU. — 2010. — 192 p. [in Russian]