

ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ ПОРШНЕВЫХ КОМПРЕССОРОВ ОТПАРНОГО ГАЗА, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В КОМПЛЕКСАХ ДЛЯ СЖИЖЕНИЯ, ХРАНЕНИЯ И ПЕРЕГРУЗКИ ПРИРОДНОГО ГАЗА

А. В. Бураков, А. А. Котлов, Л. Г. Кузнецов

АО «Компрессор», Россия, 194044, г. Санкт-Петербург, пр. Большой Сампсониевский, 64

В статье рассмотрены системы для сжижения, хранения и перегрузки природного газа, в которых ключевую роль играют компрессоры для утилизации отпарного газа. Приведены основные особенности компрессоров отпарного газа, требуемые параметры поршневых компрессоров отпарного газа, основные проблемы расчета компрессоров в различных системах и методы проектирования поршневых компрессоров, обеспечивающие повышение надежности компрессоров для повышения эффективности систем утилизации отпарного газа.

Ключевые слова: компрессор, сжиженный природный газ, отпарной газ, разработка, расчет, эффективность.

Для цитирования: Бураков А. В., Котлов А. А., Кузнецов Л. Г. Особенности разработки поршневых компрессоров отпарного газа, используемых в комплексах для сжижения, хранения и перегрузки природного газа // Омский научный вестник. Сер. Авиацонно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2025. Т. 9, № 2. С. 71–77. DOI: 10.25206/2588-0373-2025-9-2-71-77. EDN: SYAJKB.



© Бураков А. В., Котлов А. А., Кузнецов Л. Г., 2025.
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

FEATURES OF DEVELOPMENT OF BOIL-OFF RECIPROCATING COMPRESSORS USED IN COMPLEXES FOR STORAGE AND TRANSPORTATION OF LIQUID NATURAL GAS

A. V. Burakov, A. A. Kotlov, L. G. Kuznetsov

JSC "Compressor", Russia, Saint Petersburg, Bolshoi Sampsonievsky Ave., 64, 194044

This article discusses complexes for the transportation, storage and transportation of liquefied natural gas, where compressors for the utilization of boil-off gas play a key role. The authors describe main features of boil-off compressors, the required parameters of reciprocating steam gas compressors, the main problems of calculating compressors in various systems, design methods for reciprocating compressors that improve the reliability of steam gas compressors to improve efficiency of liquefied natural gas storage and transportation systems.

Keywords: compressor, liquid natural gas, boil-off gas, development, calculation, efficiency.

For citation: Burakov A. V., Kotlov A. A., Kuznetsov L. G. Features of development of boil-off reciprocating compressors used in complexes for storage and transportation of liquid natural gas. *Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2025. Vol. 9, no. 2. P. 71–77. DOI: 10.25206/2588-0373-2025-9-2-71-77. EDN: SYAJKB.



© Burakov A. V., Kotlov A. A., Kuznetsov L. G., 2025.
The content is available under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Введение

Сжиженный природный газ, учитывая экологическую повестку, является перспективным видом топлива. Сферы применения и использования сжиженного природного газа постоянно расширя-

ются. Он применяется в качестве энергоносителя в теплоэнергетике, судостроении, железнодорожном транспорте и нефтегазовом секторе.

До 2035 г. объем производства сжиженного природного газа (СПГ) в России может увеличиться

почти в три раза и достичь 140 млн т. Такое целевое значение заложено в долгосрочной программе развития производства СПГ, утверждённой Председателем Правительства РФ [1].

Важнейшей предпосылкой для развития станет расширение использования российских технологий. Речь идёт об оборудовании, предназначенном для сжижения и очистки газа, специальных компрессорах, криогенных агрегатах, автономных СПГ-энергетических комплексах и интегрированных системах управления. На основании чего отечественным компаниям необходимо разрабатывать и производить оборудование для сжижения, хранения и транспортировки природного газа. В частности, одним из видов востребованного оборудования являются компрессоры отпарного газа, разработка и освоение производства которых являются актуальной задачей.

СПГ применяется в нефтегазовой промышленности, но также существуют проблемы эффективного применения в ракетно-космическом комплексе и различной авиационно-космической технике [2].

АО «Компрессор» проектирует и производит большую номенклатуру блочного компрессорного и газового оборудования для ПАО «Газпром». В 2016 г. предприятие реализовало проект по разработке, изготовлению, поставке, монтажу мобильного компрессорного блока для перекачки отпарного газа — Мобильный компрессорный блок паров сжиженного природного газа (далее МКБ ПСПГ) МКБ ПСПГ-800-0,6 для АО «Криогаз» в г. Пскове.

Основная часть

Целью настоящего исследования является определение путей повышения эффективности компрессоров отпарного газа, исходя из их конструктивных особенностей, способов применения и расчета сетки параметров при различных условиях работы.

Для расчета компрессоров паров СПГ необходимо определиться с составом и плотностью компримируемой среды. Общие данные по составу и характеристикам изложены в стандарте ГОСТ Р 57431 — 2017 [3].

Плотность СПГ зависит от его компонентного состава и обычно колеблется в диапазоне от 430 до 470 кг/м³, но в отдельных случаях может достигать 520 кг/м³.

При транспортировке СПГ морскими танкерами давление в танках поддерживается близким к атмосферному, образующийся отпарный газ подготавливается, используется как топливо для судовых двигателей, либо сжигается в специальных горелках, или дожигается в компрессорах для повторного сжижения.

Определение компонентного состава отпарного газа очень важная задача, так как от него зависит плотность и объемная теплота сгорания, для чего необходимо учитывать соответствующий стандарт [4].

Компрессоры отпарного газа являются важным элементом в составе комплексов для хранения, транспортировки и перегрузки СПГ. Рынок СПГ растет и развивается. На крупных морских танкерах, перевозящих СПГ, применяются, как правило, центробежные компрессоры разной производительности. Их производительность определяется объемом отпарного газа, выделяющегося при различных перегрузочных процедурах. Задачами компрессоров высокой производительности является утилизация отпарного газа на причал в пери-

од погрузки, утилизация отпарного газа на причал СПГ в период захолаживания, циркуляция СПГ для прогрева цистерны и утилизация инертного газа и паров СПГ на берег в период продувки. Задачами компрессора низкой производительности является отвод отпарного газа к подогревателю для последующего сжигания газа в соответствующем судовом оборудовании (двигатель или котел) [5].

Подробно остановимся на компрессорах поршневого типа, предназначенных для компримирования отпарного газа, включающего в состав компоненты СПГ. Разрабатываемые в настоящее время поршневые компрессоры должны соответствовать требованиям нормативных документов [6, 7]. Стандарты распространяются на поршневые компрессорные установки с цилиндрами со смазкой и без смазки, рассчитанные на низкую (до 750 об/мин) и среднюю (от 750 об/мин до 1500 об/мин) частоты вращения коленчатого вала, а также на системы смазки, промежуточные и концевые охладители газа (если требуется), гасители пульсаций давления газа и другое вспомогательное оборудование и запасные части к компрессорам.

Особенности компрессоров отпарного газа

Повышение эффективности компрессоров отпарного газа — важная техническая задача, требующая надежного технического решения для практической реализации. При этом в работе компрессоров отпарного газа есть ряд технических особенностей:

1. Низкая температура газа на входе определяет выбор материалов и всех элементов компрессора.

2. Состав отпарного газа не является стабильным, необходимо определять (рассчитывать) термодинамические свойства смеси газов при конкретных давлениях и температуре; в режимах продувки компрессор может работать на азоте. При этом температура поступающего в компрессор газа также может меняться во время работы компрессора.

3. Расход газа (требуемая производительность компрессора) может меняться во времени, в диапазоне производительности от 10 до 100 %.

4. Низкое начальное давление сжатия приводит к увеличению объема газа, что снижает эффективность сжатия, при повышении температуры производительность компрессора также снижается.

5. Процесс нагрева отпарного газа в компрессоре. Необходимо предусматривать и проектировать эффективные технические решения для надежного охлаждения как при сжатии, так и до сжатия, на входе в компрессор, для обеспечения расчетной производительности компрессора.

6. Пожаровзрывоопасность отпарного газа. Взрывоопасность отпарного газа вызывает требования к герметичности конструкции, исключающего выход испарившегося газа в окружающую среду, применение взрывозащищенного электрооборудования и средств пожарообнаружения и контроля загазованности в помещениях, где установлены компрессоры отпарного газа.

7. Виброактивность компрессора и акустический шум, излучаемый компрессором. При работе любого поршневого компрессора возникает вибрация и акустический шум, связанные с неуравновешенными силами и моментами, действующими в механизме движения, а также газодинамический шум в клапанах и коммуникациях. Дополнительный шум и вибрации могут возникать вследствие нестабильных параметров подаваемого отпарного газа (из-

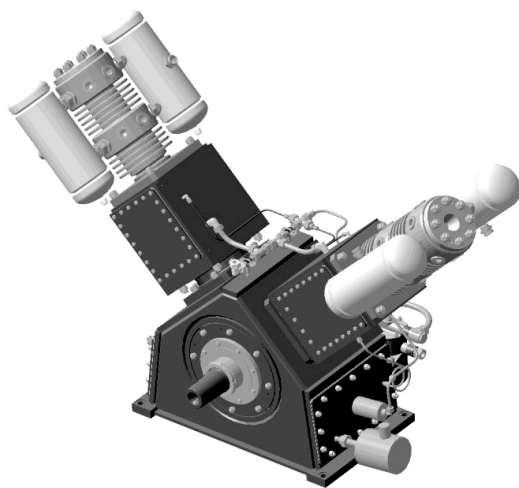


Рис. 1. 3D-модель компрессора
Fig. 1. 3D-model of compressor

менение расхода). Требуется система диагностики и вибромониторинга для контроля вибрационного состояния компрессора в характерных точках.

8. Требования к развитой системе управления с расширенным функционалом. Учитывая особенность работы, характеристику среды, серьезность и ответственность поставленной задачи, переменные характеристики работы, условия, в которых размещается компрессор, требуется развитая система автоматического управления с высоким быстродействием, связью с верхним уровнем объекта, расширенными функциями диагностики.

Отечественные и иностранные производители и разработчики компрессорного оборудования предлагают различные технические решения для создания компрессоров отпарного газа для работы в составе комплексов для хранения и повторного ожижения отпарного газа [8–11]. Учитывая, что хранение без испарения СПГ невозможно [12], данные компрессоры необходимы и применение их в любом случае целесообразно и для определенных объектов и систем весьма предпочтительно [13–16].

Технические решения, направленные на повышение эффективности

Предлагаемые технические решения [17].

1. Для работы с криогенными средами используются технические решения, реализуемые в криогенной арматуре, предназначенной для работы на продуктах, температура которых равна или ниже 120 K (минус 153 °C):

- все узлы должны быть работоспособны в течение длительного времени при температуре криогенного продукта и при температуре окружающей среды;

- оборудование не должно быть значительным источником притока теплоты к криогенному продукту;

- конструкции узлов оборудования, находящегося в контакте с криогенными продуктами, должны удовлетворять условиям взрыво- и пожаробезопасности при работе на этих продуктах;

- узлы оборудования, работающего при криогенных температурах, должны работать без смазки.

Для перекачки паров сжиженного природного газа используется поршневой компрессор без смазки цилиндно-поршневой группы (рис. 1).



Рис. 2. Компрессорная установка МКБ (вид со стороны компрессора)
Fig. 2. Mobile compressor unit (view from the compressor side)



Рис. 3. Компрессорная установка МКБ (вид со стороны электродвигателя)
Fig. 3. Mobile compressor unit (view from the side of the electric motor)

На входном трубопроводе перед компрессором последовательно, по ходу движения среды, установлены регулятор давления и буферная емкость, а на выходном трубопроводе после компрессора по ходу движения среды установлены буферная емкость и предохранительный клапан для сброса повышенного давления среды на свечу. На входном трубопроводе после регулятора давления установлен отсечной дистанционно управляемый клапан для возможности подключения блока к системе продувки полостей компрессора сжатым азотом. Все элементы блока, контактирующие с перекачиваемой средой, выполнены из хладостойкого материала и имеют теплоизоляцию.

Цилиндро-поршневая группа компрессора содержит шток-поршни с поршневыми кольцами, выполненными из самосмазывающегося материала.

2. Для работы с пожаровзрывоопасными средами предусмотрены следующие технические решения.

В качестве привода компрессора используется взрывозащищенный электрический двигатель.

Вспомогательное оборудование обеспечивает нормальную работу МКБ (рис. 2 и 3):

- металлорукава предназначены для подключения МКБ к газопроводу заказчика;

- металлорукав предназначен для аварийного сброса газа в атмосферу;



Рис. 4. Шкаф управления МКБ
Fig. 4. Mobile compressor unit (control cabinet)

- клапан запорный предназначен для пуска газа в обход МКБ;
- клапан предохранительный КП предназначен для недопущения повышения давления выше рабочего на 15 %;
- рампа азотная предназначена для продувки газопровода сжатым азотом.

В изолированном отсеке управления расположено электрооборудование и автоматика МКБ ПСПГ (рис. 4): локальная система автоматического управления (ЛСАУ), шкаф силовой компрессора (шкаф МСС), шкаф автоматического управления компрессором (шкаф САУ). Электрооборудование, применяемое в отсеке управления (ОУ), имеет конструктивное исполнение не ниже IP54 по ГОСТ 14254–96. САУ имеет расширенные функции, которые позволяют реализовать вибромониторинг, диагностику и анализ неисправностей [18].

В контейнере МКБ ПСПГ учтены требования пожарной безопасности (рис. 5):

— все оборудование, применяемое в технологическом отсеке, имеет взрывозащищенное исполнение;

— снаружи контейнер укомплектован ручными пожарными извещателями, звуковыми и световыми пожарными извещателями и наружным освещением;

— предусмотрена комплектация первичными средствами пожаротушения и знаками пожарной безопасности.

Основные параметры и характеристики компрессора отпарного газа сведены в табл. 1.

При расчете интегральных характеристик компрессора отпарного газа необходимо учитывать температуру паров СПГ на входе в компрессор. При низких температурах влияние на производительность компрессора может быть значительное, также необходимо учитывать реальные свойства сжимаемой среды.

Применяемый метод расчета термодинамических свойств СПГ базируется на методике, приведенной в ГОСТ Р 56851–2016 [19]. Метод применим в диапазоне температур от 100 до 140 К и в диапазоне давлений от 0,1 до 5,0 МПа. Компоненты СПГ и диапазоны молярных долей компонентов приведены в табл. 2.

Термодинамические свойства СПГ рассчитываются по усредненному уравнению состояния (1) [19]:

$$\pi = \frac{\omega \tau}{z_{\text{ПК}}} (1 + A_0), \quad (1)$$

где $\pi = p/p_{\text{ПК}}$ — приведенное давление; ω — приведенная плотность; $\tau = T/T_{\text{ПК}}$ — приведен-

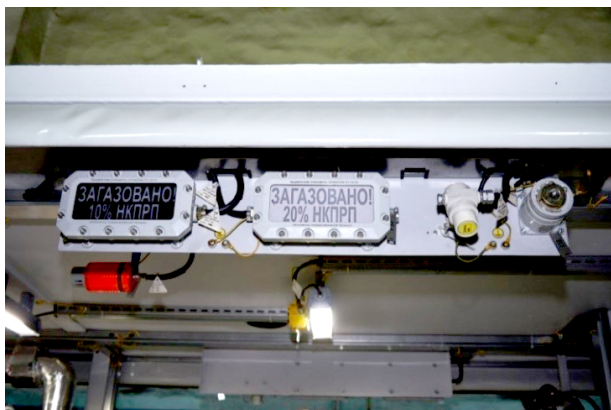
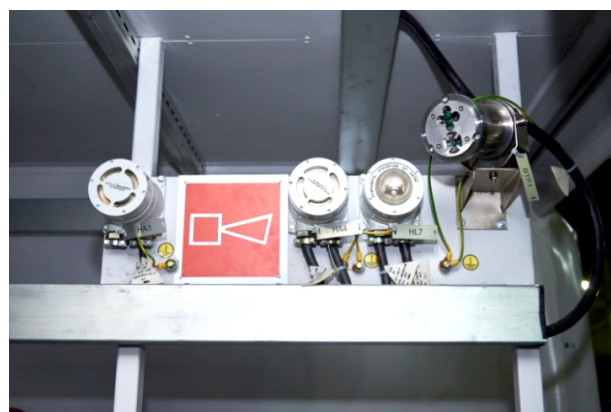


Рис. 5. Система пожарной сигнализации МКБ
Fig. 5. Mobile compressor unit (fire alarm system)

Таблица 1. Основные параметры и характеристики МКБ
Table 1. The main parameters and characteristics of the mobile compressor unit

Наименование параметра	Значение
Рабочая среда	Пары СПГ
Давление газа на входе в МКБ ПСПГ (абс.), МПа, не более	0,15
Температура газа на входе в МКБ ПСПГ, °C, не менее	– 160
Давление газа на выходе из компрессора (избыточное), МПа	0,7
Производительность ДККС, приведённая к нормальным условиям, нм³/ч	от 600 до 800
Потребляемая мощность МКБ ПСПГ, кВт, не более	70

Таблица 2. Компонентный состав СПГ
Table 2. The component composition of LNG

Компонент	Формула	Диапазоны молярных долей
Метан	CH ₄	0,89 ≤ x < 1
Этан	C ₂ H ₆	x ≤ 0,07
Пропан	C ₃ H ₈	x ≤ 0,02
Бутаны (в сумме)	C ₄ H ₁₀	x ≤ 0,009
Пентаны (и высшие)	C ₅ H ₁₂ + высшие	x ≤ 0,0035
Азот + кислород	N ₂ + O ₂	x ≤ 0,05
Диоксид углерода	CO ₂	x ≤ 0,0003

ная температура; z — коэффициент сжимаемости; A_0 — безразмерный комплекс; p_k — псевдокритический параметр.

Плотность СПГ рассчитывается по формуле (2):

$$\rho = M \bar{\rho}_{pk} \omega, \quad (2)$$

где M — молярная масса СПГ; $\bar{\rho}_{pk}$ — псевдокритическая молярная плотность СПГ.

На рис. 6 приведены расчетные термодинамические свойства СПГ. Точками на диаграмме нанесены данные из [19].

На рис. 7 приведена расчетная характеристика компрессора отпарного газа в зависимости от температуры паров СПГ на входе.

С повышением температуры паров СПГ на входе производительность компрессора снижается. В рабочей зоне температур снижение производительности составляет около 25 %. При этом индикаторная мощность компрессора практически не изменяется (рис. 7). Проанализируем отношение изотермической мощности в крайних точках характеристики:

$$\begin{aligned} \frac{N_{из(-160)}}{N_{из(-110)}} &= \frac{m_{-160} R_{-160} T_{-160} \ln \pi}{m_{-110} R_{-110} T_{-110} \ln \pi} = \\ &= \frac{\rho_{-160} R_{-160} T_{-160}}{\rho_{-110} R_{-110} T_{-110}} = \frac{1,74 \cdot 1,375 \cdot 113}{1,22 \cdot 1,346 \cdot 163} = 1,01, \end{aligned}$$

где m — массовый расход газа; R — газовая постоянная; π — отношение давлений в компрессоре.

При низких температурах сказывается реальность газа. При изменении температуры изменяется не только плотность, но и газовая постоянная. В результате изотермическая мощность практически не изменяется. При этом удельная мощность

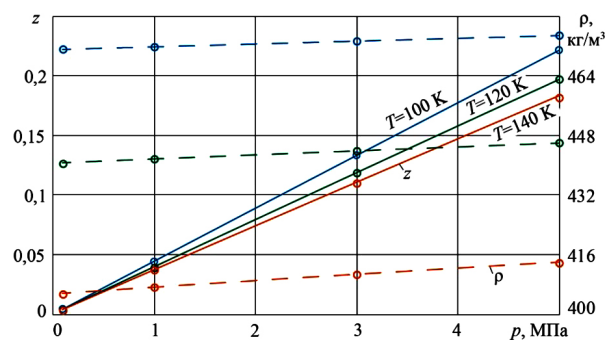


Рис. 6. Расчетные термодинамические свойства СПГ
Fig. 6. Calculated thermodynamic properties of LNG

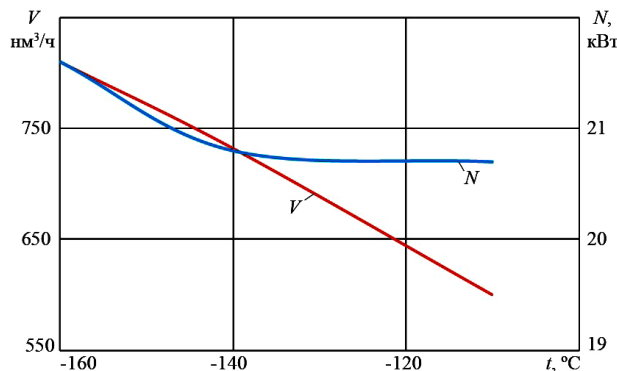


Рис. 7. Характеристика компрессора
Fig. 7. Compressor characteristics

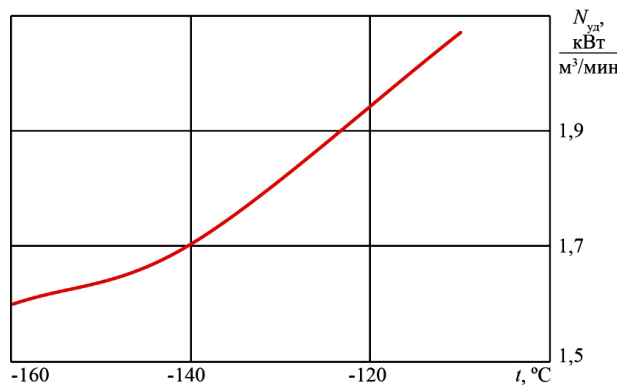


Рис. 8. Удельная мощность
Fig. 8. Specific power

(рис. 8), характеризующая затраты энергии на сжатие 1 м³/мин газа, снижается. Таким образом, процесс сжатия в области более низких температур является более энергоэффективным.

Выводы

Повышение эффективности компрессоров отпарного газа является сложной многозадачной проблемой. Пониженные температуры на входе в компрессор позволяют повысить производительность и энергоэффективность системы компримирования отпарного газа, что обеспечит энергоэффективность комплексов для хранения, транспортировки и перегрузки сжиженного природного газа.

Список источников / References

1. Об утверждении долгосрочной программы развития производства сжиженного природного газа в РФ: Распоре-

ние Правительства РФ от 16 марта 2021 г. № 640-р. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202103230009> (дата обращения: 10.02.2025).

Ob utverzhdenii dolgosrochnoy programmy razvitiya proizvodstva szhizhennogo prirodnogo gaza v RF: Rasporyazheniye Pravitel'stva RF ot 16 marta 2021 g. № 640-r. [On approval of the long-term liquefied natural gas production development program in the Russian Federation: Order of the Government of the Russian Federation No. 640-r dated 16 March 2021]. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202103230009> (accessed: 10.02.2025). (In Russ.).

2. Казимиров А. В., Прилуцкий И. К., Молостов А. В. Система хранения сжиженного природного газа для ракетно-космического комплекса // Результаты современных научных исследований и разработок: сб. ст. XI Всерос. науч.-практ. конф. Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение», 2020. С. 44–48. EDN: WVSSKZ.

Kazimirov A. V., Prilutskiy I. K., Molostov A. V. Sistema khraneniya szhizhennogo prirodnogo gaza dlya raketno-kosmicheskogo kompleksa [Liquefied natural gas storage system for the space rocket complex]. Rezultaty sovremennykh nauchnykh issledovaniy i razrabotok. *Results of Modern Scientific Research and Development*. Penza, 2020. P. 44–48. EDN: WVSSKZ. (In Russ.).

3. ГОСТ Р 57431–2017 (ИСО 16903:2015). Газ природный сжиженный. Общие характеристики. Введ. 30–03–2017. Москва: Стандартинформ, 2017. 16 с.

GOST R 57431–2017 (ISO 16903:2015). Gaz prirodnyy szhizhenny. Obshchiye kharakteristiki [Liquefied natural gas. General characteristics]. Moscow, 2017. 16 p. (In Russ.).

4. ГОСТ Р 56835–2015. Газ природный сжиженный. Газ отпарной производства газа природного сжиженного. Определение компонентного состава методом газовой хроматографии. Введ. 01–01–2017. Москва: Стандартинформ, 2019. 15 с.

GOST R 56835–2015. Gaz prirodnyy szhizhenny. Gaz otparnoy proizvodstva gaza prirodnogo szhizhennogo. Opredeleniye komponentnogo sostava metodom gazovoy khromatografii [Liquefied natural gas. Boil-off gas of liquefied natural gas production. Determination of composition by gas chromatography method]. Vved. 01–01–2017. Moscow, 2019. 15 p. (In Russ.).

5. Чураев К. А., Дыда А. А., Панкратов Е. А. Анализ гидродинамических процессов в системе транспортировки сжиженного природного газа // Наука и бизнес: пути развития. 2024. № 2 (152). С. 32–36. EDN: USAWQY.

Churayev K. A., Dyda A. A., Pankratov E. A. Analiz gidrodinamicheskikh protsessov v sisteme transportirovki szhizhennogo prirodnogo gaza [Analysis of hydrodynamic processes in the liquefied natural gas transportation system]. Nauka i biznes: puti razvitiya. *Science and Business: Development Ways*. 2024. No. 2 (152). P. 32–36. EDN: USAWQY. (In Russ.).

6. ГОСТ 31843–2013 (ИСО 13707:2000). Нефтяная и газовая промышленность. Компрессоры поршневые. Общие технические требования. Введ. 01–02–2015. Москва: Стандартинформ, 2019. 15 с.

GOST 31843–2013 (ISO 13707:2000). Neftyanaya i gazovaya promyshlennost'. Kompressory porshnevyye. Obshchiye tekhnicheskiye trebovaniya [Petroleum and natural gas industries. Reciprocating compressors. General technical requirements]. Moscow, 2019. 15 p. (In Russ.).

7. СТО ИНТИ S.601–2023. (Реда. 2). Поршневые компрессорные установки для нефтегазопереработки и нефтехимии. Общие технические условия. URL: <https://informproekt.ru/docs/352320730/> (дата обращения: 10.02.2025).

STO INTI S.601–2023. (ed. 2). Porshnevyye kompressornyye ustanovki dlya neftegazopererabotki i neftekhimii. Obshchiye tekhnicheskiye usloviya [Piston compressor units for oil and gas processing and petrochemistry. General technical requirements]. URL: <https://informproekt.ru/docs/352320730/> (accessed: 10.02.2025). (In Russ.).

8. Казимиров А. В., Молостов А. В., Молодова Ю. И. [и др.]. Прогноз параметров экспериментальной ступени поршневого компрессора при работе в составе установок повторного ожижения отпарного газа // Компрессорная техника и пневматика. 2021. № 4. С. 14–20. EDN: HQQGMX.

Kazimirov A. V., Molostov A. V., Molodova Yu. I. [et al.]. Prognoz parametrov eksperimental'noy stupeni porshnovego kompressora pri rabote v sostave ustanovok povtornogo ozhizheniya otparnogo gaza [Forecast of parameters of the experimental stage of a reciprocating compressor when operating as part of boil-off gas re-liquefaction units]. *Kompressornaya tekhnika i pnevmatika. Compressor Technology and Pneumatics*. 2021. No. 4. P. 14–20. EDN: HQQGMX. (In Russ.).

9. Shin H., Kim D., Choi W. [et al.]. Optimal design of BOG reliquefaction systems for LNG carriers: a focus on GMS performance during loaded voyages. *Korean Journal of Chemical Engineering*. 2024. Vol. 42 (4). DOI: 10.1007/s11814-024-00348-2.

10. Ghosh S., Atul D. Innovative cold start-up solution of BOG compressors / without Flaring at LNG Terminal. Paper presented at the ADIPEC, Abu Dhabi, UAE. 2024. SPE-222639-MS. DOI: 10.2118/222639-MS.

11. Zhao B., Wang T., Peng X., Feng J. Experimental study on performance of BOG compressor. 9th International Conference on Compressors and their Systems. IOP Publishing. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2015. Vol. 90. DOI: 10.1088/1757-899X/90/1/012022.

12. Середенко Е. С. Модель прогнозирования испарения сжиженного природного газа (СПГ) // Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке: материалы IX Междунар. науч.-техн. конф. В. 2 т. Санкт-Петербург: Университет ИТМО, 2019. Т. 1. С. 225–229. EDN: ORWXTJ.

Seredenko E. S. Model' prognozirovaniya ispareniya szhizhennogo prirodnogo gaza (SPG) [Prediction model for vaporisation of liquefied natural gas (LNG)]. *Nizkotemperaturnyye i pishchevyye tekhnologii v XXI veke. Low Temperature and Food Technologies in the XXI Century*. In 2 vols. Saint Petersburg, 2019. Vol. 1. P. 225–229. EDN: ORWXTJ. (In Russ.).

13. Покусаев М. Н., Ермолаев В. П. Повышение энергоэффективности судовой энергетической установки крупнотоннажного танкера для перевозки газа // 63-я Междунар. науч. конф. Астраханского государственного технического университета, посвященная 25-летию Астраханского государственного технического университета, Астрахань, 22–26 апреля 2019 года. Астрахань: Астраханский государственный технический университет, 2019. С. 182. EDN: FBIEZI.

Pokusayev M. N., Ermolayev V. P. Povysheniye energoeffektivnosti sudovoy energeticheskoy ustanovki krupnotonnazhnogo tankera dlya perevozki gaza [Improving the energy efficiency of the ship power plant of a large-capacity gas tanker]. 63-ya Mezhdunarodnaya Nauchnaya Konferentsiya Astrakhanskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta, Posvyashchennaya 25-letiyu Astrakhanskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta. Astrakhan', 2019. P. 182. EDN: FBIEZI. (In Russ.).

14. СТО Газпром 2-3.4-1215–2020. Инфраструктура для производства, хранения и отгрузки сжиженного природного газа. Хранилище. Общие технические условия. Санкт-Петербург: Газпром Экспо, 2021. 27 с.

STO Gazprom 2-3.4-1215–2020. Infrastruktura dlya proizvodstva, khraneniya i otgruzki szhizhennogo prirodnogo gaza. Khranilishche. Obshchiye tekhnicheskiye usloviya [Infrastructure for production, storage and transportation of liquefied natural gas. Storage facility. General technical requirements]. Saint Petersburg, 2021. 27 p. (In Russ.).

15. Зиганшин А. С., Кузьмин О. Л. Применение компрессора отпарного газа в проекте Мурманский СПГ // Труды XIX Междунар. науч.-практ. конф. по компрессоростроению, посвященной 100-летию со дня рождения Владимира Борисовича Шнеппа. Казань: ООО «ВИЗАРД», 2024. С. 154–160. EDN: VFWUYL.

Ziganshin A. S., Kuz'min O. L. *Primeneniye kompressora otparnogo gaza v projekte Murmanskoy SPG* [Application of the boil-off gas compressor in the Murmansk LNG project]. *Trudy XIX Mezhdunarodnoy Nauchno-prakticheskoy Konferentsii po Kompressorostroyeniyyu, Posvyashchennoy 100-letiyu so Dnya Rozhdeniya Vladimira Borisovicha Shneppa*. Kazan, 2024. P. 154–160. EDN: VFWUYL. (In Russ.).

16. Пат. 2642713 С1. Российская Федерация, МПК B63B 25/16. Система обработки отпарного газа / Ли Д. Ч., Ким Н. С., Дзунг Д. Х., Парк Ч. Г. № 2016138308; заявл. 27.03.2015; опубл. 25.01.2018. Бюл. № 3.

Patent 2642713 C1. Russian Federation, IPC B63B 25/16. Sistema obrabotki otparnogo gaza [System for processing stripping gas] / Li D. Ch., Kim N. S., Dzong D. Kh., Park Ch. G. No. 2016138308. (In Russ.).

17. Пат. 2669222 С1. Российская Федерация, МПК F04B 41/00. Мобильный компрессорный блок для перекачки паров сжиженного природного газа / Кузнецов Л. Г., Кузнецов Ю. А., Бураков А. В. [и др.]. № 2017140119; заявл. 19.04.2017; опубл. 09.10.2018. Бюл. № 28. EDN: ABNLLB.

Patent 2669222 C1. Russian Federation, IPC F04B 41/00. Mobil'nyy kompressornyy blok dlya perekachki parov szhizhennogo prirodnogo gaza [Mobile compressor unit for pumping liquids of liquefied natural gas] / Kuznetsov L. G., Kuznetsov Yu. A., Burakov A. V. [et al.]. No. 2017140119. EDN: ABNLLB. (In Russ.).

18. Хотский Р. Р., Макшанов, А. В., Бураков А. В., Тындыкар' Л. Н. Диагностика неисправностей судовых поршневых компрессоров с использованием преобразования Гильберта–Хуанга // Морской вестник. 2025. № 1 (93). С. 71–75. EDN: JVLHQR.

Khotskiy R. R., Makshanov A. V., Burakov A. V., Tyndykar' L. N. Diagnostika neispravnostey sudovykh porshnevnykh kompressorov s ispol'zovaniyem preobrazovaniya Gil'berta-Khuanga [Diagnostics of faults of marine piston compressors using the Hilbert–Huang transform]. *Morskoy Vestnik*. 2025. No. 1 (93). P. 71–75. EDN: JVLHQR. (In Russ.).

19. ГОСТ Р 56851–2016. Газ природный сжиженный. Метод расчета термодинамических свойств. Введ. 18–01–2016. Москва: Стандартинформ, 2016. 23 с.

GOST R 56851–2016. Gaz prirodnyy szhizhennyy. Metod rascheta termodinamicheskikh svoystv [Liquefied natural gas. Method for calculation of thermodynamic properties]. Moscow, 2016. 23 p. (In Russ.).

БУРАКОВ Александр Васильевич, начальник ЦКБ АО «Компрессор», г. Санкт-Петербург.

SPIN-код: 8501-1234

AuthorID (РИНЦ): 994917

AuthorID (SCOPUS): 57210981312

ORCID: 0000-0002-3553-2854

Адрес для переписки: 47otdel@compressor.spb.ru

КОТЛОВ Андрей Аркадьевич, кандидат технических наук, ведущий инженер АО «Компрессор», г. Санкт-Петербург.

SPIN-код: 7304-7079

AuthorID (РИНЦ): 653245

AuthorID (SCOPUS): 57203586344

ORCID: 0000-0003-1236-2458

КУЗНЕЦОВ Леонид Григорьевич, доктор технических наук, профессор (Россия), генеральный конструктор АО «Компрессор», г. Санкт-Петербург.

SPIN-код: 3819-4361

AuthorID (РИНЦ): 359074

ResearcherID: A-8766-2018

Адрес для переписки: office@compressor.spb.ru

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила в редакцию 04.04.2025; одобрена после рецензирования 12.05.2025; принята к публикации 16.05.2025.

BURAKOV Aleksandr Vasilyevich, Head of the Central Design Bureau, JSC "Compressor", Saint Petersburg.

SPIN-code: 8501-1234

AuthorID (RSCI): 994917

AuthorID (SCOPUS): 57210981312

ORCID: 0000-0002-3553-2854

Correspondence address: 47otdel@compressor.spb.ru

KOTLOV Andrey Arkadyevich, Candidate of Technical Sciences, Leading Engineer, JSC "Compressor", Saint Petersburg.

SPIN-code: 7304-7079

AuthorID (RSCI): 653245

AuthorID (SCOPUS): 57203586344

ORCID: 0000-0003-1236-2458

KUZNETSOV Leonid Grigorievich, Doctor of Technical Sciences, Professor, General Designer, JSC "Compressor", Saint Petersburg.

SPIN-code: 3819-4361

AuthorID (RSCI): 359074

ResearcherID: A-8766-2018

Correspondence address: office@compressor.spb.ru

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

The article was submitted 04.04.2025; approved after reviewing 12.05.2025; accepted for publication 16.05.2025.