

МЕХАНИКА ЖИДКОСТИ, ГАЗА И ППАЗМЫ

Валерий Игнатьевич ГУРОВ¹

Владимир Владимирович КУРНОСОВ²

Евгений Николаевич РОМАСЕНКО³

Елена Владимировна ЩЕРБАКОВА⁴

УДК 622.691.6:621.452.2

ВОЗМОЖНОСТИ ТРАНСПОРТИРОВКИ СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЫСОКИХ ТЕХНОЛОГИЙ РАКЕТНОЙ И АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ

¹ доктор технических наук, начальник сектора,
Центральный институт авиационного
моторостроения им. П. И. Баранова (г. Москва)
dr.gurow2015@yandex.ru

² кандидат физико-математических наук,
Генеральный директор, ООО «Комас»
(г. Апрелевка, Московская область)
kbb@komas.su

³ кандидат технических наук, ведущий конструктор.
НПО Энергомаш имени академика В. П. Глушко (г. Химки)

⁴ кандидат технических наук, начальник сектора,
Центральный институт авиационного
моторостроения им. П. И. Баранова (г. Москва)
elenshch42@mail.ru

Цитирование: Гуров В. И. Возможности транспортировки сжиженного природного газа с использованием высоких технологий ракетной и авиационной техники / В. И. Гуров, В. В. Курносов, Е. Н. Ромасенко, Е. В. Щербакова // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2020. Том 6. № 4 (24). С. 88-100.
DOI: 10.21684/2411-7978-2020-6-4-88-100

Аннотация

В данной статье представлена история развития — почти за 80 лет — газотранспортной системы (ГТС) поставки потребителю природного газа (ПГ) протяженностью практически 200 тыс. км. Представлена структурная интеграция успешного исторического опыта создания масштабной газотранспортной системы перекачки природного газа с перспективой создания на этой основе системы перекачки сжиженного природного газа. Затронуты вопросы необходимости модернизации ГТС из-за ее изношенности и потребности наращивания объемов поставок ПГ. На основе анализа высоких технологий ракетной и авиационной отраслей промышленности показана возможность эффективной интеграции ГТС с криогенной транспортировкой сжиженного природного газа (СПГ) на расстояния, значительно превышающие 10 км, достаточно освоенные в настоящее время. Обоснованы потенциальные организации, заинтересованные в реализации предложенной интеграции.

Ключевые слова

Природный газ, газовая транспортная система, сжиженный природный газ (СПГ), перекачка СПГ, инновационный перекачивающий агрегат, импортное замещение, эффективность, жидкостной ракетный двигатель (ЖРД), ключевой агрегат ЖРД.

DOI: 10.21684/2411-7978-2020-6-4-88-100

Введение

Важным фактором газовой отрасли промышленности является поставка природного газа (ПГ) от месторождений до потребителя. Поставка может осуществляться различным видом транспорта (автомобильным, железнодорожным и водным), но основной объем ПГ доставляется потребителю газовой транспортной системой (ГТС). Протяженность магистралей ГТС в России составляет 173 тыс. км и каждые 5-6 лет ее протяженность прирастает на 2-3%. В состав ГТС входят компрессорные перекачивающие станции с суммарной мощностью около 50 тыс. МВт.

В 2021 г. исполнится 80 лет с момента пуска в СССР газового трубопровода ПГ длиной в 68 км, а в 1946 г. запущена первая протяженная газовая магистраль Саратов — Москва длиной 800 км.

В последнее время большое внимание уделяется расширению поставок потребителю сжиженного природного газа (СПГ). Данный вид топлива открывает возможности укрепления связей с зарубежными потребителями СПГ. Для этого запущены дополнительные перспективные комплексы по переводу ПГ в жидкое состояние («Сахалин-2» и «Балтийский СПГ»). Поставки СПГ, как и поставки ПГ в начальный период его применения, реализуются различными видами транспорта, включая и океанские танкеры. Транспортировка СПГ с использованием трубопроводов осуществляется в настоящее время на освоенные расстояния (не более 10 км) при освоении северных месторождений ПГ с его последующим ожижением. Полученный СПГ транспортируется с береговых хранилищ на оке-

анские танкеры по трубопроводам с помощью вертикальных лопастных насосов, полностью погруженных в СПГ резервуара-хранилища. Приводами насосов являются электродвигатели. Согласно программе импортного замещения зарубежных образцов указанных насосов предлагаются отечественные аналоги практически с полным копированием и схемы, и конструкции насосов иностранных поставщиков [12] — фирмы EBARA Pumps, Shinko Ynd. Ltd и др.

Анализ прорывных технологий создания ключевого агрегата мощных жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) показывает возможность их эффективного использования для перекачки СПГ в интеграции с системой ГТС. Разработан способ реализации такой перекачки. Целесообразно отметить, что представленная работа носит постановочный характер и призвана объединить усилия различных организаций, заинтересованных в повышении эффективности — практически беззатратной: с экономией более 50 тыс. МВт электроэнергии — поставки больших объемов СПГ потребителю на расстояния, значительно превышающие 10 км, освоенные в настоящее время при заполнении емкостей океанских танкеров с береговых хранилищ СПГ. Показана возможность замены полностью погружных в СПГ береговых хранилищ лопастных насосов с электроприводом массой 4 т на турбонасосы массой не более 400 кг без потребления электроэнергии.

Основа импортного замещения — прорыв мысли и технологий

По Федеральной программе импортного замещения в ОАО «ЛГМ» (до 1991 г. — Московский завод им. М. И. Калинина) создан насос для перекачки СПГ на расстояния до 10 км НСПГ-900-120 с массой более 4 т [12]. Указанный насос, представленный на рис. 1, практически является копией зарубежных образцов.

Вместе с тем изначально термин «Импортное замещение продукции» предполагал не простое копирование передовых импортных аналогов, а реализацию — как минимум — результатов интеллектуальной деятельности в сфере инновационных разработок.

На вопрос: «Может ли кто-либо из присутствующих представить себе насос с приводом от турбины без соединительного вала?», заданный в аудитории Центрального института авиационного моторостроения им. П. И. Баранова (далее ЦИАМ), где присутствовали первоклассные специалисты, поступил ответ: «Представить можно — сделать невозможно!». А вот автор патента на изобретение РФ № 2106534 от 1996 г. не только представил, но и сделал двухярусный турбонасос без соединения промежуточным валом насоса и приводной турбины. Более того, он внедрил такую конструкцию в ключевой агрегат мощных ЖРД.

Ключевым агрегатом ЖРД большой тяги является турбонасосный агрегат (ТНА). На разработку, создание и доводку ключевого агрегата затрачиваются основные усилия конструкторов и испытателей [3]. Создать надежно функционирующий ТНА — значит создать двигатель.

Важным показателем характеристик ТНА является его удельная масса, т. е. масса, отнесенная к его мощности. Удельная масса ТНА может составлять 25-35% от удельной массы ЖРД. Совмещение насоса, в частности, шнека с рабочим

колесом (РК) приводной турбины путем закрепления РК на его бандаже открыла широкие возможности для уменьшения массы ТНА [5, 8, 10].

Традиционно насосы ТНА конструируются с приводной турбиной, механически связанной со шнеком по валу. Такая конструкция приводит к повышению массы агрегата по сравнению со схемой двухярусного турбонасоса объединенной конструкции шнека с рабочим колесом (РК) приводной турбины. Для уникальной схемы по представленному ранее патенту № 2106534 показано, что приводная турбина, объединенная конструктивно со шнеком путем закрепления РК на его бандаже, успешно работает на горячем окислительном газе, отбираемом с температурой 700 К из выходной полости основной силовой турбины ТНА кислородно-керосиновой мощного ЖРД и поступающим после прохождения через РК в выходную полость шнека. Предложенная конструктивная схема позволяет заметно уменьшить массу, в частности, бустерного (предвключенного) насоса из-за сокращения осевого габарита агрегата подачи с подтверждением надежно-

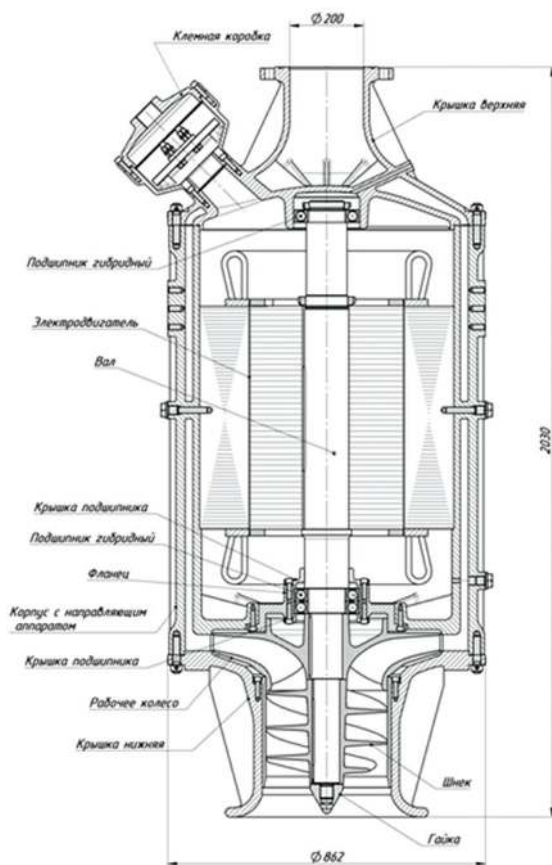


Рис. 1. Общий вид насоса
НСПГ-900-120

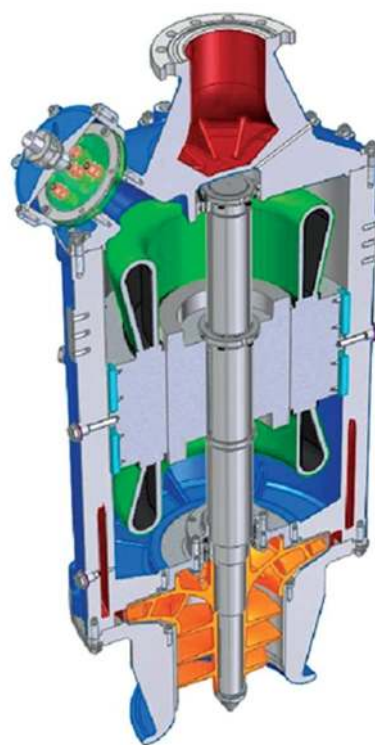


Fig. 1. The general view of the pump
NSPG-900-120

сти ее работы длительными испытаниями модельных образцов. Надежность также подтверждена успешным использованием в России и в США современных мощных ЖРД (РД-170, РД-180, РД-191 и др.) производства НПО Энергомаш имени академика В. П. Глушко (далее Энергомаш). Исследование перспективных свойств двухярусного турбонасоса позволило разработать — по аналогии с трехвальным воздушно-реактивным двигателем — трехкаскадный кислородный насос [5], позволяющий теоретически уменьшить массу турбонасоса на 30-40%. Это достигалось за счет повышения быстроходности каждого из каскадов при сохранении неизменным параметра напряженности каждого из роторов. В результате повышалась среднеинтегральное значение частоты вращения роторов трех каскадов по сравнению с традиционным двухкаскадным насосом.

Схема двухярусного турбонасоса может дополнительно найти широкое применение в инновационных проектах различных отраслей промышленности. Снижение массы агрегата наземного применения — без снижения его надежности работы — означает заметное снижение стоимости оборудования.

Такой посыл позволил разработать техническое решение, представленное в патенте на полезную модель РФ № 182784 от 2017 г. (агрегат КРИОТЭН). Отличие агрегата КРИОТЭН от технического решения по патенту № 2106534 заключается в том, что вход турбины соединен с источником газа, одинакового по составу и химической формуле с криогенной жидкостью и имеющего температуру, равную температуре окружающей среды. Очевидно, что агрегат КРИОТЭН способен перекачивать любую криогенную жидкость и даже жидкий водород.

На рис. 2 представлена схема двухярусного турбонасоса для перекачки криогенной жидкости, в частности, СПГ, а в таблице 1 представлены результаты расчета при перекачке агрегатом КРИОТЭН различных жидкостей при числе оборотов 6 400 об/мин с соблюдением условий кинематического и динамического подобия [11]. Кстати, при пересчете данных третьей строки таблицы 1 на пониженный расход СПГ, равный 106 кг/с (как у насоса НСПГ-900-120) получаем агрегат КРИОТЭН с числом оборотов $n = 3\,800$ об/мин и стоимостью изготовления — по данным специалистов Энергомаш — не более 22 млн руб. Кроме того, по данным специалистов Энергомаш возможно изготовление вертикального погружного двухярусного турбонасоса (с обеспечением параметров насоса НСПГ-900-120) с числом оборотов $n = 3\,800$ об/мин и массой, на порядок меньшей массы насоса ОАО «ЛГМ».

Заманчивы перспективы использования представленного технического решения при реализации, например, проекта Ямал СПГ при перекачке сжиженного природного газа или при выполнении Закона о сохранении зоны вечной мерзлоты, принятого в республике Саха по инициативе кафедры мерзловедения Якутского государственного университета (далее ЯкутГУ). В интервью заведующего указанной кафедры профессора В. В. Шепелева [7] подчеркнута феноменальность криолитосферы с учетом того, что зона вечной мерзлоты занимает 65% территории России. По результатам интервью становится заманчивой перспектива преимущественного начала применения перекачки СПГ в

зоне вечной мерзлоты, что призвано улучшить эксплуатацию криогенных трубопроводов.

Способ перекачки СПГ на дальние расстояния

Система ГТС, созданная почти 80 лет назад, на сегодняшний день требует больших финансовых затрат на диагностику и поддержание в работоспособном состоянии транспортных магистралей из-за их изношенности. Достаточно сказать, что «свищ» диаметром в один мм в магистрали за сутки выпускает 1 000 м³ природного газа. Вместе с тем потребности в наращивании объема транспортируемого ПГ возрастают. Актуальными становятся вопросы модернизации системы ГТС и транспортировки СПГ на значительные расстояния, которые в настоящее время доставляются преимущественно (как и ПГ 70-80 лет назад) различными видами транспорта, в том числе и океанскими танкерами.

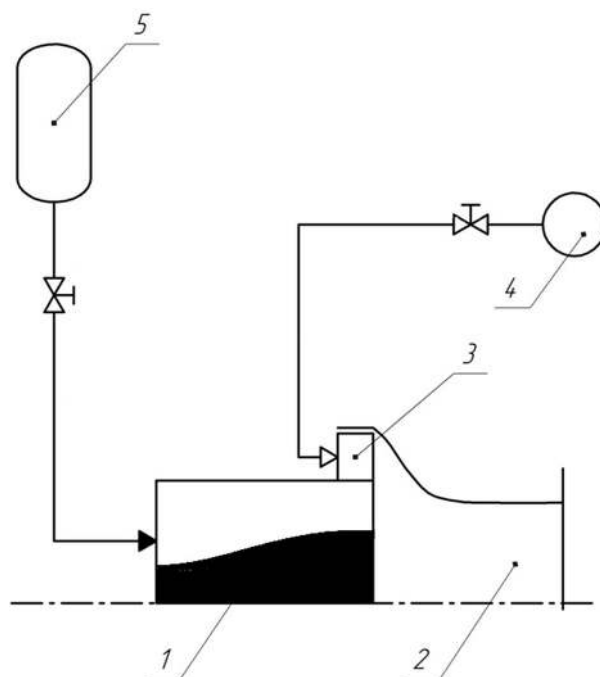


Рис. 2. Схема двухъярусного турбонасоса для перекачки СПГ
1 — насосный агрегат; 2 — зона завершения оживления природного газа; 3 — рабочее колесо турбины насосного агрегата (турбинное насосное колесо); 4 — источник природного газа высокого давления; 5 — источник сжиженного природного газа

Fig. 2. Diagram of a two-tier turbo pump for pumping LNG

1 — pump unit; 2 — natural gas revival completion zone; 3 — turbine impeller of pump unit (turbine pump wheel); 4 — high pressure natural gas source; 5 — liquefied natural gas source

Очевидна необходимость повышения поставок СПГ потребителю, в том числе и для решения проблемы снижения нагрузки на систему ГТС.

Предлагается способ транспортировки сжиженного природного газа на расстояния, значительно превышающие 10 км с использованием магистрали ГТС, вдоль которой расположен криогенный трубопровод с СПГ. Внутри трубопровода размещены агрегаты КРИОТЭН, осуществляющие перекачку СПГ и равноудаленные друг от друга по всей протяженности криогенного трубопровода. Вход турбины 3 (рис. 2) соединен с магистралью ГТС для обеспечения работы турбины с использованием природного газа высокого давления. После турбины ПГ поступает в поток СПГ, в котором конденсируется, повышая температуру СПГ. По мере прокачки СПГ по криогенному трубопроводу снижается давление и повышается температура сжиженного природного газа. При достижении определенного (заранее заданного) значения повышения температуры потока производится — с целью снижения его температуры — выпуск части СПГ в емкость для регазификации сжиженного природного газа за счет тепла окружающей среды. Технологии получения высокого давления газа в емкостях за счет их заправки криогенной жидкостью с последующей регазификацией теплом окружающей среды достаточно известны и широко применяются, в частности, на Испытательном комплексе КБХА (г. Воронеж) в соответствии с техническим решением [9]. Успешно отработана технология заправки емкости жидким кислородом (практически при атмосферном давлении) с его регазификацией теплом окружающей среды с достижением давления 30 МПа. Экономичность представленной технологии очевидна по сравнению с технологией, основанной на использовании компрессоров. Для достижения большего давления газа (до 100 МПа) с использованием различных криогенных жидкостей предложено — с учетом реальных свойств газов — осуществлять заправку регазификационной емкости криогенной жидкостью по техническому решению [1].

Таблица 1

Виды жидкостей и их параметры

Table 1

The types of liquids and their parameters

Криогенная жидкость	Расход G, кг/с	Входная температура T, К	Мощность N, кВт	Перепад давления на насосе, МПа	Плотность жидкости, кг/м ³
Жидкий кислород	460	95	790	1,6	1 110
Сжиженный природный газ (СПГ)	176	111	310	0,6	425
Жидкий азот	335	77	575	1,2	808
Жидкий водород	30	21	50	0,1	71

В предлагаемом способе перекачки СПГ природный газ высокого давления из регазификационной емкости может либо направляться в магистраль ПГ, либо использоваться для привода турбины 3 (рис. 2) агрегата КРИОТЭН. Расчеты показали, что для обеспечения параметров, указанных в строке 3 таблицы 1, достаточно расхода ПГ для подачи на турбину на уровне 5 кг/с с давлением 5 МПа и с температурой 288 К, причем повышение температуры потока СПГ при поступлении расхода ПГ после турбины в поток криогенного трубопровода не превышает одного градуса при числе оборотов агрегата КРИОТЭН, равном 6 400 об/мин. Возможно снижение расхода СПГ до 106 кг/с против указанного значения в строке 3 таблицы 1, что достигается снижением числа оборотов агрегата КРИОТЭН до $n = 3\,800$ об/мин с соответствующим снижением напора и мощности по условиям соблюдения кинематического и динамического подобия.

Очевидно, что предлагаемый способ нуждается во всестороннем обсуждении, прежде всего, с такими организациями, как Газпром, Новатэк, Роскосмос, Энергомаш, ЦИАМ, ЯкутГУ, Тюменский государственный университет (далее ТюмГУ), ЦКБ «Коралл» и эксплуатационными службами. Целесообразно подчеркнуть также, что представленная работа носит постановочный характер и призвана объединить усилия различных организаций, заинтересованных в повышении эффективности (практически беззатратной при максимальной экономии электроэнергии на уровне не меньше 65 тыс МВт) поставки больших объемов СПГ потребителю на расстояния, превышающие освоенные 10 км. Целесообразно — по множеству показателей — начинать с проведения постановочного совещания представителей перечисленных организаций в ЯкутГУ республики Саха.

В завершение отметим, что представленные высокие технологии ракетной и авиационной техники, частично отраженные в [2], разработаны в результате длительного и плодотворного сотрудничества специалистов мирового уровня Энергомаш и ЦИАМ. При оппонировании работы [2] интересно высказался академик РАН Б. И. Каторгин — руководитель Энергомаш в 1991-2005 гг.: «Считаю настоящее издание полезным в качестве, прежде всего, убедительного примера плодотворного союза специалистов из смежных высокотехнологических отраслей народного хозяйства» [2]. Вместе с тем высокие технологии наработаны и в сугубо земных отраслях промышленности России, которые могут оказаться полезными в создании, например, криогенных трубопроводов СПГ для условий применения в зоне вечной мерзлоты. В частности, в ЦКБ «Коралл» (г. Севастополь) имеется заметный научно-технический задел в разработке криогенных трубопроводов [9] для перекачки СПГ, причем в достаточно экзотических условиях. В связи с этим не исключена возможность проведения постановочного совещания в Севастополе — территории опережающего развития с головным участием ЦКБ «Коралл». Следует при этом помнить и город Тюмень в качестве центра успешного внедрения высоких технологий при освоении нефтегазовых месторождений, в частности, ТюмГУ, консолидирующий многочисленные научно-технические центры города нефтяников и

газовиков — на базе кафедры мониторинга многофазных систем — с нацеленностью на повышение эффективности разработки природных нефтегазовых месторождений.

Заключение

История поэтапного развития поставок потребителю природного газа (ПГ) с использованием газотранспортной системы (ГТС) насчитывает почти 80 лет. На сегодняшний день ГТС требует значительных финансовых затрат на диагностику и ее поддержание из-за изношенности магистралей. Достаточно упомянуть, что «свищ» в магистрале диаметром в один мм выпускает за сутки 1 000 м³ ПГ. Вместе с тем потребности в повышении транспортируемого газа возрастают. Актуальными становятся вопросы трубопроводной транспортировки сжиженного природного газа (СПГ), который преимущественно доставляется (как и ПГ 70-80 лет назад) потребителю различными видами транспорта, в том числе океанскими танкерами.

Предлагается к реализации способ транспортировки СПГ с использованием высоких технологий ракетно-космической и авиационной отраслей промышленности. В частности, обосновывается целесообразность транспортировки СПГ на расстояния, превышающие освоенные 10 км, в интеграции с системой ГТС, протяженность которой приближается к пяти экваторам Земли, на основе использования двухярусного турбонасоса и криогенной заправки емкостей для повышения давления ПГ в них за счет тепла окружающей среды.

Представленная работа носит постановочный характер и призвана объединить усилия различных организаций (уже упомянутых Газпром, Новатэк, Роскосмос, Энергомаш, ЦИАМ, ЯкутГУ, ТюмГУ, ЦКБ «Коралл» и эксплуатационных служб), заинтересованных в повышении эффективности (практически беззатратной: с экономией не менее 65 тыс. МВт) поставки больших объемов СПГ потребителю на расстояния, значительно превышающие освоенные 10 км.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гуров В. И. Баллон заправки и газификации криогенной жидкости / В. И. Гуров, К. Н. Шестаков. Патент РФ № 156584 на полезную модель от 09.12.2014.
2. Гуров В. И. Вклад ЦИАМ в создание ракетных двигателей / В. И. Гуров, А. И. Гулиенко, В. Л. Семенов, В. А. Шерстянников, Л. С. Яновский. Редакция журнала «Двигатели», 2010. 194 с.
3. Гуров В. И. Разработка криогенных турбонасосов / В. И. Гуров, К. Н. Шестаков. / М.: Информконверсия, 2000. 132 с.
4. Гуров В. И. Система подачи жидкого кислорода и способ его подачи из бака потребителю / В. И. Гуров, Е. Н. Ромасенко, В. К. Чванов, К. Н. Шестаков. Патент РФ на изобретение № 2547353 от 28.02.2014.

5. Гуров В. И. Стратегия уменьшения массы высоконапряженных ТНА мощных ЖРД / В. И. Гуров, Е. Н. Ромасенко, К. Н. Шестаков // Труды XXX академических чтений по космонавтике. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006.
6. Ильичев В. А. Стенд для испытаний энергоустановок с криогенными компонентами / В. А. Ильичев, В. И. Пригожин, А. Р. Савич. Патент РФ № 2445503 на изобретение с приоритетом от 08.10.2010.
7. Интервью профессора В. В. Шепелева 07.11.2020 корреспонденту радиостанции «Комсомольская правда».
8. Каналин Ю. И. Гидравлические характеристики оседиагональных бустерных насосов при их работе с турбоприводами / Ю. И. Каналин, Е. Н. Ромасенко // Труды № 20 НПО Энергомаш имени академика В. П. Глушко. 2002.
9. Ленский В. Подводные СПГ-трубопроводы / В. Ленский, О. Фесенко, П. Курис // Offshore (Russia). Ноябрь 2016. С. 64-71.
10. Ромасенко Е. Н. Бустерные турбонасосные агрегаты ЖРД конструкции НПО Энергомаш / Е. Н. Ромасенко, Л. А. Толстиков // Труды № 22 НПО Энергомаш имени академика В. П. Глушко. 2004.
11. Седов Л. И. Методы подобия и размерности в механике. М.: Наука, 1971.
12. Солодченков В. Ф. Опыт разработки насосного оборудования для перекачивания сжиженного природного газа / В. Ф. Солодченков, Е. В. Соколов // Судостроение. 2013. № 2. С. 44-46.

Valery I. GUROV¹

Vladimir V. KURNOSOV²

Evgeny N. ROMASENKO³

Elena V. SHCHERBAKOVA⁴

UDC 622.691.6: 621.452.2

**POSSIBILITIES OF TRANSPORTATION
OF LIQUEFIED NATURAL GAS USING
HIGH TECHNOLOGIES OF ROCKET
AND AVIATION TECHNOLOGY**

¹ Dr. Sci. (Tech.), Head of Sector,
Central Institute of Aviation Motor Construction
named after P. I. Baranov (Moscow)
dr.gurow2015@yandex.ru

² Cand. Sci. (Phys.-Math.), General Director,
Komas LLC (Aprelevka, Moscow Region)
kbb@komas.su

³ Cand. Sci. (Tech.), Leading Constructor,
NPO Energomash named after academician V. P. Glushko (Khimki)

⁴ Cand. Sci. (Tech.), Head of the Sector,
Central Institute of Aviation Motor Construction
named after P. I. Baranov (Moscow)
elenshch42@mail.ru

Abstract

This article presents the history of the development — almost 80 years — of the gas transmission system (GTS) supplying the consumer with natural gas (NG) with a length of almost 200 thousand km. The authors present the structural integration of the successful

Citation: Gurov V. I., Kurnosov V. V., Romasenko E. N., Shcherbakova E. V. 2020. “Possibilities of transportation of liquefied natural gas using high technologies of rocket and aviation technology”. Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy, vol. 6, no. 4 (24), pp. 88-100.

DOI: 10.21684/2411-7978-2020-6-4-88-100

historical experience in creating a large-scale natural gas transmission system with the prospect of building a liquefied natural gas transmission system on this basis. In addition, this paper aims to answer the following issues: the necessity of modernizing the GTS due to its deterioration and the need to increase the volumes of GHG supplies.

The results of the analysis of high technologies of the rocket and aviation industries show the possibility of effective integration of the GTS with cryogenic transportation of liquefied natural gas (LNG) over distances significantly exceeding 10 km, which has been sufficiently developed at present.

The authors rationalize the potential organizations interested in the implementation of the proposed integration.

Keywords

Natural gas, gas transportation system, liquefied natural gas (LNG), LNG pumping, innovative pumping unit, imported substitution, efficiency, liquid propellant rocket engine (LPRE), the key unit of LPRE.

DOI: 10.21684/2411-7978-2020-6-4-88-100

REFERENCES

1. Gurov V. I., Shestakov K. N. 2014. RF Patent No. 156584 for a utility model of 9 December "Cylinder for filling and gasification of cryogenic liquid". [In Russian]
2. Gurov V. I., Gulienko A. I., Semenov V. L., Sherstyannikov V. A., Yanovskiy L. S. 2010. Contribution of CIAM to the creation of rocket engines / V. I. Gurov // Publishing of LLC "Editorial office of the magazine" Engines ", 2010. 194 pp. [In Russian]
3. Gurov V. I., Shestakov K. N. 2000. Development of Cryogenic Turbopumps. Moscow: Informconversion. 132 pp. [In Russian]
4. Gurov V. I., Romasenko E. N., Chvanov V. K., Shestakov K. N. 2014. RF patent for invention No. 2547353 of 28 February "Liquid oxygen supply system and the method of its supply from the tank to the consumer". [In Russian]
5. Gurov V. I., Romasenko E. N., Shestakov K. N. 2006. "Strategy for reducing the mass of highly stressed TNA powerful liquid rocket engines". Proceedings of 30th Academic Readings in Cosmonautics (25-27 January). Moscow: MGTU named after N. E. Bauman. [In Russian]
6. Ilyichev V. A., Prigozhin V. I., Savich A. R. 2010. RF patent No. 2445503 for an invention with a priority of 8 October 2010 "Stand for testing power plants with cryogenic components". [In Russian]
7. Interview of Professor V. V. Shepelev 7 November 2020 to the correspondent of the radio station "Komsomolskaya Pravda". [In Russian]
8. Kanalin Yu. I., Romasenko E. N. 2002. "Hydraulic characteristics of axial booster pumps during their operation with turbo drives". Proceedings No. 20 NPO Energomash named after academician V. P. Glushko. [In Russian]
9. Lensky V., Fesenko O., Kuris P. 2016. "Subsea LNG pipelines". Offshore (Russia), November, pp. 64-71. [In Russian]

10. Romasenko E. N., Tolstikov L. A. 2004. "Booster turbopump units of LPRE designed by NPO Energomash". Proceedings No. 20 NPO Energomash named after academician V. P. Glushko. [In Russian]
11. Sedov L. I. 1971. Similarity and Dimension Methods in Mechanics. Moscow: Nauka. [In Russian]
12. Solodchenkov V. F., Sokolov E. V. 2013. "Experience of developing pumping equipment for pumping liquefied natural gas". Sudostroenie, no. 2. pp. 44-46. [In Russian]