

<https://doi.org/10.17073/2072-1633-2022-2-177-188>

Стратегический подход к внедрению инноваций в Арктике на примере технологии сжижения природного газа «Арктический каскад»

А.А. Спиридонов¹, М.Л. Фадеева² , Т.О. Толстых² 

¹ Санкт-Петербургский государственный университет,
199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., д. 7-9, Российская Федерация

² Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,
119049, Москва, Ленинский просп., д. 4, стр. 1, Российская Федерация

 FadeevaML01@gmail.com

Аннотация. В статье рассматривается ситуация на мировом рынке производства и потребления сжиженного природного газа. Проанализированы основные мировые тенденции, а также причины существенного роста потребления сжиженного природного газа в большинстве стран. Рассмотрена структура мирового импорта сжиженного природного газа и возможности увеличения объема поставок российскими энергетическими компаниями. Российские компании преимущественно осуществляли поставки сжиженного природного газа в европейские страны. В результате анализа выявлен высокий экспортный потенциал в отношении азиатского рынка. Реализация данного потенциала является важнейшей стратегической задачей для отечественных энергетических компаний. В статье также рассмотрена история и текущий процесс развития производства сжиженного природного газа на территории России. Раскрыты различные аспекты текущей реализации проектов «Ямал СПГ» и «Арктик СПГ 2» на территории Арктической зоны РФ. В частности, описан процесс развития транспортно-логистической системы в рамках реализации данных проектов. Кроме того, в статье проанализирован вопрос обеспечения технологической независимости реализации СПГ-проектов. Российским энергетическим компаниям следует увеличивать технологическую независимость и локализацию производства посредством последовательной реализации стратегии импортозамещения. Одним из решений в области обеспечения технологической независимости является инновационная технология сжижения природного газа «Арктический каскад». В статье подробно рассмотрены технический и экономический аспекты применения данной технологии. Использование данной технологии позволит обеспечить снижение себестоимости процесса производства сжиженного природного газа на 30 %. Кроме того, данная инновационная технология способна обеспечить 100%-ную локализацию производства.

Ключевые слова: энергетические ресурсы, сжиженный природный газ, мировой рынок, энергетические компании, Арктика, технологии производства, проект «Арктический каскад», рост потребления, внедрение инноваций

Для цитирования: Спиридонов А.А., Фадеева М.Л., Толстых Т.О. Стратегический подход к внедрению инноваций в Арктике на примере технологии сжижения природного газа «Арктический каскад». *Экономика промышленности*. 2022;15(2):177–188. <https://doi.org/10.17073/2072-1633-2022-2-177-188>

Strategic approach to implementation of innovation in the Arctics on the example of “Arctic Cascade” natural gas liquefaction technology

A.A. Spiridonov¹, M.L. Fadeeva² ✉, T.O. Tolstykh² 

¹ St. Petersburg State University,
7-9 Universitetskaya Emb., Saint Petersburg 199034, Russian Federation

² National University of Science and Technology MISIS,
4-1 Leninskiy Ave., Moscow 119049, Russian Federation

✉ FadeevaML01@gmail.com

Abstract. The article examines the current situation in the world production and consumption of the liquefied natural gas (LNG). The main global trends as well as the reasons for significant growth in LNG consumption in most countries are analyzed. The authors also study the structure of global import of LNG and the opportunities for increasing supplies by the Russian energy companies. Russian companies are primarily supplying LNG to European countries. However, the results of the analysis show high export potential of the Asian market. Realizing the potential is the most important strategic task for domestic energy companies. The article also examines the history and the current process of developing LNG production on the Russian territory. The authors reveal various aspects of the current implementation of such projects as “Yamal LNG” and “Arctic LNG 2” within the Arctic area of the Russian Federation. Particularly, the authors describe development of transportation-logistics system as part of these projects. Moreover, the article contains the analysis of the problem of ensuring technological independence in the process of implementation of LNG projects. Russian energy companies should increase their technological independence and localization of production by consistent implementation of the import substitution strategy. One of the solutions in ensuring technological independence is innovation technology of natural gas liquefaction “Arctic Cascade”. The article presents the detailed technical and economical aspect of implementing this technology. Using this technology ensures 30 % reduction of the LNG production cost price. Besides, this innovation technology can ensure 100 % localization of production.

Keywords: energy resources, liquefied natural gas, the Arctic, gas, Arctic cascade, technology, import, innovation

For citation: Spiridonov A.A., Fadeeva M.L., Tolstykh T.O. Strategic approach to implementation of innovation in the Arctic on the example of the “Arctic Cascade” natural gas liquefaction technology. *Russian Journal of Industrial Economics*. 2022;15(2):177–188. (In Russ). <https://doi.org/10.17073/2072-1633-2022-2-177-188>

北极创新发展战略方针——以“北极级联式”“天然气液化技术为例

A.A. 斯皮里多诺夫¹, M.L. 法捷耶娃², T.O. 托尔斯泰赫²

¹ 圣彼得堡国立大学，圣彼得堡199034，俄罗斯联邦圣彼得堡市大学沿岸街7/9号

² 国立研究型技术大学 MISIS，邮编119049，俄罗斯联邦莫斯科市列宁斯基大街4号

✉ FadeevaML01@gmail.com

摘要：本文研究了全球液化天然气生产和消费的现状。分析了全球主要趋势，以及大多数国家液化天然气消费大幅增长的原因。探讨了全球液化天然气进口的结构和俄罗斯能源公司增加供应的机遇。目前，俄罗斯公司主要向欧洲国家供应液化天然气。同时，分析显示，对亚洲市场的出口潜力很大。实现这一潜力是国内能源企业最重要的战略任务。文章还讨论了俄罗斯液化天然气生产的历史和当前的发展。介绍了目前在俄罗斯北极地区实施的亚马尔液化天然气和北极液化天然气2号项目的各个方面。特别描述了在实施这些项目框架下运输和物流系统的发展

процесс. Кроме того, в статье анализируются вопросы обеспечения технологической независимости при реализации проекта. Российская энергетическая компания должна обеспечить импортную замену технологий и повысить степень локализации производства. Одним из решений является инновационная технология — «Арктический каскад» — технология сжижения природного газа. В статье подробно рассматриваются технологические и экономические аспекты. Использование данной технологии позволит снизить стоимость сжижения природного газа на 30%. Кроме того, данная технология гарантирует 100% локализацию производства.

Ключевые слова: сжиженный природный газ, Арктика, природный газ, Арктический каскад, технология, импорт, инновации

Введение

В настоящее время природно-климатические условия Арктики предъявляют высокие требования к технологической части реализации проектов в данном регионе. Производственная деятельность в Арктике осуществляется в условиях отрицательных температур воздуха, шквалистого ветра, ограниченной видимости и т.д. Обеспечение эффективной и безопасной деятельности в подобных условиях требует дополнительных вложений в технологическую составляющую промышленных объектов. По этой причине промышленные проекты, реализуемые на территории Арктики, являются чрезвычайно капиталоемкими для российского нефтегазового сектора.

Однако природно-климатические условия Арктики являются не только препятствием, но и уникальной возможностью для реализации технологических проектов. В частности, низкие температуры атмосферы в данном регионе используются в технологическом процессе сжижения природного газа. Инновационным является внедрение технологии сжижения природного газа с использованием естественной отрицательной температуры атмосферного воздуха под названием «Арктический каскад». Целью является оценка потенциального экономического эффекта от применения инновационной технологии сжижения природного газа «Арктический каскад».

Применены инструменты и методы стратегического, ситуационного и системного анализа, методология проектного менеджмента, а также методы экспертных оценок.

Информационная база исследования основана на личном производственном опыте авторов в российских и международных энергетических компаниях, а также на анализе трудов российских и зарубежных экспертов в области промышленного менеджмента, теории и практики стратегического управления, инфраструктурного развития нефтегазового комплекса.

Актуальность данного исследования заключается в предложении расширения применения рассматриваемой технологии для проектов по сжижению природного газа «Ямал СПГ» и «Арктик СПГ 2» на территории Арктики.

Текущая ситуация на мировом рынке сжиженного природного газа

Арктика чрезвычайно богата запасами различных природных ресурсов, в том числе природного газа. По оценкам экспертов на российской арктической территории сосредоточено примерно 25 % разведанных мировых запасов природного газа (50,8 трлн м³) [1].

Существуют технологии, позволяющие искусственно преобразовывать природный газ в состояние жидкости путем охлаждения до температуры -162°C . В результате образуется сжиженный природный газ (СПГ), представляющий собой жидкость, плотность которой в 2 раза меньше плотности воды.

Данная технология активно применяется в нефтегазовой промышленности. Это позволило за прошедшие 10 лет увеличить объем производства СПГ более чем в 2 раза [2]. Данная тенденция лишь растет. В 2020 г. рынок СПГ составил 366 млн т, что на 66 % больше по отношению к 2010 г. (рис. 1).

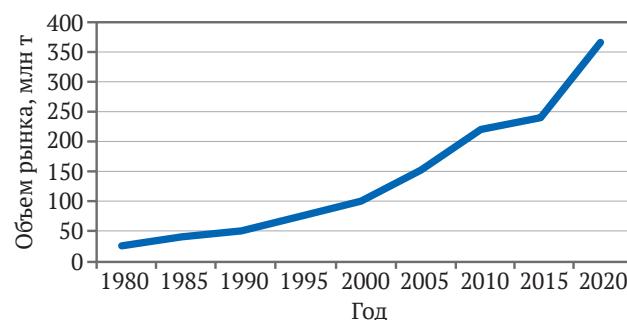


Рис. 1. Общемировой объем производства СПГ [3]

Fig. 1. Global liquefied natural gas (LNG) production volume [3]

По оценкам британско-нидерландской нефтегазовой компании *Royal Dutch Shell* мировое потребление СПГ к 2030 г. составит 500 млн т [4]. Такой существенный рост мирового потребления СПГ связан одновременно с несколькими факторами:

1) сокращение мирового потребления угля (в частности, европейские страны планируют полностью отказаться от использования угля к 2030 г.);

2) уменьшение добычи природного газа в европейских странах;

3) ограничение использования атомной энергии странами Азиатско-Тихоокеанского региона (АТР);

4) постепенное увеличение числа потребителей СПГ (за последние 5 лет число стран – потребителей СПГ увеличилось с 26 до 40) [5];

5) рост потребности в энергоносителях со стороны азиатских стран (Китай, Индия, Южная Корея и др.).

Кроме того, увеличение потребления СПГ обусловлено высокой экономической эффективностью и экологичностью природного газа. Так, плотность природного газа в сжиженном состоянии в 600 раз выше, чем в исходном (газообразном) состоянии. Данная особенность позволяет осуществлять транспортировку СПГ автомобильным и железнодорожным транспортом, а также судами-газовозами [6].

В странах Азии и Европы постепенно происходит процесс замещения традиционных теплоносителей (уголь, мазут) природным газом, что приводит к росту объемов поставок СПГ. На сегодняшний день Россия занимает четвертое место в мире по объему экспорта СПГ (29 млн т). Во многом столь высокая позиция по объему экспорта СПГ обусловлена использованием транспортной артерии Северного морского пути (СМП). Так, в 2020 г. по СМП было перевезено почти 33 млн т грузов, при этом 18 млн т пришлось на долю СПГ [7].

На сегодняшний день СМП является кратчайшим путем из Азии в Европу. Расстояние, проходимое судами из порта Мурманска (Россия) в порт Иокогаму (Япония) через Суэцкий канал, составляет 12 840 морских миль, а по Северному морскому пути данное расстояние насчитывает всего 5770 морских миль [8]. Таким образом, использование СМП позволяет уменьшить время движения судов по маршруту «Европа-Азия» более чем в 2 раза, что способствует достижению существенной экономии за счет сокращения расходов на эксплуатацию судов.

Следует отметить, что в условиях глобального потепления СМП обладает потенциалом для круглогодичного судоходства и получения статуса важнейшей мировой транзитной зоны. Ранее навигация по СМП была возможна только в летний период, однако постепенно навигационный период увеличивается. Так, в 2020 г. судоходство по СМП было прекращено в ноябре, а возобновлено уже в январе 2021 г. По словам генерального директора ПАО «Совкомфлот», круглогодичная навигация по СМП может начаться с зимы 2023–2024 гг.

либо 2024–2025 гг. [9]. При этом глава «Совкомфлота» отметил, что при наличии ледокольной поддержки круглогодичное судоходство может осуществляться уже в настоящее время.

Для эффективной круглогодичной эксплуатации СМП необходимо создание новых морских портов и терминалов, а также строительство транспортных и ледокольных судов. При этом круглогодичное судоходство по СМП обеспечивает следующие прямые и косвенные преимущества для российской промышленности [10]:

1) повышение пропускной способности портовых терминалов;

2) снижение нагрузки на трубопроводную систему (нефтепроводы и газопроводы);

3) диверсификация экспортных направлений;

4) повышение уровня энергетической безопасности.

Кроме того, использование СМП позволяет осуществлять поставки СПГ на европейский и азиатский рынок. Стоит отметить, что страны АТР (Япония, Китай, Южная Корея) являются крупнейшими мировыми импортерами СПГ. Вышеуказанные страны совокупно импортируют более половины мирового объема производимого СПГ [11]. Структура импорта СПГ за период 2010–2020 гг. представлена на **рис. 2**.

На данной диаграмме наглядно представлено, что, несмотря на пандемию коронавируса, в 2020 г. объем потребления СПГ в большинстве стран остался на высоком уровне (в Китае наблюдается даже рост потребления). Таким образом, страны АТР для России являются ключевыми импортерами СПГ, что позволяет рассчитывать на увеличение объемов поставок в указанные страны в будущем. По оценкам аудиторско-консалтинговой компании EY (Ernst & Young), к 2030 г. мировой объем спроса на СПГ достигнет примерно 500 млн т/год. При этом не менее двух третей указанного объема будет потребляться странами азиатского региона [12].

Однако на начало 2022 г. российские компании преимущественно осуществляли поставки СПГ в европейские страны. Так, 22 из 30 млн т СПГ в 2020 г. было экспортировано российскими энергетическими компаниями в страны ЕС. В то же время объем поставок в страны АТР в 2020 г. составил лишь 8 млн т. С учетом увеличивающегося объема потребления СПГ азиатскими странами, данный факт говорит о наличии высокого неиспользованного экспортного потенциала в отношении азиатского рынка. Увеличение объема экспорта и доли на мировом рынке СПГ является важнейшей стратегической задачей на ближайшие годы для российских энергетических компаний.

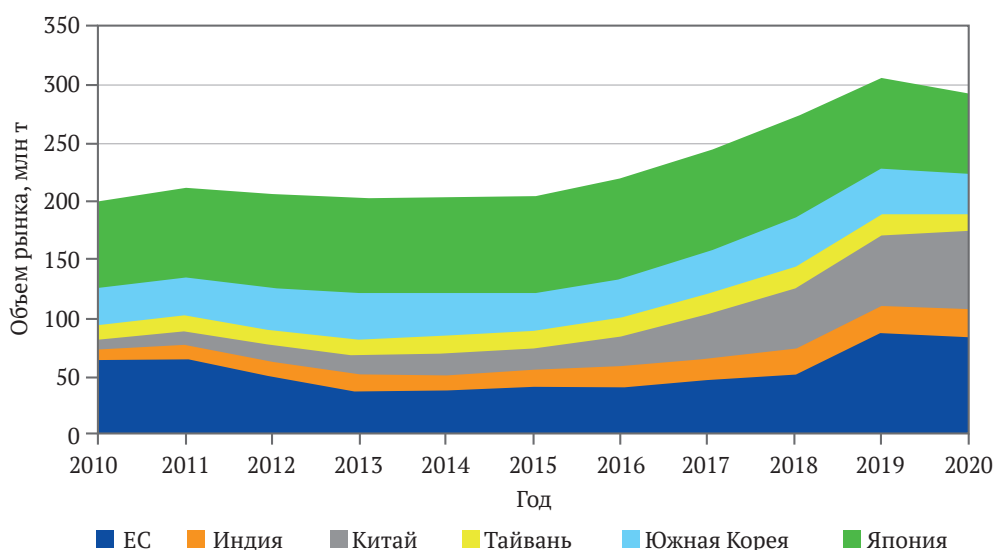


Рис. 2. Структура импорта СПГ в 2010–2020 гг. [12]

Fig. 2. Structure of LNG imports in 2010–2020 [12]

Реализация нефтегазовых проектов в России

Следует отметить, что производство СПГ в России началось существенно позже по сравнению с другими странами. Так, американская компания Comstock в 1959 г. осуществила первую поставку СПГ в Великобританию. Позднее заводы по производству СПГ были построены в Алжире, Брунее, Индонезии, Малайзии, Австралии, Катаре, Омане и Нигерии.

В России первый завод по производству СПГ был введен в эксплуатацию в 2009 г. в рамках проекта «Сахалин 2». В результате 29 марта 2009 г. из России в Японию была отправлена первая партия СПГ [13]. Отсутствие заводов по производству СПГ в предыдущие периоды было обусловлено отсутствием необходимости, так как СССР и позднее Россия успешно обеспечивали объем экспортных поставок природного газа с использованием магистральных газопроводов в такие страны, как Болгария, Венгрия, Финляндия, Италия, Польша и т.д.

Однако поставки природного газа с использованием газопроводов ограничивает перечень стран-покупателей в силу ограниченной протяженности труб газопровода. Вследствие этого, в целях увеличения объемов продажи природного газа в России началась постепенная реализация проектов по строительству мощностей для производства СПГ. На сегодняшний день транспортировка газа в сжиженном виде обеспечивает независимость процесса поставки от транзита через территории третьих стран [14]. Вследствие этого возникает возможность диверсификации

направлений поставок энергоносителей, что позитивно сказывается на объеме российского экспорта газа.

В течение последних нескольких лет представителями российских энергетических компаний озвучены стратегические инициативы по реализации нескольких проектов по производству СПГ («Владивосток СПГ», Дальневосточный СПГ, Печора СПГ и др.). По оценкам экспертов, в случае успешной реализации вышеуказанных проектов суммарный потенциал производства СПГ на территории России составит более 120 млн т в год [15].

По итогам 2020 г. суммарное производство СПГ на территории России составило 30 млн т. На сегодняшний день крупнейшей российской компанией, реализующей проекты по производству СПГ, является «Новатэк». Основной источник прибыли этой компании – реализация природного газа (продуктов переработки), а также жидких углеводородов [16]. Большинство месторождений, принадлежащих компании, находятся на территории Ямало-Ненецкого автономного округа.

Компанией «Новатэк» реализуются следующие проекты, связанные с производством СПГ:

– **«Ямал СПГ»:** компания осуществляет добычу природного газа на Южно-Тамбейском газоконденсатном месторождении (расположенном на северо-восточном берегу полуострова Ямал и частично – на шельфе Обской губы), который впоследствии подвергается процессу сжижения на заводе «Ямал СПГ» в поселке Сабетта;

– «Арктик СПГ 2»: компания осуществляет строительство трех технологических линий по производству СПГ из газа, добытого на Салмановском (Утреннем) газоконденсатном месторождении, расположенном в северной части Гыданского полуострова, в 70 км от завода «Ямал СПГ».

Данные проекты входят в число наиболее капиталоемких для российского нефтегазового сектора, требуют значительных инвестиций и имеют длительный срок окупаемости. По этой причине проекты реализуются при совмест-

ном участии компаний «Новатэк» (Россия), Total (Франция), «Китайской национальной нефтегазовой корпорации» (КНР) и «Фонда Шелкового пути» (КНР). Однако именно «Новатэк» владеет большинством акций в АО «Ямал СПГ», большинством долей в ООО «Арктик СПГ 2» и является оператором данных проектов.

Следует отметить, что эти проекты уникальны с точки зрения географического расположения производственных мощностей в арктическом регионе (рис. 3 и 4).

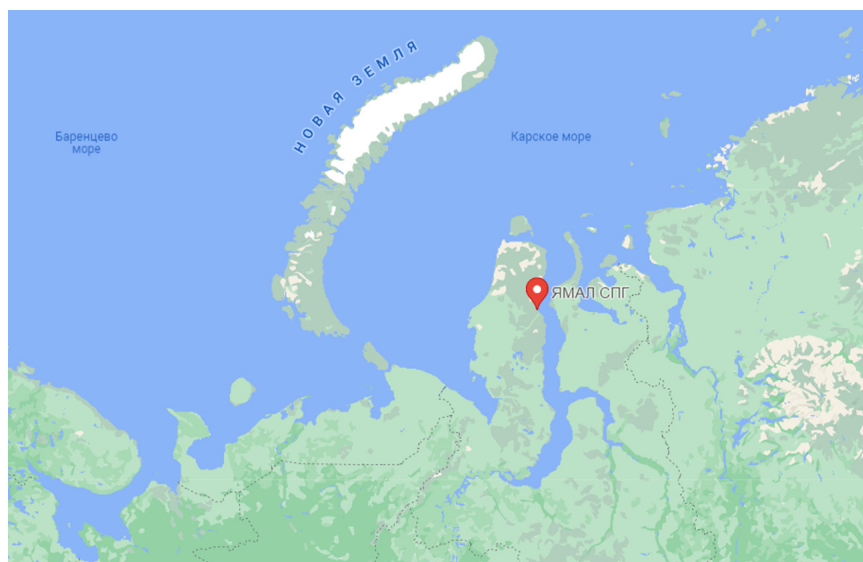


Рис. 3. Географическое расположение производственных мощностей проекта «Ямал СПГ»

Fig. 3. Geographical location of the production facilities of the project “Yamal LNG”

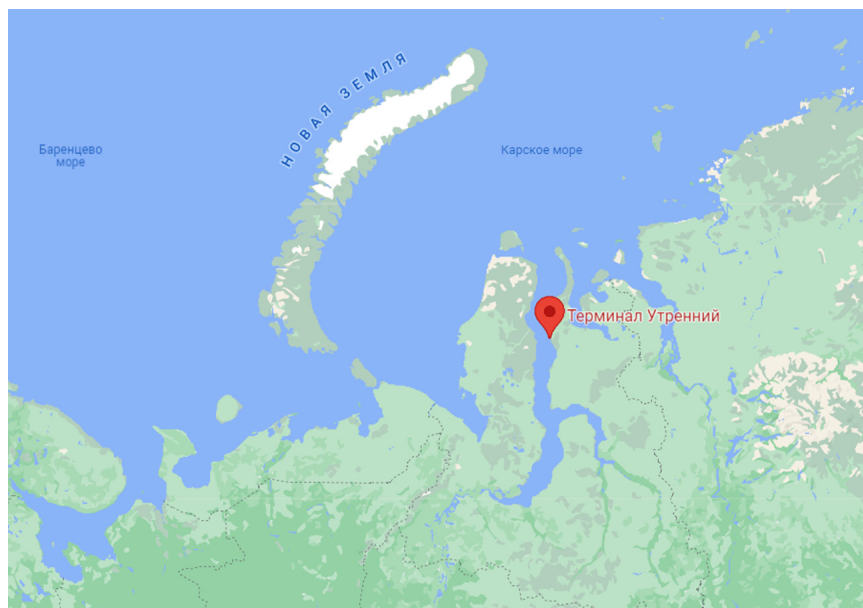


Рис. 4. Географическое расположение производственных мощностей проекта «Арктик СПГ 2»

Fig. 4. Geographical location of the production facilities of the project “Arctic LNG 2”

В силу географических особенностей реализация выше указанных проектов проходит в сложнейших природно-климатических условиях (отрицательная температура воздуха, наличие шквалистого ветра, полярные ночи и т.д.). Транспортировка произведенного СПГ осуществляется по СМП с использованием специальных судов-газовозов в ледовых условиях. Для перевозки СПГ необходима криогенная техника, так как его перевозят на специально оборудованных судах при отрицательной температуре – примерно -160°C [17]. Соответственно, реализация этих проектов требует высокого уровня инфраструктурной подготовки, которая включает следующие этапы:

- 1) подготовка площадки;
- 2) прокладка внутриобъектовых и внешних дорог;
- 3) строительство транспортных и грузовых терминалов (морские и речные порты; аэропорты; железнодорожные станции погрузки-разгрузки и т.д.).

Реализация нефтегазовых проектов оказывает положительное влияние не только на развитие промышленности, но и на развитие инфраструктуры в регионе. Например, в рамках реализации проектов «Ямал СПГ» и «Арктик СПГ 2» был построен порт «Сабетта» для осуществления перевалки СПГ на арктические суда-газовозы, который в перспективе может стать базой для судов, идущих по СМП. Кроме того, в целях обеспечения доставки персонала на удаленные производственные объекты были построены аэропорты Сабетта и Утренний.

Процесс совершенствования транспортной инфраструктуры в Арктике должен включать в себя развитие не только морских портов, но и железнодорожной сети. Так, высокую значимость имеет реализация проектов, предусматривающих прокладку участков железной дороги по направлениям: Архангельск – Пермь; Полуночная – Обская – Бованенково; Новый Уренгой – Надым – Салехард и др. [18].

Обеспечение технологической независимости при реализации СПГ-проектов

Проекты по строительству производственных мощностей для производства СПГ имеют большое значение для развития российской промышленности: при реализации одного лишь проекта «Ямал СПГ» задействовано более 700 российских предприятий – поставщиков различных компонентов оборудования. Следует отметить, что отбор поставщиков производился самой компанией «Новатэк» на конкурсных условиях.

Председатель правления компании «Новатэк» Л. Михельсон прогнозирует, что к 2023 г. в России появится новая отрасль промышленности – производство оборудования для сжижения природного газа [19].

С учетом высокой стратегической значимости СПГ-проектов очевидна необходимость формирования отечественного рынка поставщиков оборудования и услуг. Подобная инициатива невозможна без развития комплексной стратегии импортозамещения, направленной на избавление российских энергетических компаний от импортозависимости (рис. 5).

Реализация стратегии импортозамещения также предусматривает активизацию развития малого и среднего бизнеса.

Многие предприятия малого и среднего бизнеса предприняли определенные шаги для соответствия существующим требованиям: переоснастили оборудование, направили персонал на обучение и т.д.

Необходимо отметить, что привлечение представителей малого и среднего бизнеса к реализации крупных промышленных проектов является одним из трендов настоящего времени. На сегодняшний день в структуре мирового нефтегазового комплекса 70 % компаний относятся к предприятиям малого бизнеса, количество сотрудников которых не превышает 10 чел. Тем не менее данные компании успешно функционируют и вносят свой вклад в реализацию нефтегазовых проектов.

Стоит отметить, что в экономиках развитых стран доля малого и среднего бизнеса достигает 60 %. Для российской экономики данный показатель составляет лишь 20 %. В целях повышения данного показателя реализуется протекционистская политика в отношении российских предприятий малого и среднего бизнеса.

Реализация промышленных проектов в Арктике не может диктоваться только законами рынка. Необходимо учитывать не только экономическое, но и социально-политическое значение реализации проектов в данном регионе. Опыт зарубежных стран демонстрирует эффективность государственного регулирования деятельности малого и среднего бизнеса в Арктическом регионе. В ряде стран для энергетических компаний на законодательном уровне установлено обязательство по вовлечению местной рабочей силы в различные промышленные проекты. Применение местных товаров, услуг и рабочей силы во многом определяет качество корпоративной социальной деятельности, которая является одним из важнейших индикаторов

успешности современной энергетической компании. Кроме этого, иностранные предприятия малого и среднего бизнеса образуют различные кластеры: кластер бурения, кластер обеспечения, кластер сервисных услуг и др.

Подобные инициативы могут быть реализованы и в российских условиях. Например, Мурманская область, Архангельская область, Ненецкий автономный округ представляют естественные кластеры для создания эффективной системы интегрированного обеспечения реализации нефтегазовых проектов. На территории данных регионов еще с советского времени существует ряд уникальных предприятий, которые ранее фокусировались на задачах оборонно-промышленного комплекса, а в настоящее время могут успешно применять наработанные компетен-

ции в рамках реализации высокотехнологичных нефтегазовых проектов.

Целесообразно на законодательном уровне закрепить обязательства крупного бизнеса по привлечению местных подрядчиков в рамках реализации промышленных проектов. Данная мера позволит местным предприятиям малого и среднего бизнеса гарантированно обеспечить загрузку производственных мощностей и занятость персонала. Для того чтобы успешно вовлекать региональную промышленность, необходимо проводить регулярные встречи с генеральными подрядчиками и операторами проектов. Для каждого предприятия малого и среднего бизнеса Арктического региона целесообразно разрабатывать стратегию вовлечения в нефтегазовые проекты.



Рис. 5. Стратегия импортозамещения в укрупненном виде

Fig. 5. The strategy of import substitution in an enlarged form

Технология «Арктический каскад»

Несмотря на сложные климатические условия, в Арктике существует возможность внедрять различные инновационные решения. Одной из инноваций при производстве СПГ в рамках проекта «Ямал СПГ» стала технология сжижения природного газа «Арктический каскад», которая использовалась при строительстве четвертой линии производства. В перспективе данная технология будет применена в рамках проекта «Арктик СПГ 2».

Следует отметить, что классическая схема сжижения природного газа предполагает последовательную прокачку газа под давлением 3,8 МПа через каскад из трех компрессорных холодильных циклов, последовательно охлаждающая газ до температуры -162°C :

Первый этап – в теплообменниках используется пропан, в результате чего температура газа при прохождении данного этапа понижается до -50°C .

Второй этап – в теплообменниках используется этилен, в результате чего температура газа при прохождении данного этапа понижается до -110°C .

Третий этап – в теплообменниках используется метан, в результате чего температура газа при прохождении данного этапа понижается до -150°C .

После прохождения данных ступеней давление газа понижается до 0,01 МПа, охлаждаясь до температуры -162°C , газ конденсируется и поступает в сепаратор.

Графически классическая схема установки сжижения природного газа представлена на рис. 6.

Каждый этап сжижения требует эксплуатации дополнительных теплообменников, насосов

турбин и т.д., что увеличивает себестоимость производства СПГ. Теоретически снижения себестоимости процесса производства СПГ можно добиться за счет уменьшения числа этапов сжижения, либо количества охлаждающего оборудования в рамках производственного цикла. Так, в рамках проекта «Ямал СПГ» процесс охлаждения газа основан на использовании арктического холода. Технология «Арктический каскад», в отличие от классической технологии, предполагает охлаждение газа за счет использования естественных отрицательных температур атмосферы и азота в качестве хладагента. Данная технология является запатентованной адаптацией особой технологии сжижения природного газа, приобретенной компанией «Новатэк» у немецкой компании Linde. Адаптация немецкой технологии учитывает сложные погодные условия в рамках процесса сжижения природного газа.

Процесс производства СПГ на основе технологии «Арктический каскад» в упрощенном виде может быть описан следующим образом:

Первый этап охлаждения осуществляется за счет использования холодного атмосферного воздуха Арктики, в результате чего температура газа снижается до $+10^{\circ}\text{C}$.

Второй этап охлаждения осуществляется за счет использования каскада теплообменников, в которых хладагентами сначала выступает этан, охлаждая газ до -84°C , а затем азот и «отпарной метан», охлаждая газ до -137°C . Затем, после этого происходит сброс давления до 1,5 атм, в результате чего газ охлаждается до -162°C . После прохождения этих этапов конечной сепаратор отделяет жидкий природный газ и направляет его в емкости для хранения.

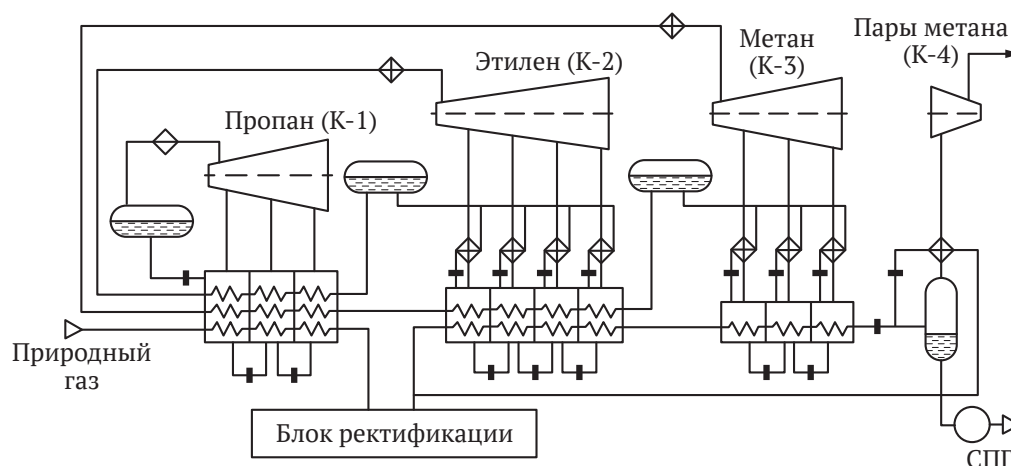


Рис. 6. Классическая схема установки сжижения природного газа с классическим каскадным циклом [20]

Fig. 6. Classic scheme of natural gas liquefaction plant with classic cascade cycle [20]

Применение технологии сжижения природного газа «Арктический каскад» имеет ряд преимуществ по сравнению с классической технологией:

1. На первом этапе в качестве хладагента в нем используется холодный воздух Ямала вместо пропана, что позволяет достичь существенной экономии денежных средств.

2. На втором этапе в качестве хладагента используется этан, который выделяется из природного газа (в классической технологии используется этилен, который не производится на заводе СПГ и поставляется внешними поставщиками).

3. Природный газ, который не удалось перевести в сжиженное состояние, возвращается на вторую часть каскада и используется для охлаждения в последующих циклах в качестве «отпарного метана».

Применение технологии «Арктический каскад» позволяет исключить из процесса пропановый цикл, использование сложных хладагентов, а также закупку этилена, что позволяет снизить расчетные энергетические затраты до 220 кВт/т СПГ (вместо 250–260 кВт/т в традиционных технологиях).

По оценке экспертов, описанные преимущества обеспечивают снижение стоимости сжижения природного газа на 30 % [21]. Экономический эффект от внедрения такой технологии позволяет уменьшить объем инвестиций на этапе капитального строительства, а также увеличить сумму прибыли в результате реализации проекта. Таким образом, климатические условия Арктики являются не только препятствием для реализации таких проектов, но и возможностью для внедрения технологических инноваций.

Заключение

В настоящее время в России осуществляется последовательная работа, направленная на реализацию нефтегазовых проектов, включающая развитие промышленных и инфраструктурных объектов. Несмотря на сырьевую направленность, реализация подобных проектов полностью соответствует государственной линии перехода

на инновационный путь развития. Формирование эффективной транспортно-логистической системы является одним из ключевых факторов успешного функционирования производства в арктических условиях. Кроме того, создание подобных инфраструктурных объектов положительно сказывается на развитии российской промышленности и арктического региона в целом.

Основой проведенного исследования стал анализ процесса развития производства в России сжиженного природного газа, в данном случае включающий действующие на территории Арктики проекты «Ямал СПГ» и «Арктик СПГ 2» и транспортно-логистическую систему этих проектов.

Доказана необходимость обеспечения технологической независимости российских энергетических компаний и локализации производства СПГ путем реализации стратегии импортозамещения. В качестве одного из вариантов решения задачи импортозамещения предложено использовать инновационную технологию производства сжиженного газа «Арктический каскад». Отличительной особенностью технологии «Арктический каскад» является уникальное сочетание различных способов улучшения процессов охлаждения и сжижения природного газа. Несмотря на то, что удельная эффективность каждого из способов сравнительно небольшая, их комплексное сочетание позволяет достичь снижения себестоимости на 30 %. Кроме того, данная инновационная технология потенциально способна обеспечить 100%-ную локализацию производства всех комплекствующих технологических линий в России.

Российские компании обладают уникальными компетенциями не только в вопросах реализации промышленных проектов в Арктике, но и в вопросах транспортировки СПГ в суровых ледовых условиях. Подобным опытом больше не располагает ни одна страна в мире. Следует продолжать наращивать преимущество в данном аспекте, увеличивать технологическую независимость и локализацию производства (в том числе, посредством активного привлечения предприятий малого и среднего бизнеса).

Список литературы

1. Щеголькова А.А., Ульченко М.В. Воспроизводство запасов природного газа в Российской Арктике: экономический аспект. *Известия Санкт-Петербургского государственного экономического университета*. 2018;(5):113–120.

2. Фадеев А.М., Череповицын А.Е., Ларишкин Ф.Д. Стратегическое управление нефтегазовым комплексом в Арктике: монография. Апа-

титы: Кольский научный центр РАН; 2019. 289 с. <https://doi.org/10.25702/KSC.978.5.91137.407.5>

3. Statistical Review of World Energy 2020. British Petroleum. URL: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2020-full-report.pdf> (дата обращения: 06.02.2022).

4. Shell LNG Outlook 2020. С. 32. URL: <https://www.shell.com/energy-and-innovation/natural-gas/liquefied-natural-gas-lng/lng-outlook-2020.html#iframe=L3dlYmFwcHMvTE5HX291dGxvb2sv> (дата обращения: 06.02.2022).

5. Глобальные тенденции освоения энергетических ресурсов российской Арктики. В 2-х ч. Ч. 1. Тенденции экономического развития российской Арктики: монография / под ред. С.А. Агаркова и др. Апатиты: Кольский научный центр РАН; 2019. 170 с. <https://doi.org/10.25702/KSC.978.5.91137.397.9-16>

6. Баранов А.Ю., Тихонов К.А., Андреев А.М., Березин Н.А. Энергоэффективные циклы сжижения природного газа. *Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Холодильная техника и кондиционирование»*. 2016;(1):1–8. <https://doi.org/10.17586/2310-1148-2016-9-1-8>

7. Правительство России. Юрий Трутнев провёл совещание о ходе экспериментального рейса по Северному морскому пути. Новости. 16 февраля 2021 г. URL: <http://government.ru/news/41556/> (дата обращения: 06.02.2022).

8. Никитин В.Р. Северный морской путь как альтернатива Суэцкому каналу. В сб.: *Логистика и управление ценами поставок*. СПб.: Санкт-Петербургский государственный экономический университет; 2019:140–144.

9. «Совкомфлот» назвал сроки начала круглогодичной навигации по Севморпути. 07 июня 2021 г. URL: <https://www.vedomosti.ru/economics/news/2021/06/07/873250-sovkomflot-nazval-sroki-nachala-kruglogodichnoi-navigatsii-po-sevmorputi> (дата обращения: 06.02.2022).

10. Ларичкин Ф.Д., Пономаренко Т.В., Фадеев А.М. Транспортно-логистический фактор в обеспечении конкурентоспособности минерально-сырьевого комплекса Арктической зоны. *Север и рынок: формирование экономического порядка*. 2014;(3):29–32.

11. Обзор мирового рынка СПГ. Газпром Экспо. URL: <http://www.gazpromexpo.ru/projects/inform/sgp> (дата обращения: 06.02.2022).

12. Ульянов М.В. Анализ тенденций рынка СПГ и перспектив реализации российских арктических СПГ-проектов. *Север и рынок: формирование экономического порядка*. 2021;(1):82–97. <https://doi.org/10.37614/2220-802X.1.2021.71.007>

13. Татаренко В.И., Робинсон Б.В., Ляпина О.П., Усикова О.В. Российские СПГ-проекты: история, современность, перспективы. *Интерэкспо Гео-Сибирь*. 2018;1(3):61–74.

14. Стеблянская А.Н., Ванг Джен., Разманова С.В. Арктический СПГ России: новые тренды и возможности. *Ресурсы Европейского Севера. Технологии и экономика освоения*. 2018;(1):11–18.

15. Новак А. Окно возможностей для России. *Нефтегазовая вертикаль*. 2018;(1):20–26.

16. Важенина Л.В., Шаншаева Э.А. Четвертая линия завода «Ямал-СПГ» стала технологическим экспериментом «Новатэка». В сб.: *New science generation. Матер. II Междунар. науч.-практ. конф.* Петрозаводск, 25 декабря 2019 г. Петрозаводск: Международный центр научного партнерства «Новая Наука»; 2019:104–107.

17. Фадеев А.М., Череповицын А.Е., Ларичкин Ф.Д. Актуальные вопросы подготовки современных специалистов для освоения шельфа Арктики. В *мире научных открытий*. 2011;(3-1):446–454.

18. Фадеев А.М. Обеспечение производства в Арктике: стратегический взгляд. *Стратегирование: теория и практика*. 2021;1(1):15–27. <https://doi.org/10.21603/2782-2435-2021-1-1-15-27>

19. Рыбакова М. Сжижать по-русски. Коммерсантъ. 25 октября 2018 г. URL: <https://www.kommersant.ru/doc/3770589> (дата обращения: 06.02.2022).

20. Крупные установки по сжижению природного газа. Энергетика. ТЭС и АЭС. [Б.г.; Б.д.]. URL: <https://tesiaes.ru/?p=7963> (дата обращения: 06.02.2022).

21. Марцинкевич Б. Арктический каскад как технология. *Геоэнергетика.ру*. 8 ноября 2018 г. URL: <https://geoenergetics.ru/2018/11/08/arkticheskij-kaskad-kak-texnologiya/> (дата обращения: 06.02.2022).

References

1. Shchegol'kova A.A., Ul'chenko M.V. Reproduction of natural gas reserves in the Russian Arctic: economic aspect. *Izvestiâ Sankt-Peterburgskogo Gosudarstvennogo Ekonomičeskogo Universiteta*. 2018;(5):113–120. (In Russ.)

2. Fadeev A.M., Cherepovitsyn A.E., Larichkin F.D. Strategic management of the oil and gas complex in the Arctic. Apatity: Kola Sci. Center RAS; 2019. 289 p. (In Russ.). <https://doi.org/10.25702/KSC.978.5.91137.407.5>

3. Statistical Review of World Energy 2020. British Petroleum. URL: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2020-full-report.pdf> (accessed on 06.02.2022).

4. Shell LNG Outlook 2020. URL: <https://www.shell.com/energy-and-innovation/natural-gas/liquefied-natural-gas-lng/lng-outlook-2020.html#iframe=L3dlYmFwcHMvTE5HX291dGxvb2sv> (accessed on 06.02.2022).

5. Agarkov S.A., etc., eds. Global trends in the development of energy resources of the Russian Arctic. In 2 pt. Pt. 1. Trends in the economic development of the Russian Arctic. Apatity: Kola Sci. Center RAS; 2019. 170 p. (In Russ.). <https://doi.org/10.25702/KSC.978.5.91137.397.9-1>

6. Baranov A.Yu., Tihonov K.A., Andreev A.M., Berезин N.A. Energy efficient technologies of natural gas liquefaction. *Scientific Journal NRU ITMO. Series "Refrigeration*

and Air Conditioning". 2016;(1):1–8. (In Russ.). <https://doi.org/10.17586/2310-1148-2016-9-1-8>

7. Yuri Trutnev held a meeting on the progress of the experimental voyage along the Northern Sea Route. Website of the Russian Government. News. February 16, 2021. (In Russ.) URL: <http://government.ru/news/41556/> (accessed on 06.02.2022).

8. Nikitin V.R. The Northern Sea Route as an alternative to the Suez Canal. In: *Logistics and supply chain management*. St. Petersburg: St. Petersburg St. Econ. Univ.; 2019:140–144. (In Russ.)

9. "Sovcomflot" announced the dates for the start of year-round navigation along the Northern Sea Route. June 7, 2021. (In Russ.) URL: <https://www.vedomosti.ru/economics/news/2021/06/07/873250-sovcomflot-nazval-sroki-nachala-kruglogodichnoi-navigatsii-po-sevmorputi> (accessed on 06.02.2022).

10. Larichkin F.D., Ponomarenko T.V., Fadeev A.M. Transport and logistics factor in ensuring the competitiveness of the mineral resource complex of the Arctic zone. *Sever i Rynok: Formirovanie Ekonomicheskogo Poryadka*. 2014;(32):9–32. (In Russ.)

11. Overview of the World LNG market. Gazprom Expo (In Russ.). URL: <http://www.gazpromexpo.ru/projects/inform/sgp> (accessed on 06.02.2022).

12. Ulchenko M.V. Analysis of LNG market trends and prospects for the implementation of Russian Arctic LNG projects. *Sever i Rynok: Formirovanie Ekonomicheskogo Poryadka*. 2021;(1):82–97. (In Russ.). <https://doi.org/10.37614/2220-802X.1.2021.71.007>

13. Tatarenko V.I., Robinson B.V., Lyapina O.P., Usikova O.V. Russian LNG projects: history, moderni-

ty, prospects. *Interekspo Geo-Sibir*. 2018;1(3):61–74. (In Russ.)

14. Steblyanskaya A.N., Wang Z., Razmanova S.V. Russian arctic LNG: new trends and opportunities. *Resursy Evropeiskogo Severa. Tekhnologii i Ekonomika Osvoeniya*. 2018;(1):11–18. (In Russ.)

15. Novak A. Window of opportunity for Russia. *Neftegazovaya vertikal*. 2018;(1):20–26. (In Russ.)

16. Vazhenina L.V., Shanshaeva E.A. The fourth line of the Yamal-LNG plant became a technological experiment of Novatek. In: *New science generation. Proc. II Inter. Sci. Pract. Conf.* Petrozavodsk, December 25, 2019. Petrozavodsk: MTNP «Novaya Nauka»; 2019:104–107. (In Russ.)

17. Fadeev A., Cherepovitsyn A., Larichkin F. Actual questions of modern specialists' preparation for Arctic shelf development. *V mire nauchnykh otkrytiy*. 2011;(3-1):446–454. (In Russ.)

18. Fadeev A.M. Production support in the Arctic: a strategic approach. *Strategizing: Theory and Practice*. 2021;1(1):15–27. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2782-2435-2021-1-1-15-27>

19. Rybakova M. Liquefy in Russian. *Kommersant*. October 25, 2018. (In Russ.). URL: <https://www.kommersant.ru/doc/3770589> (accessed on 06.02.2022).

20. Large natural gas liquefaction plants. *Energetika. TES i AES*. [NY, ND]. (In Russ.). URL: <https://tesiaes.ru/?p=7963> (accessed on 06.02.2022).

21. Martsinkevich B. Arctic cascade as a technology. *Geoenergetika.ru*. November 8, 2018. (In Russ.). URL: <https://geoenergetika.ru/2018/11/08/arkticheskij-kaskad-kak-texnologiya/> (accessed on 06.02.2022).

Информация об авторах

Спиридонов Андрей Алексеевич – магистрант, Санкт-Петербургский государственный университет, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., д. 7-9, Российская Федерация; e-mail: ispbandrei@gmail.com

Фадеева Марина Алексеевна – аспирант, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», 119049, Москва, Ленинский просп., д. 4, стр. 1, Российская Федерация; e-mail: FadeevaML01@gmail.com

Толстых Татьяна Олеговна – д-р экон. наук, профессор, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», 119049, Москва, Ленинский просп., д. 4, стр. 1, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7164-7181>; e-mail: tt400@mail.ru

Information about authors

Andrey A. Spiridonov – Master Student, St. Petersburg University, 7-9 Universitetskaya Emb., Saint Petersburg 199034, Russian Federation; e-mail: ispbandrei@gmail.com

Marina L. Fadeeva – Postgraduate Student, National University of Science and Technology MISIS, 4-1 Leninskiy Ave., Moscow 119049, Russian Federation; e-mail: FadeevaML01@gmail.com

Tatiana O. Tolstych – Dr.Sci. (Econ.), National University of Science and Technology MISIS, 4-1 Leninskiy Ave., Moscow 119049, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7164-7181>; e-mail: tt400@mail.ru

Поступила в редакцию 21.03.2022; поступила после доработки 10.05.2022; принята к публикации 30.05.2022

Received 21.03.2022; Revised 10.05.2022; Accepted 30.05.2022