УДК 533.2:665.632.078

Анализ специфики организации проектов малотоннажного производства СПГ

П.С.ЦВЕТКОВ¹, С.В.ФЕДОСЕЕВ²¹ Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия² Институт экономических проблем им. Г.П.Лузина, Кольский научный центр РАН, Апатиты, Россия

Как цитировать эту статью: Цветков П.С. Анализ специфики организации проектов малотоннажного производства СПГ / П.С.Цветков, С.В.Федосеев // Записки Горного института. 2020. Т. 246. С. 678-686. DOI: 10.31897/PMI.2020.6.10

Аннотация. Газовая промышленность играет значимую роль в мировой энергетике и в ближайшие десятилетия объемы производства природного газа будут только расти. Одним из наиболее динамично развивающихся направлений газовой промышленности является производство сжиженного природного газа (СПГ), что связано с необходимостью организации гибких систем газоснабжения регионов, удаленных от мест добычи газа. В отраслевой структуре производства СПГ выделяют проекты нескольких групп тоннажности, в частности, малотоннажное производство (МСПГ), совокупная производственная мощность которого составляет порядка 10 % от общеотраслевой. Экономические аспекты реализации подобных проектов изучены слабо, что не позволяет сделать объективные выводы о перспективах их реализации в конкретных регионах.

В данной работе проведен обзор публикаций, посвященных изучению проектов МСПГ, для определения специфики их организации в сравнении с проектами большей тоннажности. Результаты показали, что большинство международных компаний относят к МСПГ проекты с годовой производственной мощностью менее 0,5 млн т в год. Удельные капитальные затраты, как и сроки реализации таких проектов, в несколько раз ниже, чем у проектов с большей производственной мощностью, что снижает их риски и минимизирует барьеры входа на рынок. Также МСПГ является наиболее децентрализованной подотраслью газовой промышленности, нацеленной на охват рынка за счет увеличения количества проектов, а не их удельной производственной мощности. Эти особенности определяют значительные перспективы развития МСПГ на территории России, как в части энергоснабжения отдаленных регионов, так и при диверсификации экспортных поставок.

Ключевые слова: СПГ; малотоннажное производство; газораспределение; транспортировка природного газа; рынки природного газа; газификация регионов

Благодарность. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда, проект № 19-78-00036 «Моделирование экономических эффектов от развития малотоннажного производства сжиженного природного газа».

Введение. На сегодняшний день существует множество альтернативных сценариев развития энергетической отрасли, как в отдельных странах, так и во всем мире [19, 25]. Практически во всех сценариях доля природного газа в мировом энергетическом балансе должна увеличиться [26], что связано с его экологическими и стоимостными характеристиками [34, 44], а также наличием существенного объема запасов в различных регионах мира (табл.1), прирост которых за последние 10 лет составил 0,2 млрд м³ (с 1,7 до 1,9 млрд м³).

Таблица 1

Географическое распределение доказанных запасов топливно-энергетических ресурсов на конец 2018 г. [13]

Ресурс	Северная Америка	Южная и Центральная Америка	Европа	Страны СНГ	Средний Восток и Африка	Азиатско-Тихоокеанский регион	Всего
Нефть, млрд т	35,4	51,1	1,9	19,6	129,8	6,3	244,1
Природный газ, млрд м ³	13,9	8,2	3,9	62,8	89,9	18,1	196,9
Уголь, млрд т	258	14	134,6	188,6	14,4	444,9	1 054,8

Одной из наиболее динамично развивающихся отраслей газовой промышленности является производство сжиженного природного газа (СПГ) (рис.1). Это объясняется гибкостью логистических схем [21], которые могут быть построены на его основе, и, в частности, возможностью доставки в пункты потребления, удаленные от регионов добычи [38, 50].

Рис. 1. Динамика производства природного газа и поставок СПГ [11-13]

За 28 лет объемы производства газа выросли в два раза (с 2026,8 млрд м³ в 1991 г. до 3867,9 млрд м³ в 2018 г.). Наибольшие темпы роста приходятся на страны Среднего Востока (658,3 %), Африки (329,1 %) и Азиатско-Тихоокеанского региона (385,4 %). Вместе с тем, среднегодовой темп роста отрасли СПГ (23,68 %) значительно выше темпа роста объемов производства природного газа в целом (6,8 %), что связано с активным расширением географии поставок СПГ в период 2001-2018 гг. [37].

В отраслевой структуре СПГ в ходе масштабного развития производства стали выделять сегменты в соответствии с объемами производственных мощностей подобных проектов: мало- (М), средне- (С) и крупнотоннажный (К). Несмотря на то, что они имеют общие принципы функционирования, технологии [41, 42], методы и цели организации подобных производств различны [5, 48]. При этом степень изученности экономических аспектов функционирования проектов разного масштаба существенно различается.

Постановка проблемы. В мировой литературе существует значительное количество публикаций, посвященных изучению отрасли СПГ [33]. Однако, как показал анализ базы sciencedirect.com, только малая часть этих работ нацелена на изучение МСПГ. Поиск релевантных статей осуществлялся по двум полям: «Title, abstract or author-specified keywords» для термина «LNG» и «Find articles with these terms» для «small scale LNG». Использование различных полей обусловлено наличием термина «LNG» в значительном количестве публикаций (более 30 тыс.), посвященных, среди прочего, общим вопросам энергетики (при поиске по полю «Find articles with these terms»).

Анализ показал, что отрасли СПГ посвящено более 2800 работ, из которых на долю МСПГ приходится только 133 публикации (рис.2). Одной из причин недостаточного внимания к таким проектам со стороны научного сообщества, политики и общественности являются их малые производственные мощности, из-за которых они просто не заметны на фоне крупнотоннажных проектов [27]. Однако их растущая значимость очевидна, свидетельством чего является стремительный рост публикаций в этой области в 2014-2019 гг. (85 % от общего количества публикаций).

Усиление внимания к МСПГ связано, преимущественно, с растущей необходимостью в организации гибких и децентрализованных систем энергоснабжения [43], которые необходимы, в частности, для освоения удаленных территорий (например, регионов Арктики) [14, 31], не имеющих доступа к магистральному газопроводу. Существенную роль сыграли вопросы экологии, например, общая тенденция к снижению углеродоемкости топлива для транспортных средств [22], в том числе ужесточение требований к содержанию серы в судовом топливе [28, 51].

Несмотря на рост количества публикаций в последние пять лет, можно утверждать, что значительное количество проблем развития отрасли МСПГ еще не нашли своего решения [15]. Это справедливо и для проблем экономического характера, так как большинство существующих научных работ относятся к области технических наук [24] и не рассматривают особенности организации подобных проектов. Основной целью данной работы является анализ специфики организации производственно-логистических цепочек (ПЛЦ) МСПГ, на долю которых по оценкам компании Linde [39] приходится порядка 10 % мирового производства СПГ.

Рис.2. Распределение научных работ, посвященных МСПГ, по годам (а), типам (б) и источникам (в)

Методология. В статье показаны результаты анализа организационных особенностей проектов МСПГ. Анализ проводился в несколько этапов:

1. Один из первостепенных вопросов при анализе ПЛЦ МСПГ – определение предельного объема их производственной мощности, именно этот фактор определяет специфику организации подобных проектов, а также степень освещенности в мировой литературе. Отсутствует единый подход к определению границ производственных мощностей проектов СПГ для отнесения их к группе тоннажности, в мировой литературе встречаются такие термины, как «Small-to-Mid Scale» и «Mid-to-Large Scale», которые вносят дополнительную неопределенность. Проведен сравнительный анализ позиций ученых и международных компаний по этому вопросу для возможности четкого определения объема производственной мощности МСПГ проектов.

2. На основе анализа аналитических работ, обзоров международных компаний и научных статей определены границы и состав промежуточных этапов ПЛЦ для каждой группы тоннажности проектов СПГ. Авторы придерживались позиции, что начальной точкой таких цепочек является доставка природного газа на завод по сжижению, а окончанием – либо процесс регазификации, либо использование нерегазифицированного СПГ конечным потребителем. Теоретически допустима ситуация, когда СПГ проходит регазификацию, а через некоторое время повторно газифицируется, рассматривается как совокупность нескольких логистических цепочек.

3. В мировой литературе практически отсутствует статистическая информация об экономических характеристиках проектов МСПГ. В рамках данной работы было проведено обобщение и сравнение имеющихся в открытом доступе данных по стоимости конечной продукции, получаемой при реализации проектов МСПГ, в качестве которой выступает электрическая энергия или энергия, выраженная в британских термальных единицах.

Также дана краткая характеристика наиболее развитых рынков МСПГ, основных направлений его использования и перспектив роста рынков сбыта продукции, что позволило сделать выводы о актуальности и перспективах развития подобных проектов на территории России.

Результаты и обсуждение. *Определение производственной мощности проектов МСПГ.* В настоящее время отсутствует какая-либо общепринятая градация производственных мощностей, однако, можно выделить несколько позиций крупных международных компаний (табл.2).

Перечень диапазонов, представленных в табл.2, может не быть исчерпывающим, однако включает позиции крупнейших международных компаний, деятельность которых непосредственно связана с отраслью СПГ.

Таблица 2

Подходы к определению диапазона производственной мощности МСПГ

Организация	Диапазон производственной мощности МСПГ, млн т в год
International Gas Union [29] Asia-Pacific Economic Cooperation [49] Chiyoda corporation [16] DataFusion Associates [46] Merlin Advisors [15]	Не более 1
TGE Gas Engineering [53] Linde [39] Газпром Экспорт [40]	Не более 0,5
Petrochina Natural Gas Marketing [56]	0,1-0,5
World Bank Group [41] Energy Resources Group [7] ГОСТ Р 55892-2013* GEA engineering [20]	Менее 0,2 – микро СПГ; 0,2-1,0 – МСПГ 0,02-0,7 0,08-0,085 (менее 10 т/ч) 0,01-0,3

* ГОСТ Р 55892-2013. Объекты малотоннажного производства и потребления сжиженного природного газа. Общие технические требования. М.: Стандартиформ, 2019.

При поверхностном рассмотрении наиболее распространенной позицией оказывается производственная мощность до 1 млн т СПГ в год. Однако следует учитывать, что некоторая часть организаций при обосновании этого диапазона мощности МСПГ ориентируется на позицию Международного газового союза.

Второй диапазон, который встречается наиболее часто, – мощность до 0,5 млн т СПГ в год – базируется на опыте крупных международных компаний по реализации (изучению) проектов МСПГ. Остальные подходы встречались не более одного раза, а обоснования их выделения в указанных источниках не были найдены. В связи с этим, учитывая значительную вариацию производственной мощности в различных источниках, в данной работе под МСПГ будет пониматься вариант, основанный на опыте компаний, реализующих подобные проекты, – производственная мощность менее 0,5 млн т СПГ в год.

Специфика производственно-логистических цепочек МСПГ. Несмотря на то, что М-, С- и КСПГ являются частями одной отрасли, они имеют различные организационные принципы. В целом, ПЛЦ СПГ позиционируются как способ децентрализации трубопроводных систем газоснабжения. Однако их детальное рассмотрение позволяет сделать вывод, что К- и ССПГ являются централизованными системами доставки газа, так как предполагают концентрацию производственных мощностей по сжижению и регазификации в одной локации (рис.3) [20]. Подобные проекты нацелены на расширение производственной мощности для получения дополнительного финансового эффекта от масштаба производства.

Ключевой особенностью проектов МСПГ является их децентрализованный характер, выраженный в наращивании количества производственных объектов, а не удельной производственной мощности. Гибкость проектов МСПГ выражается в возможности использования различных способов транспортировки и ориентации на специфические потребности потребителей в регионе реализации проекта [28]. При этом проекты МСПГ могут также включать мобильные установки по регазификации, что позволяет использовать их при реализации краткосрочных удаленных проектов.

При реализации проектов МСПГ с учетом региональной специфики существенным и практически неизученным в мировой литературе вопросом является определение способов организации эффективного взаимодействия между стейкхолдерами, которое позволит снизить риски, а также затраты на реализацию [55]. Подходы, разработанные для проектов С- и КСПГ, не могут быть использованы из-за различий в составе стейкхолдеров.

Рис.3. ЛЛЦ проектов СПГ с различной производственной мощностью

Затраты на реализацию проектов МСПГ. Одним из основных драйверов развития любых проектов энергетического сектора является их способность производить конкурентоспособную по цене продукцию [36]. В мировой литературе подобные оценки для проектов МСПГ единичны [54]. В табл.3 показан обзор научных и практических работ, в которых проводилась оценка затрат на реализацию проектов МСПГ.

Из табл.3 видно, что стоимость 1 кВт·ч электроэнергии, произведенной из МСПГ, может составлять от 0,02 до 0,26 USD. Учитывая, что стоимость электроэнергии в России варьируется от 0,015 USD/кВт·ч (в Иркутской обл.) до 0,124 USD/кВт·ч (в Чукотском АО и Камчатском крае), с максимальным количеством значений в промежутке от 0,04 до 0,07 USD/кВт·ч, реализация проектов МСПГ для организации децентрализованного энергоснабжения может оказаться экономически эффективной для ряда регионов. Срок реализации подобных проектов составляет, как правило, менее трех лет, при использовании установок по утилизации холода срок окупаемости может возрасти до 4,24-5,85 лет [6]. С другой стороны, проекты С- и КСПГ требуют не менее пяти лет для достижения срока окупаемости.

В документе Всемирного банка [41] отмечается, что расчеты усредненных значений затрат на подобные проекты на основе производственной мощности завода, либо иных технологических параметров, являются приближенными из-за существенных различий в применяемых технологиях сжижения, стоимость которых может составлять порядка 40 % от общих удельных затрат [35]. Подобные оценки усложняет отсутствие статистической информации по проектам с мощностью менее 0,5 млн т СПГ в год. Стоимость проектов МСПГ, которые являются частью мирового газового рынка, существенно зависит от значительного количества макроэкономических и политических факторов [4, 47], в частности, непосредственное влияние оказывает текущая стоимость нефти [47] и других энергетических ресурсов.

Основные направления использования МСПГ. Сегодня наиболее развитые сети МСПГ находятся в США и Китае. По состоянию на 2015 г. в США функционировали 68 малотоннажных заводов СПГ мощностью 20-470 т/день (всего – 7,75 млн т/день), нацеленных на покрытие пиковых нагрузок электропотребления [41]. Более 50 таких заводов были запущены еще до 2000 г., самый первый появился в 1940-х годах мощностью 0,002 млн т в год [5]. Новые малотоннажные заводы,

запущенные в последние десятилетия, помимо покрытия пиковых нагрузок, нацелены на поставку СПГ на автозаправочные станции для реализации в виде моторного топлива. Мощность таких заводов составляет не менее 440 тыс. т СПГ в год.

Таблица 3

Обзор научно-практических работ по оценке затрат на реализацию проектов МСПГ

Источник	Сводная информация о затратах на производство энергии
Концептуальная модель оптимизации ПЛЦ за счет применения МСПГ для доставки конечному потребителю [46]	10-12 USD/млн БТЕ*
Оценка затрат на производство электроэнергии из МСПГ разной мощности: 77/154/428 тыс.т в год [45]	49/60-66/78 USD/млн БТЕ (166/203-225/264 USD/МВт·ч)
Оценка экономического эффекта от использования МСПГ вместо нефтепродуктов для производства электричества, 4 тыс.т в год [49]	53 USD/млн БТЕ (180 USD/МВт·ч)
Моделирование затрат на СПГ при организации «голубого коридора» в Бразилии (0,71-0,91 млн т в год) [17]	6,69-12,24 USD/млн БТЕ
Моделирование стоимости производства электричества в Финляндии из малотоннажного СПГ с комбинированным транспортом (суда и трейлеры) [32]	8,8-24 евро/млн БТЕ (30-82 евро/МВт·ч) в зависимости от дальности транспортировки и стоимости природного газа
Пример расчета затрат на производство 1 млн БТЕ энергии из МСПГ для условий Карибских островов (в ценах 2015 г.): 50/100/500 тыс. т в год [15]	Стоимость природного газа – 3,45/3,45/3,45 USD/млн БТЕ Сжижение – 3,5/3,5/3,5 USD/млн БТЕ Транспортировка (морская и наземная) – 4,8/4,2/2,5 USD/млн БТЕ Регазификация – 1,2/0,85/0,5 USD/млн БТЕ Затраты электростанции – 0,3/0,25/0,2 USD/млн БТЕ Итого: 13,25/12,25/10,15 USD/млн БТЕ
В ценах 2015 г. [41]: Наземная транспортировка 50 тыс.т в год 15 тыс.т в год	Дальность 0-250 миль – 6,16 USD/ млн БТЕ Дальность 750-1000 миль – 9,66 USD/ млн БТЕ Дальность 0-250 миль – 8,12 USD/ млн БТЕ Дальность 750-1000 миль – 11,62 USD/ млн БТЕ
Морская транспортировка 50 тыс.т в год 15 тыс.т в год	Дальность 55-150 морских миль (мм) – 6,84 USD/ млн БТЕ Дальность 550-850 мм – 7,84 USD/ млн БТЕ Дальность 55-150 мм – 9,05 USD/ млн БТЕ Дальность 550-850 мм – 10,05 USD/ млн БТЕ

* Британская термальная единица (БТЕ) = 27,05 м³ природного газа = 293 кВт·ч электроэнергии.

В Китае функционирует порядка 120 МСПГ заводов с суммарной годовой мощностью 16 млн т, при этом, на разных этапах планирования и строительства находятся заводы с суммарной мощностью 19,2 млн т [41]. Учитывая обширную территорию страны, дальность транспортировки при доставке с помощью трейлеров может достигать 3,5 тыс. км. В качестве основных направлений использования СПГ в Китае можно обозначить производство энергии в удаленных регионах, а также использование в качестве бункеровочного и моторного топлива. Согласно [56], удельные капитальные затраты на 1 т мощности МСПГ завода в Китае составляет 240-500 USD, что является сравнительно низким показателем (в России порядка 1000 USD/т [1]). Средние операционные затраты составляют менее 1,5 USD/млн БТЕ, что также является сравнительно низким значением.

Таким образом, в настоящее время выделяются три ключевых направления использования МСПГ: энергогенерация, в частности, покрытие потребности в дополнительных энергоресурсах во время пиков электропотребления; моторное топливо; топливо для бункеровки судов. Совокупное потребление СПГ в энергетике, а также в качестве бункеровочного и моторного топлива составит порядка 112,7 млрд т нефтяного эквивалента к 2030 г. (со ссылкой на «IHIS Market Energy outlook 2040») [2]. Спрос на МСПГ для аналогичных целей к 2030 г. может составить более 90 млн т в год [9]. В целом рост потребления МСПГ в ближайшем десятилетии может составить около 6 % в год [30].

Закключение. МСПГ является сравнительно новой отраслью и частично обособленным сегментом газовой промышленности, который имеет свою специфику организации производства, ключевых игроков на рынке и растущую роль в удовлетворении энергетических потребностей населения. Роль МСПГ в мировой энергетической отрасли является крайне недооцененной и недостаточно изученной. Только в 2018 г. из малотоннажных СПГ терминалов было отгружено более 17,68 млн т на трейлерах и не менее 1,5 млн т на малых морских судах [8], а к 2030 г. совокупная мощность МСПГ может составить более 100 млн т в год [49].

Преимущества МСПГ по сравнению с более крупными проектами заключаются в меньших сроке реализации и удельных капитальных затратах, что снижает риски их реализации, а также минимизирует барьеры входа на рынок и является положительным фактором для развития конкуренции. Кроме того, МСПГ является в значительной степени более децентрализованной подотраслью производства СПГ, чем С- и КСПГ, в связи с чем реализация подобных проектов может являться одним из факторов повышения энергетической безопасности регионов [3, 8].

Для России развитие МСПГ связано с возможностью организации системы децентрализованного газоснабжения удаленных регионов, не имеющих доступ к экологически чистым энергетическим ресурсам. Также существенные перспективы имеются в области использования СПГ как моторного и бункеровочного топлива, рынки которых активно развиваются в последнее десятилетие. Уже сегодня крупнейшие российские газовые компании имеют обширные планы на создание газораспределительных сетей на основе МСПГ [18].

Кроме того, географическое расположение России является ее стратегическим преимуществом при реализации проектов МСПГ для диверсификации экспорта сырья, позволяющих создать гибкую систему поставок, не связанную с длительными и капиталоемкими процессами строительства газопровода [23]. Например, существуют определенные перспективы экспортных поставок в европейские страны с учетом обширных планов по строительству «голубых коридоров» на их территории. Строительство малотоннажных СПГ мощностей может представлять интерес в рамках реализации проекта «Сила Сибири», так как на территории Китая определенная часть природного газа будет распределяться в виде СПГ, в том числе малотоннажного. Однако обоснование таких вариантов требует проведения комплексной и разносторонней оценки потенциальных эффектов от реализации подобных проектов [37].

ЛИТЕРАТУРА

1. Климентьев А. Возможности и перспективы развития малотоннажного СПГ в России / А.Климентьев, Т.Митронова, А.Собко. Энергетический центр Московской школы управления СКОЛКОВО, 2018. URL: https://energy.skolkovo.ru/downloads/documents/SEneC/Research/SKOLKOVO_EneC_2018.07.23.pdf (дата обращения 20.10.2019).
2. Конопляник А.А. Малотоннажный СПГ: новые возможности для российского газа в Европе / А.А.Конопляник, А.А.Сергаева // Газовая промышленность. 2019. Т. 787. № 7. С. 42-54.
3. Уланов В.Л. Влияние внешних факторов на национальную энергетическую безопасность / В.Л.Уланов, Е.Ю.Уланова // Записки Горного института. 2019. Т. 238. С. 474-480. DOI: 10.31897/PMI.2019.4.474
4. Экономические перспективы развития производства сжиженного природного газа / А.Е.Череповицын, Ф.Д.Ларичкин, А.Г.Воробьев, И.Азим // Горный журнал. 2018. № 2. С. 59-64. DOI: 10.17580/gzh.2018.02.09
5. Adotti C. Small Scale Whole Sale LNG // 26th World Gas Conference, 1-5 June 2015, Paris, France. URL: <http://members.igu.org/old/IGU%20Events/wgc/wgc-2015/committee-reports-with-thematic-sessions/thematic-sessions/ts-pgc-d-3-challenges-and-opportunities-of-small-scale-lng/c-adotti-ts-pgc-d-3-final-presentation.pdf> (дата обращения 19.01.2020).
6. A micro cogeneration system with LNG cold utilization-part 1: energetic, economic and environmental analyses / B.B.Kanbur, L.Xiang, S.Dubey, F.H.Choo, F.Duan // Energy Procedia. 2017. Vol. 105. P. 1902-1909. DOI: 10.1016/J.EGYPRO.2017.03.558
7. Barclay M. Mini-to-Medium Scale LNG – A Profitable & Environmentally Sustainable Solution for Flared or Stranded Gas // Presentation at Flaring Reduction and Gas Utilization Forum, 2015. URL: <https://slideplayer.com/slide/4194572/> (дата обращения 19.01.2020).
8. Birol F. Global Gas Security Review // IEA, 2019. URL: <https://www.iea.org/reports/global-gas-security-review-2019> (дата обращения 20.10.2019)
9. Biscardini G. Small going big. Why small-scale LNG may be the next big wave / G.Biscardini, R.Schmill, A.Del Maestro // LNG Industry. 2018. URL: <https://www.lngindustry.com/small-scale-lng/22082018/small-going-big-why-small-scale-lng-might-be-the-next-big-wave/> (дата обращения 20.10.2019).
10. BNEF. Global LNG Outlook 2017. London, UK, 2017. URL: https://globalnghub.com/wp-content/uploads/attach_451.pdf (дата обращения 20.10.2019).
11. BP: Statistical Review of World Energy – 2002 edition. URL: <https://griequity.com/resources/industryandissues/Energy/bp2002statisticalreview.pdf> (дата обращения 19.01.2020).

12. BP: Statistical Review of World Energy – 2008 edition. URL: http://eleceng.dit.ie/kgaughan/notes/DT015%20Energy%20Supply/Student%20Links/BP_Statistical_Review_of_World_Energy_June_2008_Slide_Transcript.pdf (дата обращения 19.01.2020).
13. BP: Statistical Review of World Energy – 2019 edition. URL: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2019-full-report.pdf> (дата обращения 19.01.2020).
14. Carayannis E. Russian Arctic Offshore Oil and Gas Projects: Methodological Framework for Evaluating Their Prospects / E.Carayannis, A.Ilinova, A.Chanysheva // Journal of the Knowledge Economy. 2019. P. 1-27. DOI: 10.1007/s13132-019-00602-7
15. Chambers R. Small-Scale LNG Supply Chains. Confronting the Diseconomies of Small-Scale LNG // Report at World Gas Conference, 2015, Paris, France. URL: <https://gie.eu/index.php/gie-publications/presentations/> (дата обращения 20.10.2019).
16. Chiyoda Corporation: Official website. URL: <https://www.chiyodacorp.com/en/service/lng/mid-small-scale-lng/> (дата обращения 20.10.2019).
17. Costs and emissions assessment of a Blue Corridor in a Brazilian reality: The use of liquefied natural gas in the transport sector / D.Mouette, P.G.Machado, D.Fraga, D.Peyerl, R.R.Borges, T.L.F.Brito, E.M.dos Santos // Science of The Total Environment. 2019. Vol. 668. P. 1104-1116. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.02.255
18. Evseeva O.O. An approach to assessment of sustainability of the large-scale Russian liquefied natural gas project / O.O.Evseeva, A.E.Cherepovitsyn // Topical Issues of Rational Use of Natural Resources. 2019. Vol. 2. P. 608-614.
19. Global energy perspective 2019: Reference Case. McKinsey & Company, January 2019. URL: https://www.mckinsey.com/~media/McKinsey/Industries/Oil%20and%20Gas/Our%20Insights/Global%20Energy%20Perspective%202019/McKinsey-Energy-Insights-Global-Energy-Perspective-2019_Reference-Case-Summary.aspx (дата обращения 19.01.2020).
20. GEA Engineering: Official website. URL: <https://www.gea.com/en/solutions/small-scale-lng-solutions.jsp> (дата обращения 20.10.2019).
21. Global Gas & LNG outlook to 2035-2019 edition. URL: <https://www.mckinsey.com/industries/oil-and-gas/our-insights/global-gas-and-lng-outlook-to-2035> (дата обращения 19.01.2020).
22. Hagos D.A. Well-to-wheel assessment of natural gas vehicles and their fuel supply infrastructures–Perspectives on gas in transport in Denmark / D.A.Hagos, E.O.Ahlgren // Transportation Research Part D: Transport and Environment. 2018. Vol. 65. P. 14-35. DOI: 10.1016/j.trd.2018.07.018
23. Henderson J. Global LNG Outlook. The Oxford Institute for Energy Studies, 2017. URL: <https://www.imemo.ru/files/File/ru/conf/2017/13042017/13042017-PRZ-HEN.pdf> (дата обращения 20.10.2019).
24. He T. Review on the design and optimization of natural gas liquefaction processes for onshore and offshore applications / T.He, I.A.Karimi, Y.Ju // Chemical Engineering Research and Design. 2018. Vol. 132. P. 89-114. DOI: 10.1016/j.cherd.2018.01.002
25. IEA Gas 2018. Analysis and Forecasts to 2023. Gas Market Report. IEA, 2018. URL: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/c956c307-f104-41f4-9300-f245bece93e/English-Gas-2018-ES.pdf> (дата обращения 19.01.2020).
26. IEE. Outlook 2019: Energy transition and a thorny path for 3E challenges // The 430th Forum on Research Work, 15 October 2018, Tokyo, Japan. URL: <https://eneken.ieej.or.jp/data/8123.pdf> (дата обращения 19.01.2020).
27. IGU. World LNG Report–2013 Edition. International Gas Union. 2013. URL: https://www.igu.org/sites/default/files/node-page-field_file/IGU%20-%20World%20LNG%20Report%20-%202013%20Edition.pdf (дата обращения 19.01.2020)
28. IGU. LNG as Fuel. 2012-2015 Triennium Work Report. International Gas Union. 2015. URL: https://www.igu.org/sites/default/files/node-page-field_file/LNGasFuel.pdf (дата обращения 19.01.2020).
29. IGU. Small Scale LNG. 2012-2015 Triennium Work Report. International Gas Union. 2015. URL: https://www.igu.org/sites/default/files/node-page-field_file/SmallScaleLNG.pdf (дата обращения 19.01.2020).
30. IGU. World LNG Report – 2019 Edition. International Gas Union. 2019. URL: https://www.igu.org/sites/default/files/node-news_item-field_file/IGU%20Annual%20Report%202019_23%20loresfinal.pdf (дата обращения 20.10.2019).
31. Ilinova A. Algorithm for assessing the prospects of offshore oil and gas projects in the Arctic / A.Ilinova, A.Chanysheva // Energy Reports. 2020. Vol. 6. P. 504-509. DOI: 10.1016/j.egyr.2019.11.110
32. Jokinen R. An MILP model for optimization of a small-scale LNG supply chain along a coastline / R.Jokinen, F.Pettersson, H.Saxén // Applied Energy. 2015. Vol. 138. P. 423-431. DOI: 10.1016/j.apenergy.2014.10.039
33. Khan M.S. Retrospective and future perspective of natural gas liquefaction and optimization technologies contributing to efficient LNG supply: A review / M.S.Khan, I.A.Karimi, D.A.Wood // Journal of Natural Gas Science and Engineering. 2017. Vol. 45. P. 165-188. DOI: 10.1016/j.jngse.2017.04.035
34. Kramer M. The Role of Natural Gas in the Energy Transition // Report at 27th World Gas Conference, 2019, Washington, USA. URL: <https://www.igu.org/sites/default/files/6%20-%20WFES%20Decarbonisation%20160117%20Marcel%20Kramer.pdf> (дата обращения 19.01.2020).
35. Lim W. Current Status and Perspectives of Liquefied Natural Gas (LNG) Plant Design / W.Lim, K.Choi, I.Moon // Industrial & Engineering Chemistry Research. 2013. Vol. 52. Iss. 9. P. 3065-3088. DOI: 10.1021/ie302877g
36. Litvinenko V.S. Innovations as a Factor in the Development of the Natural Resources Sector / V.S.Litvinenko, I.B.Sergeev // Studies on Russian Economic Development. 2019. Vol. 30. Iss. 6. P. 637-645. DOI: 10.1134/S107570071906011X
37. Litvinenko V. The Role of Hydrocarbons in the Global Energy Agenda: The Focus on Liquefied Natural Gas // Resources. 2020. Vol. 9. Iss. 5. № 59. DOI: 10.3390/resources9050059
38. LNG Market Trends and Their Implications // Technology report. IEA, 2019. URL: <https://www.iea.org/reports/lng-market-trends-and-their-implications> (дата обращения 19.01.2020).
39. LNG Technology: Optimised solutions for small to world-scale plants // Linde Group, 2018. URL: http://www.linde-engineering.ru/ru/images/LNG-technology-small-to-world-scale-plants-2019_tcm480-4577.pdf (дата обращения 19.01.2020).
40. Maynitskiy I. The Evolution of Small-Scale LNG Markets: The View from Gazprom Export // Small Scale LNG Forum, 22-23 October 2012, Istanbul, Turkey. URL: http://www.gazpromexport.com/files/22_10_2012_-_Evolution_of_Small-Scale_LNG117.pdf (дата обращения 19.01.2020).
41. Mini and Micro LNG for Commercialization of Small Volumes of Associated Gas // Tractebel Engineering, 2015. URL: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/25919> (дата обращения 19.01.2020).
42. On-site LNG production at filling stations / M.A.Ancona, M.Bianchi, L.Branchini, A.De Pascale, F.Melino, M.Mormile, M.Palella // Applied Thermal Engineering. 2018. Vol. 137. P. 142-153. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2018.03.079

43. Pedraza J.M. Current Status and Perspective in the Use of Natural Gas for Electricity Generation in the North America Region // *Conventional Energy in North America*. 2019. P. 155-209. DOI: 10.1016/B978-0-12-814889-1.00003-6
44. Powell J.B. Natural Gas Utilization: Current Status and Opportunities // *Catalysis Today*, 2019. DOI: 10.1016/j.cattod.2019.10.024
45. Punnonen K. Small and Medium size LNG for Power Production. Vaasa: Wärtsilä Finland Oy, 2013. URL: <https://www.wartsila.com/docs/default-source/oil-gas-documents/white-paper-o-ogi-2013-lng-power-production.pdf> (дата обращения 20.10.2019).
46. Regan T. Small scale LNG: Emerging technologies for small scale grids // Presentation to ESI Thinktank Roundtable, 27 October 2017, Singapore. URL: <https://esi.nus.edu.sg/docs/default-source/doc/small-scale-lng---esi-roundtable.pdf?sfvrsn=2> (дата обращения 19.01.2020).
47. Sharples J. LNG supply chains and the development of LNG as a shipping fuel in Northern Europe. Oxford Institute for Energy Studies, 2019. 60 p. DOI: 10.26889/9781784671266
48. Steuer C. Outlook for competitive LNG supply. Oxford Institute for Energy Studies, 2019. 44 p. DOI: 10.26889/9781784671310
49. Small-scale LNG in Asia-Pacific // APEC Energy Group, 2019. URL: https://www.apec.org/-/media/APEC/Publications/2019/9/Small-scale-LNG-in-Asia-Pacific/219_EWG_Small-scale-LNG-in-Asia-Pacific.pdf (дата обращения 19.01.2020).
50. Tsvetkov P. Economic assessment of heat and power generation from small-scale liquefied natural gas in Russia / P.Tsvetkov, A.Cherepovitsyn, A.Makhovikov // *Energy Reports*. 2020. Vol. 6. P. 391-402. DOI: 10.1016/j.egyr.2019.11.093
51. The Electrification of Ships Using the Northern Sea Route: An Approach / C.Savard, A.Nikulina, C.Méchemmène, E.Mokhova // *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*. 2020. Vol. 6. Iss. 1. P. 13. DOI: 10.3390/joitmc6010013
52. The LNG Industry GIIGNL Annual Report 2019 // GIIGNL, 2019. URL: https://giignl.org/sites/default/files/PUBLIC_AREA/Publications/giignl_annual_report_2019-compressed.pdf (дата обращения 20.10.2019).
53. TGE Gas Engineering: Official website. URL: <https://www.tge-gas.com> (дата обращения 20.10.2019).
54. Voronov V.A. Energy-efficient small-scale liquefied natural gas production technology for gas distribution stations / V.A.Voronov, A.Y.Ruzmanov // *Topical Issues of Rational Use of Natural Resources*. 2019. Vol. 2. P. 901-906.
55. Wittermans F. Small Scale LNG Needs Cooperation in the Value Chain // Report at World Gas Conference. Paris, France, 2015. URL: <https://gie.eu/index.php/gie-publications/presentations/> (дата обращения 20.10.2019).
56. Wei L. A Look at the Development Trend of Liquefaction Technology from China's LNG Plants // Report at International Business Congress, 29 January 2019, Duisburg, Germany. URL: <https://www.international-bc-online.org/wp-content/uploads/2019/02/8.-CNPC-ENG-1.pdf> (дата обращения 19.01.2020).

Авторы: П.С.Цветков, канд. экон. наук, доцент, Tsvetkov_PS@pers.spmi.ru (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия), С.В.Федосеев, д-р экон. наук, директор (Институт экономических проблем им. Г.П.Лузина, Кольский научный центр РАН, Апатиты, Россия).

Статья поступила в редакцию 21.10.2019.

Статья принята к публикации 22.01.2020.