



Моделирование функционирования и развития глобального рынка СПГ

Ольга Васильевна Сенина¹, Татьяна Витальевна Кириченко²✉,
Алексей Алексеевич Комзолов³, Елена Александровна Костюк⁴

^{1, 2, 3, 4} Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) им. И.М. Губкина, Москва, Россия

✉ kirichenko.t@gubkin.ru

Аннотация. Сжиженный природный газ (СПГ) становится все более важным элементом глобальной энергетической системы. В условиях растущей зависимости от энергоресурсов, изменения климата и необходимости перехода на более экологически чистые источники энергии рынок СПГ демонстрирует значительный рост и трансформацию. Статья посвящена рассмотрению модели прогнозирования глобальных поставок сжиженного природного газа, ее формированию, экономическому и математическому содержанию. Разработанная модель прогнозирования глобальных поставок сжиженного природного газа впервые детально учитывает текущее состояние и перспективы развития танкерного флота при моделировании транспортировки СПГ. Указанная модель позволяет проводить расчет распределения мировых потоков СПГ от заводов по сжижению природного газа до приемочных регазификационных терминалов.

Такой расчет выполняется на основании критерия минимума затрат на производство СПГ, транспортировку и регазификацию при максимально возможном удовлетворении спроса. В модели учитываются мощности всех действующих и перспективных мировых заводов по производству СПГ и приемочных терминалов. Оптимизация осуществляется с учетом заключенных контрактов на поставки СПГ, существующих и перспективных мощностей мирового танкерного флота, а также фрахтовых контрактов. Предусмотрено задание различных сценариев спроса и цен на СПГ на мировых рынках сбыта. Использование построенной экономико-математической модели способно обеспечить получение российским производителем конкурентных преимуществ на рынке СПГ за счет более точного прогнозирования рынка СПГ.

Ключевые слова: сжиженный природный газ, СПГ, структура данных, модель, танкерный флот, производство СПГ, потребление СПГ, поставки СПГ

Для цитирования: Сенина О.В., Кириченко Т.В., Комзолов А.А., Костюк Е.А. Моделирование функционирования и развития глобального рынка СПГ // Экономические системы. 2025. Том 18, № 1. С. 193–207. DOI 10.29030/2309-2076-2025-18-1-193-207.

Original article

Modelling the operation and development of the global LNG market

**Olga V. Senina¹, Tatiana V. Kirichenko²✉,
Alexey A. Komzolov³, Elena A. Kostyuk⁴**

^{1, 2, 3, 4} National University of Oil and Gas «Gubkin University», Moscow, Russia

✉ kirichenko.t@gubkin.ru

Abstract. Liquefied natural gas (LNG) is becoming an increasingly important element of the global energy system. In the context of growing dependence on energy resources, climate change and the need to switch to more environmentally friendly energy sources, the LNG market demonstrates significant growth and transformation. The article is also devoted to the consideration of the model for forecasting global supplies of liquefied natural gas, its formation, economic and mathematical content. The developed model for forecasting global supplies of liquefied natural gas, for the first time takes into account in detail the current state and prospects for the development of the tanker fleet when modeling LNG transportation. The developed model allows calculating the distribution of global LNG flows from natural gas liquefaction plants to receiving regasification terminals.

The calculation is based on the criterion of minimum costs for LNG production, transportation and regasification with the maximum possible satisfaction of demand. The model takes into account the capacities of all existing and prospective global LNG plants and receiving terminals. Optimization is carried out taking into account the concluded contracts for LNG supplies, existing and prospective capacities of the world tanker fleet, as well as freight contracts. It is envisaged to specify various scenarios of demand and prices for LNG in world sales markets. The use of the constructed economic and mathematical model can provide Russian producers with competitive advantages in the LNG market, due to more accurate forecasting of the LNG market.

Keywords: liquefied natural gas, LNG, data structure, model, tanker fleet, LNG production, LNG consumption, LNG supply

For citation: Senina O.V., Kirichenko T.V., Komzolov A.A., Kostyuk E.A. Modelling the operation and development of the global LNG market. *Economic Systems*. 2025;18(1):193-207. (In Russ.). DOI 10.29030/2309-2076-2025-18-1-193-207.

Введение

Сжиженный природный газ (СПГ) – это природный газ, охлажденный до жидкого состояния при температуре до -260° по Фаренгейту. Этот процесс уменьшает объем газа в 600 раз, что упрощает его транспортировку и хранение. СПГ в основном состоит из метана, не имеет запаха, цвета и не вызывает коррозии.

Он используется в качестве топлива для производства электроэнергии, отопления и транспорта, сырья для производства химикатов и удобрений [1].

В последние годы СПГ набирает все большую популярность на мировом рынке углеводородов и выступает как конкурентоспособная альтернатива традиционным видам топлива, таким как нефть, уголь и пропан. В этом контексте ниже представлены ключевые преимущества использования СПГ:

1. *Низкие выбросы.* По сравнению с другими видами ископаемого топлива СПГ производит меньше выбросов и считается более экологически чистым топливом. При сгорании выделяется на 30% меньше углекислого газа, на 90% меньше диоксида серы и на 55% меньше оксида азота, чем при сжигании нефти [2].

2. *Рентабельность.* СПГ экономически эффективен по сравнению с другими видами топлива благодаря его изобилию и технологическим достижениям в производственном процессе. Кроме того, СПГ не подвержен такой же волатильности цен, как сырая нефть, что делает его более стабильным и предсказуемым источником топлива.

3. *Энергоэффективность.* СПГ имеет более высокое содержание энергии, чем традиционные виды топлива, что означает, что он дает больше энергии на единицу объема. Эта повышенная плотность энергии делает его более эффективным вариантом топлива, позволяя достигать большей производительности при использовании меньшего количества топлива.

4. *Универсальность.* СПГ можно использовать в самых разных областях – от транспортировки до производства электроэнергии, что делает его универсальным топливом. Транспортные средства и суда, работающие на СПГ, становятся все более популярными благодаря более низким выбросам и экономии средств.

5. *Надежность поставок.* СПГ можно производить и хранить в больших количествах, что делает его надежным и безопасным источником энергии. Эта надежность поставок особенно важна в регионах, где традиционные источники топлива недоступны.

6. *Снижение затрат на инфраструктуру.* СПГ можно транспортировать по трубопроводу или морю на специализированных судах, что обеспечивает более гибкие и экономичные варианты транспортировки.

Таким образом, указанные конкурентные преимущества делают СПГ привлекательной альтернативой традиционным видам топлива. Поскольку спрос на более экологически чистые виды топлива продолжает расти, СПГ будет играть все более важную роль в удовлетворении мировых потребностей в энергоресурсах.

Развитие сектора СПГ играет критически важную роль в экономической безопасности России, выходя далеко за рамки простого увеличения экспортных доходов [3]. Его влияние многогранно и затрагивает фундаментальные аспекты экономической безопасности и геополитического положения страны [4].

Диверсификация рынков сбыта – это, бесспорно, ключевой фактор. Традиционная зависимость от трубопроводного газа, проходящего преимущественно через европейские страны, создавала уязвимость перед политическими и экономическими потрясениями. СПГ, напротив, открывает доступ к значительно

более широкому кругу потребителей в Азии, Латинской Америке и Африке, снижая риски, связанные с монополизацией рынков и санкционным давлением.

Более того, развитие СПГ способствует не только диверсификации, но и модернизации российской экономики. Строительство новых заводов по сжижению газа, создание специализированной инфраструктуры (терминалы, транспортные суда) и развитие смежных отраслей (например, машиностроение, криогенные технологии) стимулируют инвестиции, создают новые рабочие места и способствуют технологическому прогрессу. Это особенно важно в контексте диверсификации экономики, отхода от сырьевой модели и перехода к инновационному развитию [5].

Однако развитие СПГ-сектора сопряжено с серьезными вызовами. Инвестиции в новые проекты огромны и требуют привлечения как государственных, так и частных средств. Введение Западом санкций в отношении России в ответ на ее действия на Украине оказало негативное влияние на российскую отрасль СПГ [6].

Для решения этой проблемы необходимо организовать комплексное взаимодействие государственных и частных энергетических и высокотехнологичных производителей оборудования, обеспечить локализацию крупно- и среднетоннажного оборудования для отрасли СПГ, принять меры по снижению административных барьеров, увеличить субсидирование НИОКР в сфере СПГ со стороны государства. Помимо этого, возможно формирование крупнотоннажных производств из малотоннажных модулей, так как Россия уже обладает технологиями, позволяющими выпускать малотоннажные линии по сжижению газа [7].

Кроме того, существуют экологические аспекты, связанные с выбросами парниковых газов в технологических процессах. На международной арене развитие сектора СПГ укрепляет позиции России как надежного и конкурентоспособного поставщика энергоресурсов. Однако с учетом растущей глобальной конкуренции со стороны таких производителей, как Катар, Австралия и США, необходимо постоянно совершенствовать технологические процессы, снижать издержки производства и предлагать гибкие и выгодные контрактные условия для покупателей [8].

Геополитическая ситуация также играет значительную роль: санкции и политическая напряженность могут влиять на инвестиционный климат и доступ к международным рынкам капитала. Поэтому успешное развитие СПГ-сектора зависит от эффективной государственной поддержки, привлечения иностранных инвестиций и умелого маневрирования в условиях постоянно меняющейся глобальной энергетической политики. В конечном итоге успех в этой области станет важным фактором обеспечения устойчивого экономического роста и укрепления геополитических позиций России на долгие годы.

Выделим особенности СПГ, определяющие его специфическую роль в экономике и обеспечении экономической безопасности:

1. *Гибкость поставок.* Одной из ключевых особенностей СПГ является гибкость поставок. Возможность транспортировки газа морем позволяет России адаптироваться к изменениям на мировом рынке и быстро реагировать на

изменения спроса со стороны потребителей. Это создает условия для укрепления позиций России как надежного поставщика энергоресурсов.

2. *Диверсификация рынков.* Развитие сектора СПГ позволяет России выходить на новые рынки, такие как страны Юго-Восточной Азии, где наблюдается растущий спрос на чистые источники энергии. Такой шаг будет иметь решающее значение для экономического роста России, поскольку снизит ее зависимость от рынка ЕС и обеспечит более стабильный источник доходов [9].

3. *Энергетическая безопасность.* СПГ играет важную роль в обеспечении энергетической безопасности России, позволяя стране сохранять свои позиции на мировом энергетическом рынке даже в условиях внешнего давления и санкций. Диверсификация экспортных маршрутов и увеличение доли СПГ в общем объеме экспорта газа способствует укреплению энергетической независимости страны.

4. *Технологические преимущества.* Развитие технологий СПГ, включая создание более эффективных и экономичных заводов по сжижению, а также оптимизацию судов-газовозов, предоставляет России конкурентное преимущество. Россия обладает значительными запасами природного газа, а современные технологии СПГ позволяют нашей стране максимально эффективно использовать этот ресурс, получать максимальную прибыль и укреплять свою позицию на мировом рынке.

СПГ – не просто еще один инструмент экспорта, а стратегический актив, обеспечивающий экономическую безопасность России, а также гибкость, диверсификацию и устойчивость к внешнему давлению на фоне геополитических изменений и растущего мирового спроса на энергоресурсы. Инвестиции в развитие СПГ-инфраструктуры и технологий, а также диверсификация рынков сбыта являются ключевыми элементами долгосрочной стратегии укрепления энергетической и экономической независимости России.

Основная часть

Для достижения конкурентных преимуществ на рынке СПГ необходимо разработать обоснованный прогноз спроса и цен на нем, чтобы определить объемы производства и оптимальное место размещения завода СПГ. Для этой цели целесообразны формирование и использование соответствующей экономикоматематической модели. При ее выборе сначала был проведен сравнительный анализ моделей по следующим параметрам: временной горизонт планирования, временной интервал, тип оптимизации, критерий работы, программная реализация, географическая детализация, детализация расчетного графа и учет контрактов при моделировании.

По результатам анализа моделей можно сделать следующие выводы:

1. Все рассмотренные модели предназначены для долгосрочного планирования. Горизонт прогнозирования составляет от 20 лет и более.

2. Каждая из моделей учитывает, в частности, заводы по сжижению, регазификационные терминалы и маршруты транспортировки сжиженного природного газа (СПГ).

3. Некоторые модели взаимосвязаны с моделями энергетических рынков и являются составными частями более сложных моделей.

4. Большинство моделей используют расчетную сеть в виде графа, при этом детализация графа (количество дуг и узлов) порой существенно отличается.

5. В большинстве моделей при решении задачи применяются методы линейной оптимизации, методы нелинейной оптимизации и итерационный поиск решения. В качестве критериев оптимизации используются минимизация суммарных затрат на удовлетворение спроса и максимизация дохода каждого участника рынка.

Контракты на поставку трубопроводного газа и СПГ учитываются в ряде рассмотренных моделей, но не во всех. Обобщая полученные результаты, нами была построена собственная модель прогнозирования глобального рынка СПГ. Можно сделать заключение, что базовые предпосылки, принятые при разработке собственной модели прогнозирования глобальных поставок СПГ, соответствуют общемировой практике.

Рассмотрим основное отличие разработанной модели прогнозирования глобальных поставок СПГ от рассмотренных моделей, являющееся ее научной новизной.

Как показал проведенный анализ мирового опыта в данном направлении, моделирование перспективных поставок СПГ необходимо осуществлять в рамках прогнозирования мирового рынка газа в целом. Это обусловлено в первую очередь тем, что СПГ – лишь один из способов транспортировки природного газа, при этом спрос на природный газ удовлетворяется как трубопроводными поставками природного газа, так и СПГ. Таким образом, представляется целесообразным рассматривать газовый рынок в совокупности.

Для целей прогнозирования рынка СПГ авторами была разработана и внедрена модель прогнозирования, сформированная на использовании широкого круга данных. В соответствии с особенностями производственно-экономического цикла индустрии СПГ [10] в модели выделяются следующие группы данных, в рамках которых формируются исходные данные для моделирования и расчетные показатели:

- блок данных производства;
- блок данных потребления;
- блок данных транспорта;
- блок данных поставок.

Данные производства содержат информацию о мировом производстве сжиженного природного газа. Заводы по производству СПГ в соответствии с территориальной принадлежностью разным государствам группируются по странам – производителям СПГ, которые, в свою очередь, в зависимости от их географического положения группируются по регионам производства. В модели рассматриваются как существующие заводы, так и проекты заводов, находящиеся на разных стадиях реализации. В соответствии с этим заводы подразделяются на существующие, строящиеся и планируемые. Для каждого существующего завода по сжижению газа задается динамика возможных мощностей производства СПГ

для заданного числа расчетных периодов. Для перспективных заводов задаются возможные сроки ввода и планируемые проектные мощности. Для всех типов заводов задаются удельные затраты на производство сжиженного природного газа. Соответственно, к исходным данным производства относятся:

1) региональная структура производителей СПГ;

2) исходные данные об объектах производства СПГ, в том числе:

– наименование завода по сжижению;

– принадлежность завода стране и региону;

– географическое расположение;

– проектная мощность существующих и перспективных заводов по сжижению за каждый расчетный период;

– удельные затраты на производство СПГ.

Удельные затраты на производство СПГ включают в себя:

• затраты на добычу и транспорт природного газа, в том числе:

– себестоимость газа на месторождении;

– затраты на транспортировку газа до завода СПГ;

• операционные затраты на производство СПГ (*short-term costs*), в том числе:

– стоимость рабочей силы и услуг;

– затраты на сжижение газа;

– затраты на транспортировку СПГ с завода на танкер;

– затраты на хранение СПГ;

• капитальные вложения (*long-term costs*) на производство СПГ, в том числе:

– обустройство территории, создание инфраструктуры и строительство завода, включая продуктопровод, хранилища СПГ, причал для танкеров и отгрузочные терминалы;

– затраты на покупку, установку и наладку оборудования для переработки и сжижения.

При проведении оптимизационных расчетов мощности заводов по сжижению газа служат ограничениями на объемы суммарных поставок СПГ с данного завода, а удельные затраты на производство СПГ учитываются в критерии оптимизации.

В результате проведения расчетов определяются оптимальные объемы производства СПГ для всех мировых заводов, что определяет оптимальные объемы производства для действующих заводов, а также состав и сроки ввода перспективных заводов. На основании этих данных формируется прогнозная региональная структура производства СПГ с детализацией по странам. Также рассчитывается загрузка заводов по сжижению в процентах от проектной мощности.

Данные потребления содержат информацию, относящуюся к мировому потреблению сжиженного природного газа [11]. Приемочные регазификационные терминалы СПГ, аналогично заводам, группируются по странам – потребителям СПГ, которые, в свою очередь, объединяются в рынки. Предусмотрена возможность задания различных сценариев спроса на СПГ в детализации по странам – потребителям СПГ и проведения расчетов для выбранного сценария. В модели рассматриваются действующие приемочные терминалы, а также проекты

перспективных терминалов. Для существующих терминалов задаются мощности регазификации в динамике для заданного числа расчетных периодов. Для перспективных терминалов указываются возможные сроки ввода и планируемые проектные мощности. Для всех типов терминалов задаются удельные затраты на регазификацию СПГ. Таким образом, к данным потребления относятся:

- структура рынков СПГ;
- мировой спрос на СПГ в динамике с детализацией по рынкам и странам – потребителям СПГ;
- цена на СПГ на мировых рынках;
- исходные данные об объектах регазификации СПГ, в том числе:
 - наименование приемочного терминала;
 - принадлежность терминала стране и региону;
 - географическое расположение (местоположение терминала на карте мира);
 - проектная мощность за каждый расчетный период существующих регазификационных терминалов;
 - предполагаемые мощности перспективных терминалов;
 - предполагаемые сроки ввода перспективных терминалов;
 - удельные затраты на регазификацию СПГ.

При проведении оптимизационных расчетов мощности регазификационных терминалов служат ограничениями на объемы поставок СПГ на данный терминал, спрос на СПГ страны-потребителя ограничивает объемы поставок СПГ в данную страну (т. е. суммарные поставки СПГ в данную страну ограничиваются одновременно спросом и суммарной мощностью регазификационных терминалов страны). Удельные затраты на регазификацию СПГ учитываются в величине критерия оптимизации. Цена на СПГ на мировых рынках не учитывается при проведении оптимизационных расчетов, а используется при реализации дополнительных возможностей модели.

В результате проведения оптимизационных расчетов [12] рассчитываются оптимальные перспективные объемы регазификации СПГ для всех мировых терминалов. На основании этих данных также рассчитывается структура потребления СПГ по рынкам с детализацией по странам и определяется процент загрузки терминалов от номинальной мощности.

В блок данных транспорта входит информация о морской транспортировке сжиженного природного газа, осуществляемой с помощью специальных танкеров-метановозов [13]. В модели танкеры мирового танкерного флота (находящиеся в данный момент в эксплуатации и сооружаемые) подразделяются на несколько основных типов, характеризующихся средней скоростью, вместимостью и соответствующими затратами на транспортировку.

Маршрут транспортировки – кратчайший морской маршрут от завода по сжижению до приемочного терминала. Поток СПГ по маршруту в модели определяется количеством рейсов танкеров различных типов, совершаемых по данному маршруту за расчетный период [14]. Число рейсов, которые необходимо сделать для транспортировки заданного объема СПГ, зависит от мощности танкера.

Количество требуемых рейсов для этого танкеров определяется протяженностью маршрута и их скоростью. При этом совокупное количество рейсов, совершаемых танкерами по всем маршрутам за расчетный период, ограничено возможностями мирового танкерного флота в соответствующем периоде.

Полный перечень данных транспорта включает в себя:

- данные о маршрутах транспортировки, в том числе:
 - географическое расположение;
 - протяженность;
 - прохождение/непрохождение через платные каналы;
- данные о мировом флоте, в том числе:
 - количество танкеров-метановозов;
 - срок эксплуатации существующих танкеров;
 - прогноз ввода новых мощностей;
 - мощности танкеров;
 - скорость танкеров;
 - заключенные фрахтовые контракты;
 - удельные затраты на транспортировку.

Удельные затраты на транспортировку СПГ включают в себя:

- амортизационные затраты;
- операционные затраты (оплату экипажа, морскую страховку, ремонт и обслуживание танкера, затраты на запасы, оборудование и ГСМ, расходы на управление);
- рейсовые затраты, в том числе затраты на топливо и портовые сборы.

В случае если рассматривается аренда танкера, вместо амортизационных и операционных затрат используется ставка чартера.

При проведении оптимизационных расчетов количество танкеров (а также срок их эксплуатации и прогноз ввода в эксплуатацию новых транспортных мощностей) служит ограничением на суммарные объемы поставок СПГ. Остальные исходные данные содержатся в составляющей критерия, соответствующей совокупным затратам на транспортировку сжиженного природного газа.

В результате проведения расчетов определяются: количество рейсов танкеров каждого типа по каждому маршруту транспортировки, число танкеров, необходимых для транспортировки рассчитанных объемов сжиженного природного газа с каждого завода по сжижению. Также рассчитываются затраты на транспортировку СПГ от каждого завода до каждого приемочного терминала при заданных параметрах транспортировки.

Данные, относящиеся к поставкам, представляют собой сведения о заключенных контрактах на поставки СПГ и включают в себя следующую информацию:

- страна – производитель СПГ;
- наименование завода по производству СПГ;
- объем поставок;
- период начала поставок;
- продолжительность контракта;

- рынок сбыта;
- страна-потребитель;
- наименование приемочного терминала;
- тип танкеров, осуществляющих транспортировку.

Данные о контрактах могут быть разной степени детализации. Максимальная степень детализации соответствует полному перечню информации. При отсутствии части информации ограничения на поставку задаются менее жестко. Например, в контракте могут быть указаны только завод по производству СПГ и объем поставок. Это будет означать, что на данном заводе обязательно будет производиться и отгружаться количество СПГ, указанное в контракте.

При проведении оптимизационных расчетов [15] данные о контрактах служат нижними ограничениями на поставки СПГ.

Основные математические соотношения модели

Задача оптимизации перспективных потоков СПГ решается на временном интервале, состоящем из заданного количества периодов, равных одному году.

Введем необходимые обозначения:

$t = 1, \dots, T$ – период решения задачи;

$\{i\}$ – множество заводов по производству СПГ;

$i = 1, \dots, N$, где N – общее число мировых заводов;

$\{j\}$ – множество приемочных терминалов;

$j = 1, \dots, j_1, \dots, j_k$; k – число стран – приемщиков СПГ, j_k – общее число терминалов;

X_i^t – проектная мощность производства СПГ на i -м заводе в период времени t ;

P_j^t – проектная мощность j -го приемочного терминала в период времени t ;

$m = 1, \dots, M$ – типы танкеров;

V_m – мощность танкера типа m ;

v_m – скорость танкера типа m (в узлах);

l_{ij} – длина маршрута от i -го завода до j -го терминала (в морских милях);

r_{ijm} – число рейсов танкеров типа m , перевозящих СПГ по маршруту ij .

Критерием оптимизации является минимум затрат на добычу, сжижение и транспортировку при максимальном удовлетворении спроса. Рассмотрим составляющие критерия.

Минимум затрат на добычу и сжижение:

$$\min \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{j_k} \sum_{m=1}^M r_{ijm}^t \cdot V_m \cdot Cpr_i, \quad (1)$$

где Cpr_i – удельные затраты на добычу и сжижение природного газа на i -м заводе.

Минимум затрат на транспортировку:

$$\min \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{j_k} \sum_{m=1}^M r_{ijm}^t \cdot Ctr_{ijm}, \quad (2)$$

где Ctr_{ijm} – затраты на транспортировку СПГ танкером типа m по маршруту ij .

$$C_{tr_{ijm}} = t_{ijm}(C_{trO} + C_{trA}) + C_f \cdot (2 \cdot l_{ij} \cdot m_f + t_0 \cdot m_p) + \\ + C_{pr_i} \cdot V_m(1 - (1 - \lambda)^{\frac{l_{ij}}{v_m \cdot 24}}) + C_{pj} + C_{cij}, \quad (3)$$

где C_{trO} – удельные операционные затраты;

C_{trA} – удельные амортизационные затраты;

C_f – стоимость топлива;

m_f – удельные затраты топлива при движении;

m_p – удельные затраты топлива на стоянке;

λ – удельные потери от испарения;

C_{pj} – портовые сборы;

C_{cij} – канальные сборы.

Также следует минимизировать общее количество танкеров, необходимое для осуществления транспортировки.

Пусть t_{ijm} – время в сутках, затрачиваемое танкером типа m для перевозки СПГ по маршруту ij , включая возвращение в порт загрузки и погрузку – разгрузку:

$$t_{ijm} = \frac{2 \cdot l_{ij}}{v_m \cdot 24} + t_0, \quad (4)$$

где t_0 – время погрузки – разгрузки.

Обозначим k_{ijm} максимальное количество рейсов, которые может сделать танкер типа m по маршруту ij за год:

$$k_{ijm} = \frac{365 - t_1}{t_{ijm}}, \quad (5)$$

где t_1 – период времени, за который производится ремонт и техобслуживание газовоза.

Тогда количество танкеров типа m , необходимых для транспортировки СПГ, производимого на i -м заводе, определяется формулой

$$K_{im}^t \geq \frac{\sum_{j=1}^{J_k} r_{ijm}^t}{k_{ijm}}; \quad K_{im} \in Z. \quad (6)$$

Таким образом, значение критерия с учетом условия максимизации удовлетворения спроса определяется формулой

$$\min \left[\begin{aligned} & \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{J_k} \sum_{m=1}^M r_{ijm}^t \cdot V_m \cdot C_{pr_i} + \\ & + \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{J_k} \sum_{m=1}^M r_{ijm}^t \cdot C_{tr_{ijm}} - \\ & - A \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{J_k} \sum_{m=1}^M r_{ijm}^t \cdot V_m + B \times \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N \sum_{m=1}^M K_{im}^t \end{aligned} \right], \quad (7)$$

где A и B – соответствующим образом выбранные коэффициенты.

Ограничения. При решении задачи должны выполняться следующие ограничения:

1. Ограничения на мощности заводов по производству СПГ и приемочных терминалов:

$$\sum_{m=1}^M \sum_{j=1}^{J_k} r_{ijm}^t \cdot V_m \leq X_{it}^t, \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^N r_{ijm}^t \cdot V_m (1 - \lambda_m)^{\frac{l_{ij}}{v_m^{24}}} \leq P_j^t, \quad (9)$$

где λ_m – коэффициент испарения СПГ танкера типа m .

2. Ограничения по спросу:

$$\sum_{m=1}^M \sum_{j=l_{l-1}+1}^{j_l} \sum_{i=1}^N r_{ijm}^t \cdot V_m \leq d_l^t, \quad (10)$$

где $l = 1, \dots, k$; $d_l(t)$ – спрос в l -й стране в период t .

3. Ограничения на танкерный флот:

$$\sum_{i=1}^N K_{im}^t \leq M_m^t, \quad (11)$$

где M_m^t – количество имеющихся во флоте танкеров типа m в период t .

Отдельными ограничениями являются контракты на поставки сжиженного природного газа разной степени детализации, а также фрахтовые контракты.

Контракт с максимальной степенью детализации, когда имеется информация о заводе по сжижению газа, с которого осуществляется поставка ($i = i^*$), регазификационном терминале ($j = j^*$), типе танкера ($m = m^*$), объеме поставок ($V = V^*$) и периоде поставок ($t = t^*$), имеет вид:

$$r_{i^*j^*m^*}^{t^*} \cdot V_m \geq V^*. \quad (12)$$

Аналогичным образом формируются контракты меньшей степени детализации.

Задача решается методом ветвей и границ.

В результате решения оптимизационной задачи определяется число рейсов по каждому маршруту (r_{ijm}^t), на основании которого рассчитываются все остальные производные расчетные показатели.

Заключение

Таким образом, в результате проведения оптимизационных расчетов в разработанной модели рассчитываются оптимальные транспортные потоки от заводов по сжижению до терминалов – рассматривается совокупный поток СПГ от каждого завода с детализацией по рынкам сбыта и далее с детализацией по странам-потребителям и приемочным терминалам.

Наряду с этим определяются поставщики и объемы поставок СПГ для каждой страны потребителя, что позволяет проанализировать, какой производитель и в каком объеме поставляет СПГ в данную страну. Также в результате решения задачи оптимизации рассчитываются оптовые цены методом замыкающих затрат. Для этого используются все перечисленные выше данные.

Список источников

1. Сжиженный природный газ (СПГ), технологии сжижения // Neftegaz.RU. URL: <https://neftgaz.ru/tech-library/energoresursy-toplivo/141460-szhizhenny-prirodnyy-gaz-spg-tehnologii-szhizheniya> (дата обращения: 09.12.2024).

2. Буйлова М.В., Вилаев Р.А. Перспективы применения сжиженного природного газа в качестве топлива грузовым автомобильным транспортом // ТТПС. 2019. № 1 (47). С. 41–47. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivy-primeneniya-szhizhennogo-prirodnogo-gaza-v-kachestve-topliva-gruzovym-avtomobilnym-transportom> (дата обращения: 05.12.2024).

3. Головина М.С. Экономические аспекты региональной энергетической безопасности и экспортная стратегия России на рынке газа стран Европейского союза. URL: <https://www.dissercat.com/content/ekonomicheskie-aspekty-regionalnoi-energeticheskoi-bezopasnosti-i-eksportnaya-strategiya-ros?ysclid=lpzaof9f4n988456196> (дата обращения: 18.12.2024).

4. Гундорова М.А. Экономическая безопасность : учеб. пособие / Владим. гос. ун-т им. А.Г. и Н.Г. Столетовых. Владимир : Изд-во ВлГУ, 2020. URL: http://op.vlsu.ru/fileadmin/Programmy/Specialitet/38.05.01/Ekon-prav_obesp_ekon_bezopas/Metod_doc/uchebnoe_posobie_EHB.pdf (дата обращения: 18.12.2024).

5. Гуцуляк В.А. Разработка предложений по обеспечению экономической безопасности ОАО «Сладонеж». Челябинск : ЮУрГУ, 2020. URL: https://dspace.susu.ru/xmlui/bitstream/handle/0001.74/39290/2020_663_guculyakva.pdf?sequence=1&isAllowed=y (дата обращения: 18.12.2024).

6. Тихонов С. Почему России нужны собственные технологии для производства СПГ // RGRU. 2022. URL: <https://rg.ru/2022/07/12/kurs-na-szhizhenie.html> (дата обращения: 19.12.2024).

7. Собко А. Амбиции без технологий: сможет ли Россия сама строить заводы СПГ // РБК. URL: <https://www.rbc.ru/opinions/economics/12/09/2017/59b7acc29a794752d29d73ea?ysclid=lf1eb2kuk5531353231> (дата обращения: 10.12.2024).

8. Андреев В.В. Возможности и перспективы российского СПГ на мировых рынках. URL: <https://www.imemo.ru/files/File/ru/conf/2022/29042022/2-03-ANDREYANOV-VV.pdf> (дата обращения: 18.12.2024).

9. Мировой рынок газа: отказ ЕС от российского газа и перспективы развития альтернативной энергетики. URL: <https://delprof.ru/press-center/open-analytics/mirovoy-rynok-gaza-otkaz-es-ot-rossiyskogo-gaza-i-perspektivy-razvitiya-alternativnoy-energetiki/?ysclid=lg13dmstcc487825467> (дата обращения: 10.12.2024).

10. Mak J., Nielsen D., Schulte D., Graham C. «LNG Flexibility», Fluor Enterprises // Hydrocarbon Engineering, October. 2003. URL: <https://www.hydrocarbonprocessing.com/magazine/2003/october-2003> (дата обращения: 18.12.2024).

11. Мировая индустрия и рынки сжиженного природного газа: прогнозное моделирование : монография / В.С. Вовк [и др.]. Москва : Газпром экспо, 2009.

12. Гончаров В.А. Методы оптимизации : учеб. пособие. Москва : Юрайт, 2014.

13. Морская транспортировка газа / И.В. Мещерин [и др.]. Москва : ВНИИГАЗ, 2009.

14. Graph Theory. Favorite Conjectures and Open Problems – 2 / R. Gera, S. Hedetniemi, C. Larson (Eds.). Berlin : Springer, 2018. URL: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-97686-0> (дата обращения: 18.12.2024).

15. Рейзлин В.И. Численные методы оптимизации : учеб. пособие. Томск : Изд-во Национального исследовательского Томского политехнического университета, 2013.

References

1. Liquefied natural gas (LNG), liquefaction technologies. Neftegaz.RU. URL: <https://neftegaz.ru/tech-library/energoresursy-toplivo/141460-szhizhennyi-prirodnyy-gaz-spg-tekhnologii-szhizheniya>. (In Russ.).

2. Buylova M.V., Vilaev R.A. Prospects for the use of liquefied natural gas as fuel by truck. *TTPS*. 2019;(1(47)):41-47. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivy-primeneniya-szhizhennogo-prirodnogo-gaza-v-kachestve-topliva-gruzovym-avtomobilnym-transportom>. (In Russ.).
3. Golovina M.S. Economic aspects of regional energy security and Russia's export strategy in the gas market of the European Union. URL: <https://www.dissercat.com/content/ekonomicheskie-aspekty-regionalnoi-energeticheskoi-bezopasnosti-i-eksportnaya-strategiya-ros?ysclid=lpzaof9f4n988456196>. (In Russ.).
4. Gundorova M.A. Economic security : textbook. manual / Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletov. Vladimir : Publishing House of the All-Russian State University, 2020. URL: http://op.vlsu.ru/fileadmin/Programmy/Specialitet/38.05.01/Ekon-prav_obesp_ekon_bezopas/Metod_doc/uchebnoe_posobie_EHB.pdf. (In Russ.).
5. Gutsulyak V.A. Development of proposals to ensure the economic security of JSC Sladonezh. Chelyabinsk : SUSU, 2020. URL: https://dspace.susu.ru/xmlui/bitstream/handle/0001.74/39290/2020_663_guculyakva.pdf?sequence=1&isAllowed=y. (In Russ.).
6. Tikhonov S. Why Russia needs its own technologies for LNG production. RGRU. 2022. URL: <https://rg.ru/2022/07/12/kurs-na-szhizhenie.html>.
7. Sobko A. Ambitions without technology: will Russia be able to build LNG plants on its own? URL: <https://www.rbc.ru/opinions/economics/12/09/2017/59b7acc29a794752d29d73ea?ysclid=lf1eb2kuk5531353231>. (In Russ.).
8. Andreyanov V.V. Opportunities and prospects of Russian LNG on world markets. URL: <https://www.imemo.ru/files/File/ru/conf/2022/29042022/2-03-ANDREYANOV-VV.pdf>. (In Russ.).
9. The global gas market: the EU's rejection of Russian gas and the prospects for the development of alternative energy. URL: <https://delprof.ru/press-center/open-analytics/mirovoy-rynok-gaza-otkaz-es-ot-rossiyskogo-gaza-i-perspektivy-razvitiya-alternativnoy-energetiki/?ysclid=lg13dmstcc487825467>. (In Russ.).
10. Mak J., Nielsen D., Schulte D., Graham C. «LNG Flexibility», Fluor Enterprises. Hydrocarbon Engineering, October. 2003. URL: <https://www.hydrocarbonprocessing.com/magazine/2003/october-2003>.
11. Global industry and markets of liquefied natural gas: predictive modeling: a monograph / V.S. Vovk [et al.]. Moscow : Gazprom Expo, 2009. (In Russ.).
12. Goncharov V.A. Optimization methods : textbook. stipend. Moscow : Yurait, 2014. (In Russ.).
13. Marine gas transportation / I.V. Meshcherin [et al.]. Moscow : VNIIGAZ, 2009. (In Russ.).
14. Graph Theory. Favorite Conjectures and Open Problems – 2 / R. Gera, S. Hedetniemi, C. Larson (Eds.). Berlin : Springer, 2018. URL: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-97686-0>.
15. Reizlin V.I. Numerical optimization methods : textbook. stipend. Tomsk : Publishing House of the National Research Tomsk Polytechnic University, 2013. (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the authors

Ольга Васильевна Сенина – аспирант кафедры безопасности цифровой экономики и управления рисками, Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) им. И.М. Губкина, Москва, Россия, ORCID: 0009-0007-7740-3624, o.senina@gmail.com;

Татьяна Витальевна Кириченко – доктор экономических наук, профессор кафедры безопасности цифровой экономики и управления рисками, Российский государственный

университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) им. И.М. Губкина, Москва, Россия, ORCID: 0000-0002-6408-0228, kirichenko.t@gubkin.ru;

Алексей Алексеевич Комзолов – доктор экономических наук, профессор кафедры безопасности цифровой экономики и управления рисками, Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) им. И.М. Губкина, Москва, Россия, ORCID: 0000-0001-6268-854X, komzolv.a@gubkin.ru;

Елена Александровна Костюк – аналитик, факультет комплексной безопасности топливно-энергетического комплекса, Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) им. И.М. Губкина, Москва, Россия, ORCID: 0009-0008-3338-9151, alena2001kostyk@mail.ru.

Olga V. Senina – graduate of the department of digital economy security and risk management, National University of Oil and Gas «Gubkin University», Moscow, Russia, ORCID: 0009-0007-7740-3624, o.senina@gmail.com;

Tatiana V. Kirichenko – doctor of economic sciences, professor of the department of digital economy security and risk management, National University of Oil and Gas «Gubkin University», Moscow, Russia, ORCID: 0000-0002-6408-0228, kirichenko.t@gubkin.ru;

Alexey A. Komzolv – doctor of economic sciences, professor of the department of digital economy security and risk management, National University of Oil and Gas «Gubkin University», Moscow, Russia, ORCID: 0000-0001-6268-854X, komzolv.a@gubkin.ru;

Elena A. Kostyuk – analyst, faculty of integrated security of fuel and energy complex, National University of Oil and Gas «Gubkin University», Moscow, Russia, ORCID: 0009-0008-3338-9151, alena2001kostyk@mail.ru.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no relevant conflict of interests.

Статья поступила в редакцию 18.01.2025; одобрена после рецензирования 19.02.2025; принята к публикации 25.02.2025.

The article was submitted 18.01.2025; approved after reviewing 19.02.2025; accepted for publication 25.02.2025.