

На правах рукописи

Першин Никита Вячеславович

**АВТОМАТИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ПЕРЕВОЗКАМИ
СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА
МОРСКИМ ТРАНСПОРТОМ**

2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами
и производствами

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва — 2022

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Российский университет транспорта» РУТ (МИИТ)

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Баранов Леонид Аврамович

Официальные оппоненты: **Скороходов Дмитрий Алексеевич**
доктор технических наук, профессор
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
«Институт проблем транспорта им Н.С. Соломенко
Российской академии наук», главный научный сотрудник

Котелева Наталья Ивановна
кандидат технических наук
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет», кафедра «Автоматизации технологических процессов и производств», доцент

Ведущая организация: Акционерное общество «Центральный ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт морского флота», г. Санкт-Петербург

Защита состоится 01 июня 2022 г., в 14.00 на заседании диссертационного совета 40.2.002.02 на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет транспорта» по адресу: 127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9, ауд. 2505.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте РУТ (МИИТ) www.miiit.ru.

Автореферат разослан «___» апреля 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Сидоренко Валентина Геннадьевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Арктическая зона, богатая природным газом, нуждается в создании эффективных транспортно-логистических систем по безопасному, бесперебойному и экономически рациональному вывозу углеводородного сырья. Развитие Северного морского пути как исторически сложившейся национальной единой транспортной коммуникации Российской Федерации в Арктике, а также возрастающая добыча, переработка и транспортировка природного газа в данном регионе требуют создания автоматизированной системы управления, обеспечивающей экономически эффективную и безопасную перевозку сжиженного природного газа (далее – СПГ), что определяет актуальность данного исследования.

Степень разработанности темы. Вопросам создания логистических систем перевозки СПГ, техники и технологии его производства, построения инфраструктурных проектов СПГ посвящены работы АО «Центральный Орден Трудового Красного Знамени научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт морского флота», ФГУП «Крыловский государственный научный центр», ФГАОУ ВО «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И. М. Губкина», ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» и ООО «Газпром ВНИИГАЗ». В этих работах построены логистические схемы перевозки СПГ, определены факторы, влияющие на длительность перевозок в различных погодных условиях, построены графики перевозок СПГ, технологии для его производства и транспортировки, обоснован выбор вида транспорта для перевозки СПГ, проведен анализ экономически обоснованного способа транспортировки СПГ из районов с суровыми климатическими условиями. Эти работы являются фундаментом для создания автоматизированной системы перевозки СПГ морским транспортом, чему посвящена представленная диссертационная работа.

Цель исследования. Разработка принципов построения автоматизированной системы управления перевозками СПГ морским транспортом, обеспечивающей безопасную и экономически эффективную доставку природного газа.

Для выполнения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

- провести анализ существующих методов планирования и управления перевозками СПГ морским транспортом с целью формирования требований к автоматизированной системе управления;
- провести статистические исследования производительности заводов по производству СПГ и определить ее влияние на построение системы управления перевозками СПГ морским транспортом;
- провести статистические исследования динамики изменения потребности потребления СПГ в мировой практике для формирования

направлений развития автоматизированных систем управления перевозками СПГ морским транспортом;

- разработать математические модели, позволяющие анализировать функционирование системы управления движения танкеров-газовозов;
- исследовать динамику функционирования системы управления перевозками СПГ морским транспортом при наличии возмущений;
- провести анализ движения танкеров-газовозов в стесненных водах при различных погодных условиях. Обосновать критерий и выбрать способ управления временами подходов танкеров-газовозов на вход в стесненные воды;
- разработать принципы построения и обосновать структуру, алгоритмы функционирования автоматизированной системы управления перевозками СПГ морским транспортом.

Объект исследования. Процесс транспортировки СПГ морским транспортом.

Предмет исследования. Автоматизированная система управления процессом перевозки СПГ морским транспортом.

Методы исследования. Использованы методы системного анализа, теории управления, теории вероятности, исследования операций и математической статистики, теории оптимизации.

Научная новизна диссертации:

- на основании анализа существующих методов планирования и управления перевозками СПГ морским транспортом показана экономическая целесообразность создания автоматизированной системы управления;
- впервые показана и обоснована на базе обработки статистических данных зависимость производительности завода по производству СПГ от метеорологического фактора;
- необходимость разработки и развития автоматизированных систем управления перевозками СПГ морским транспортом впервые обоснована результатами обработки статистических данных объемов потребления СПГ;
- впервые разработана математическая модель, позволяющая анализировать временные потери при взаимодействии заводов-изготовителей и погрузочных операций танкеров-газовозов;
- для анализа динамики функционирования системы управления перевозками СПГ морским транспортом при наличии возмущений определены вероятности нахождения танкеров-газовозов у завода по производству СПГ в условиях возможности их полной загрузки и отсутствия временных потерь, позволяющие вырабатывать соответствующие управления в автоматизированной системе;
- на основе проведенного анализа движения танкеров-газовозов в стесненных водах, производительности заводов по производству СПГ, стоимости СПГ, ежесуточной фрахтовой ставки танкеров-газовозов поставлена и решена оптимизационная задача выбора времени подхода танкера-газовоза

на вход в стесненные воды, обеспечивающего минимизацию экономических затрат;

- разработаны и обоснованы принципы построения автоматизированной системы управления перевозками СПГ морским транспортом, включающие алгоритмы планирования и способы реализации выполнения графика движения танкеров-газовозов для вывоза СПГ в режиме реального времени за счет поступления оперативной информации от объектов перевозочного процесса.

Теоретическая и практическая значимость работы:

- разработанная математическая модель позволяет определить вероятность нахождения танкера-газовоза в точке загрузки СПГ при различных погодных условиях и вероятность наличия СПГ на заводе по его производству;

- автоматизированная система управления перевозками СПГ морским транспортом позволяет обеспечить бесперебойную и экономически эффективную перевозку природного газа;

- разработанные принципы построения системы, алгоритмы ее функционирования, проведенные исследования являются основой для выбора технических средств, разработки математического и программного обеспечения автоматизированной системы управления перевозками СПГ морским транспортом.

Положения, выносимые на защиту:

- обоснование на базе изучения и исследования существующих методов планирования и управления перевозками СПГ морским транспортом актуальности и экономической целесообразности создания автоматизированной системы управления;

- результаты исследования влияния метеорологического фактора на производительность завода по производству СПГ для построения системы управления перевозками СПГ морским транспортом;

- обоснование эффективной разработки автоматизированной системы управления перевозками СПГ морским транспортом на базе статистического анализа потребности в СПГ, зависимости ценообразования СПГ от внешних факторов;

- результаты разработки математической модели «Танкер-газовоз — Завод по производству сжиженного природного газа», позволяющей определить вероятность наличия (отсутствия) танкера-газовоза у завода по производству СПГ и наличия (отсутствия) необходимого количества СПГ в резервуарах данного завода;

- исследования движения танкера-газовоза в стесненных водах к заводу по производству СПГ, позволяющие выявить факторы, влияющие на оценки вероятности наличия (отсутствия) его у завода по производству СПГ и наличия (отсутствия) необходимого количества СПГ в резервуарах данного завода;

- решение задачи выбора времени подхода танкера-газовоза на вход в стесненные воды по экономическому критерию методом оптимума номинала;

– принципы построения и алгоритмы функционирования автоматизированной системы управления перевозками СПГ морским транспортом.

Степень достоверности полученных результатов подтверждается:

- корректностью использования математического аппарата;
- практической обоснованностью принятых допущений;
- сравнением результатов выбора времени движения танкера-газовоза в стесненных водах с экспериментальными данными реальной эксплуатации;
- результатами обсуждения предложенных принципов создания автоматизированной системы управления перевозками СПГ морским транспортом со специалистами в области управления перевозками и построения автоматизированных систем управления.

Апробация результатов

Результаты работы докладывались и обсуждались на:

- Всероссийской научной конференции «Инновационное развитие технологий производства СПГ» (РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина) (Москва, 2019 г.);

- XI Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы развития нефтегазового комплекса России» (РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина) (Москва, 2016 г.);

- XI Всероссийской конференции молодых ученых, специалистов и студентов «Новые технологии в газовой промышленности» (газ, нефть, энергетика) (РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина) (Москва, 2015 г.);

- Научно-практической конференции «Морское образование: традиции, реалии и перспектива» (ГУМРФ им. ад. С. О. Макарова) (Санкт-Петербург, 2015 г.);

- заседаниях кафедры «Управление и защита информации» Российского университета транспорта (МИИТ) (2019, 2020 гг.).

Тезисы докладов на конференциях опубликованы.

Результаты диссертации внедрены:

1. В производственную деятельность ПАО «Газпром» в рамках реализации СПГ-проектов компаниями Группы «Газпром» в части создания требований к системе автоматизированного управления перевозками сжиженного природного газа морским транспортом и ее структуры.

2. В учебный процесс кафедры разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет».

3. В учебный процесс кафедры оборудования нефтегазопереработки ФГАОУ ВО «Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина».

4. В учебный процесс кафедры морских информационных систем ФГБОУ ВО «Российский государственный гидрометеорологический университет».

Акты внедрения приведены в приложении диссертационной работы.

Объем и структура. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 139 наименований и двух приложений. Материалы диссертации содержат 179 страниц основного текста, 9 страниц приложений, 58 рисунков, 42 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность проблем автоматизации управления морскими перевозками сжиженного природного газа, сформированы цель работы и задачи, требующие решения для выполнения поставленной цели.

В первой главе диссертации проведен анализ современного состояния управления перевозками СПГ в мире и в Российской Федерации. Проанализированы научные работы, посвященные вопросам техники и технологии производства СПГ, стоимости транспортировки СПГ различными видами транспорта, использования отечественной импортозамещающей техники для СПГ-отрасли, выбора технологии сжижения природного газа в зависимости от климатического пояса, конструкции танкеров-газовозов, разработки морских логистических транспортных систем для перевозки СПГ в суровых климатических условиях, построения инфраструктуры СПГ с учетом внешних факторов.

Описаны характеристики и особенности экспорта и импорта СПГ. Проведен анализ ценообразования на СПГ в зависимости от цены на нефть марки *Brent* и цены на газ хаба *Henry Hub* (США).

Основные экспортеры СПГ в общемировом экспорте приведены на рисунке 1. Конъюнктура объемов импорта СПГ значительно не меняется в течение последних лет. Китай является вторым по величине импортером СПГ после Японии (рисунок 2). По прогнозам, пятерка лидеров по импорту СПГ к 2030 г. не изменится, по сравнению с 2018 г.

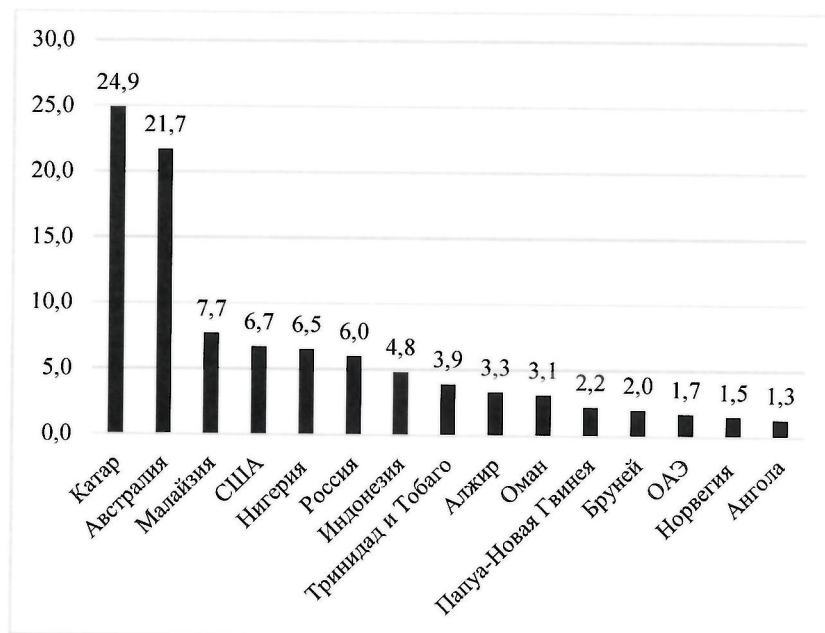


Рисунок 1 – Основные экспортеры СПГ, доля (%) в общемировом экспорте (2018 г.)

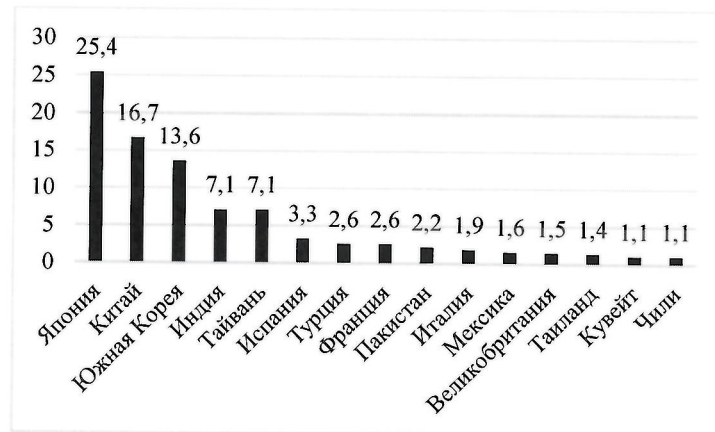


Рисунок 2 – Основные импортеры СПГ, доля (%) в общемировом импорте (2018 г.)

Цены на природный газ, как правило, рассматриваются в международном и внутреннем сегменте, который, в свою очередь, подразделяется на розничный и оптовый. В работе рассматривается ценообразование на международных рынках.

Международный газовый союз осуществляет ценообразование на СПГ в зависимости от цены на нефть и конкуренции внутри газовой отрасли в различных хабах («узел» газораспределительной сети, в которой осуществляется продажа газа). В диссертационной работе определялись корреляционные связи между среднемесячными ценами на импорт в долларах США (\$) за миллион британских тепловых единиц (*MMBTU*) и ценой за нефть марки Brent в \$ за баррель (*bbls*), а также импортом СПГ в \$ за *MMBTU* и ценой на газ хаба *Henry Hub* в \$ за *MMBTU* для стран Республика Корея, Тайвань, Япония, Испания, Мексика и США с января 2005 г. по декабрь 2019 г. Значения коэффициентов корреляции по указанным критериям представлены в таблице 1, где $Rk_{\bar{Y}_{cj}\bar{N}_{Brj}}$ — коэффициент корреляции между среднемесячной импортной ценой на СПГ рассматриваемой страны и среднемесячной ценой на нефть марки Brent за заданный период наблюдения; $Rk_{\bar{Y}_{cj}\bar{N}_j}$ — коэффициент корреляции между среднемесячной импортной ценой на СПГ рассматриваемой страны и среднемесячной ценой на газ хаба *Henry Hub* за заданный период наблюдения.

Таблица 1 – Оценки коэффициентов корреляции (среднемесячные данные)

№ п. п.	Страна	$Rk_{\bar{Y}_{cj}\bar{N}_{Brj}}$	$Rk_{\bar{Y}_{cj}\bar{N}_j}$
1	Республика Корея	0,72	−0,06
2	Тайвань	0,85	0,11
3	Япония	0,74	−0,27
5	Испания	0,79	0,02
6	Мексика	0,18	0,96
7	США	0,16	0,58

Графически результаты расчетов по импорту представлены на рисунках 3–4.

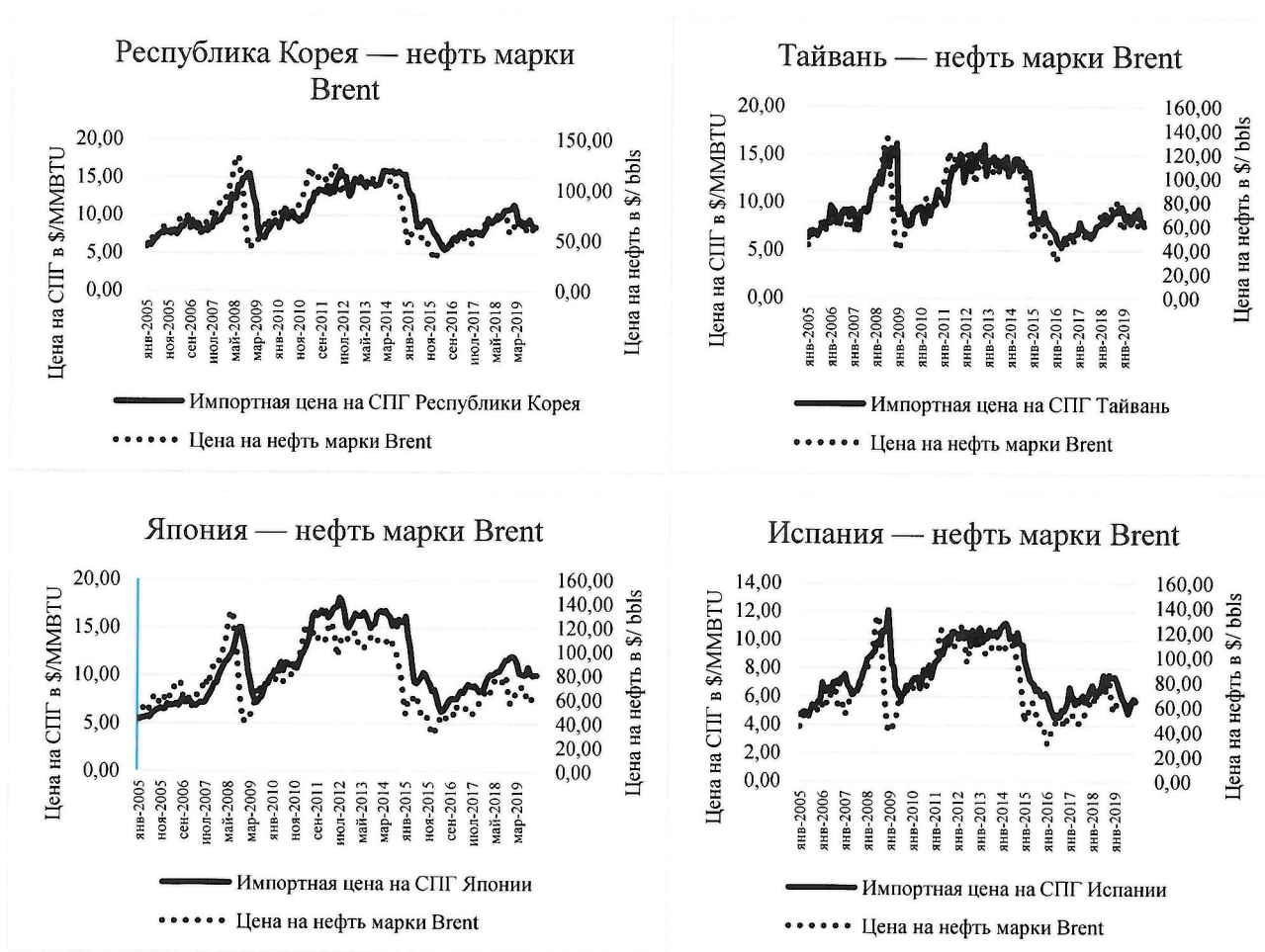


Рисунок 3 – Зависимость импортной цены на СПГ от цены на нефть марки Brent

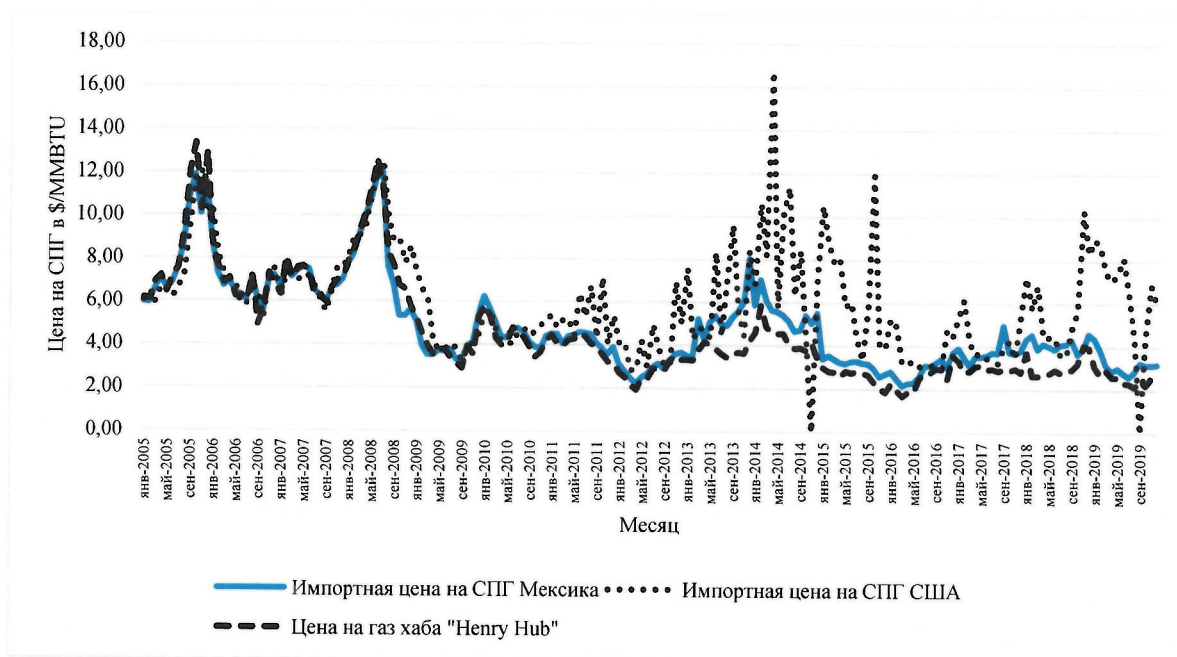


Рисунок 4 – Зависимость импортной цены на СПГ от цены на газ хаба Henry Hub

Основное влияние на цену импорта СПГ для Республики Кореи, Тайваня, Японии и Испании оказывает цена на нефть марки *Brent*; об этом свидетельствуют близкие к «1» величины коэффициентов корреляции этих стран. Значительное влияние на импортную цену СПГ для стран Северной Америки оказывает цена газа хаба *Henry Hub*; коэффициенты корреляции составляют для Мексики 0,96 и США 0,58, соответственно, что позволяет учитывать указанные зависимости при планировании транспортировки СПГ.

В рамках анализа транспортировки СПГ до потребителей рассматривался наземный (автомобильный, железнодорожный) и водный транспорт (с помощью танкеров-газовозов).

По итогам рассмотрения СПГ-проектов в России выявлено, что на текущий момент реализуются пять крупных СПГ-проектов:

- «Арктик СПГ 2» (потенциальная мощность производства — до 19,8 млн тонн СПГ в год);
- «Ямал СПГ» (до 17,4 млн тонн СПГ в год);
- «Сахалин-2» (16,2 млн тонн СПГ в год);
- «Балтийский СПГ» (13 млн тонн СПГ в год);
- «Дальневосточный СПГ» (6,2 млн тонн СПГ в год).

Указанные проекты обладают своими специфическими особенностями (географическое положение, гидрометеорологические условия, мощности производства).

Анализ современного состояния управления перевозками СПГ показал наличие разработанных транспортно-логистических систем для перевозки СПГ, технологий и экономически рационального способа для его транспортировки, рынков производства и сбыта СПГ. Также выявлены факторы, влияющие на ценообразование на СПГ. Данный анализ позволил предъявить требования к автоматизированной системе управления перевозками СПГ морским транспортом.

Во второй главе проведена оценка влияния метеорологического фактора на производительность завода по производству СПГ. Рассмотрены имеющиеся и вводимые мощности по производству и регазификации СПГ в мире и в Российской Федерации. Проведен анализ потребления энергии, полученной от СПГ в Европе.

Производительность СПГ-завода, как правило, определяется составом оборудования, объемом месторождения, транспортной схемой при добыче, мощностью оборудования, климатическими условиями. Указанные параметры, кроме климатических условий, достаточно стабильны; поэтому в работе рассмотрено влияние лишь метеорологического фактора на производительность завода по производству СПГ (СПГ-завод).

В качестве примера методики анализа производительности СПГ-завода рассмотрен производственный комплекс проекта «Сахалин-2», расположенный в п. Пригородное на острове Сахалин. Данный пример выбран в связи с тем, что на острове Сахалин наблюдается значительный разброс температур воздуха и других климатических условий по месяцам. Последнее позволит

экстраполировать эти результаты на СПГ-заводы в районах Арктической зоны Российской Федерации, статистику по которым на сегодня нельзя считать репрезентативной.

По имеющейся статистике, по потребности в природном газе для двух технологических линий СПГ-завода проекта «Сахалин-2» определена производительность по указанному числу технологических линий.

Произведен расчет оценок этого показателя — математического ожидания (МО), дисперсии (Д), среднеквадратического отклонения (СКО) и коэффициента вариации (v) при усреднении внутри года, при усреднении для i -го месяца по N годам, а также при усреднении по всему периоду наблюдений.

Результаты вычислений показали зависимость производительности СПГ-завода от климатических данных, в данном случае — от температуры наружного воздуха.

Для подтверждения этого утверждения определены корреляционные связи между производительностью СПГ-завода и среднемесячной температурой наружного воздуха. Исходные данные для анализа среднемесячной температуры наружного воздуха получены с метеостанции Корсаков (Метеостанция), находящейся в 13 км от завода.

Результаты расчета коэффициентов корреляции $R_{ПТj}$ между производительностью СПГ-завода и среднемесячной температурой в течение каждого года приведены в таблице 2.

Таблица 2 — Значение коэффициентов корреляции между производительностью СПГ-завода и среднемесячной температурой наружного воздуха

	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
$R_{ПТj}$	-0,90	-0,85	-0,95	-0,85	-0,92	-0,98	-0,93	-0,91

Коэффициенты корреляции между месячным объемом производства СПГ и среднемесячной температурой наружного воздуха в течение одного года за рассматриваемые 8 лет находятся в диапазоне от -0,85 до -0,98, что свидетельствует о значительном влиянии среднемесячной температуры наружного воздуха на месячный объем производства СПГ-завода. С понижением среднемесячной температуры наружного воздуха объем производства СПГ увеличивается, с ее ростом — уменьшается.

Общая характеристика системы по всей имеющейся статистике по месяцам и годам представляет распределение плотности вероятности случайной величины x — производительности СПГ-завода в $\text{м}^3/\text{ч}$. Распределение описывается законом экстремального значения Гумбеля; проверка данной гипотезы осуществлялась по критерию Колмогорова и не противоречит рассматриваемым статистическим данным для уровня значимости 0,1.

Плотность распределения вероятности имеет вид:

$$f(x) = \frac{1}{\lambda} \exp\left(-\frac{x - \mu}{\lambda} - e^{(x - \mu)/\lambda}\right), 0 < x < \infty, \quad (1)$$

где μ и λ — параметры масштаба, вычисляемые по следующим выражениям:

$$\mu = MO_{12,N} + 0,4501(SKO_{12,N}), \quad (2)$$

$$\lambda = 0,7797(SKO_{12,N}), \quad (3)$$

$MO_{12,N}$ — оценка математического ожидания по всем статистическим данным;
 SKO — оценка среднеквадратического отклонения по всем статистическим данным;

N — количество статистических данных, равное 96.

График распределения плотности вероятности x и гистограмма приведены на рисунке 5.

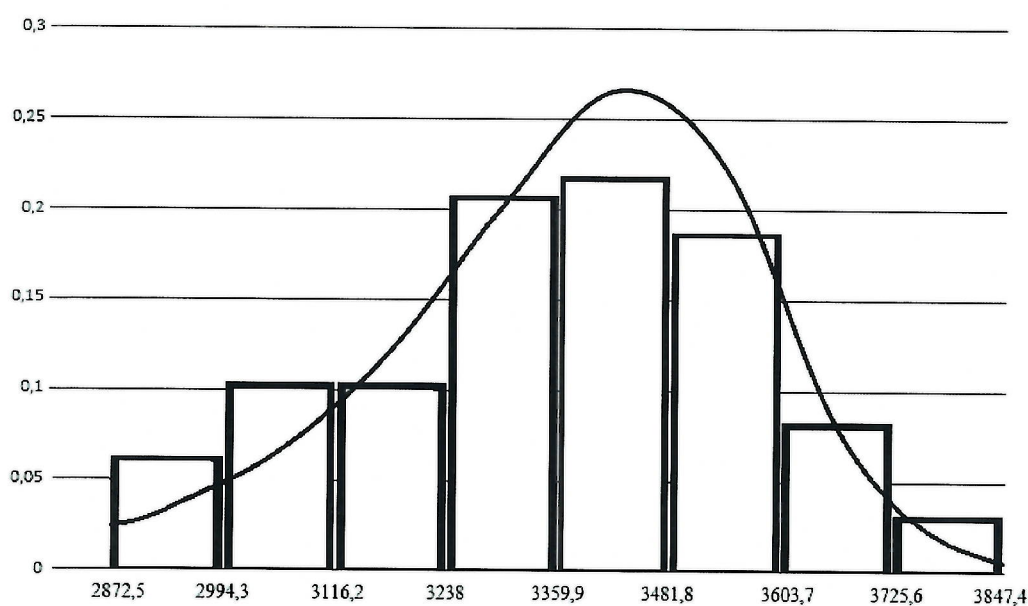


Рисунок 5 – График распределения плотности вероятности x , совмещенный с гистограммой

В качестве показателя потребности снабжения регионов за счет СПГ в работе рассмотрены 13 СПГ-терминалов Европы.

Рассмотрены интервальные и точечные оценки MO , D , SKO и v суточного потребления энергии за год наблюдения при разных вариантах объемов резервуаров и производительности.

Кроме того, рассмотрено общее количество полученной энергии по годам для всех рассматриваемых СПГ-терминалов за 2012–2019 гг.

Анализ данных показывает уменьшение производительности СПГ-терминалов с 2012 по 2014 гг., нарастание до 2018 г. и скачок в 2019 г. Количество потребляемой энергии от СПГ в 2019 г. возросло на 45%, по сравнению с 2018 г. Эти данные соответствуют состоянию мировой экономики в данный период времени.

С учетом проведенных расчетов разработана методика определения необходимого количества танкеров-газовозов для обеспечения потребности СПГ-терминалов в СПГ. Данная методика описывает экономически эффективный цикл оборачиваемости танкера-газовоза между объектами транспортно-логистической системы (СПГ-завод, СПГ-терминал).

Цикл оборачиваемости танкера-газовоза можно представить в виде:

$$t_{\text{цикл}} = t_{\text{ман.}} + t_{\text{швар.}} + t_{\text{подс.тенд.}} + t_{\text{загр.}} + t_{\text{отс.тенд.}} + t_{\text{отчал.}} + t_{\text{перех.}} + t_{\text{ман.}} + t_{\text{швар.}} + t_{\text{подс.тенд.}} + t_{\text{разг.}} + t_{\text{отс.тенд.}} + t_{\text{отчал.}} + t_{\text{перех.}}, \quad (4)$$

где $t_{\text{цикл}}$ — время в часах между началом маневрирования танкера-газовоза к СПГ-заводу для загрузки, загрузкой, переходом к СПГ-терминалу, разгрузкой и возвращением в точку начала маневрирования к СПГ-заводу;

$t_{\text{ман.}}$ — время маневрирования танкера-газовоза в акватории порта;

$t_{\text{швар.}}$ — время швартовки танкера-газовоза к причалу СПГ-завода;

$t_{\text{подс.тенд.}}$ — время подсоединения стендеров и охлаждения грузовых танков для начала загрузки;

$t_{\text{загр.}}$ — время загрузки танкера-газовоза;

$t_{\text{отс.тенд.}}$ — время отсоединения стендеров (дренаж и продувка стендеров);

$t_{\text{отчал.}}$ — время отчаливания (отшвартовки) танкера-газовоза от СПГ-завода;

$t_{\text{перех.}}$ — время перехода танкера-газовоза от СПГ-завода до точки маневрирования в акватории порта нахождения СПГ-терминала, рассчитанное по выражению:

$$t_{\text{перех.}} = \frac{S}{V}, \quad (5)$$

где S — пройденное танкером-газовозом расстояние, измеренное в морских милях;

V — скорость танкера-газовоза, измеренная в узлах.

Возможное количество циклов оборачиваемости танкера-газовоза $Q_{\text{ц}}$ для соответствующего месяца определено по выражению:

$$Q_{\text{ц}} = \frac{Q_{\text{ч}}^{\text{м}}}{t_{\text{цикл}}}, \quad (6)$$

где $Q_{\text{ч}}^{\text{м}}$ — количество часов в определенном месяце (для февраля взято 28 дней).

Необходимое число танкеров-газовозов $N_{\text{т}}^{\text{м}}$, в зависимости от месячной потребности рассматриваемого СПГ-терминала:

$$N_{\text{т}}^{\text{м}} = \frac{Q_i^{\text{п}}}{V_{\text{танкера}}}, \quad (7)$$

где $Q_i^{\text{п}}$ — месячное количество полученной энергии от СПГ в i -м месяце рассматриваемого СПГ-терминала, измеренное в м^3 ;

$V_{\text{танкера}}$ — вместимость танкера-газовоза, в м^3 .

Необходимое число танкеров-газовозов N для обеспечения месячной потребности СПГ-терминала (с округлением до единицы в большую сторону) равно:

$$N = \frac{N_T^M}{Q_{ц}}. \quad (8)$$

Разработанная методика позволяет использовать ее в системе автоматизированного управления транспортировки СПГ для определения необходимого числа танкеров-газовозов.

Анализ производительности заводов по производству СПГ установил ее зависимость от метеорологического фактора (температуры окружающей среды), что необходимо учитывать при построении графиков движения танкеров-газовозов. Анализ работы СПГ-терминалов Европы показал рост потребления СПГ, что, в свою очередь, подтвердило необходимость разработки автоматизированной системы управления перевозками СПГ морским транспортом.

В третьей главе диссертации разработана модель «Танкер-газовоз — Завод по производству СПГ», позволяющая рассмотреть влияние гидрометеорологического фактора на процесс загрузки и вывоза СПГ с заводов танкерами-газовозами. Представлена методика транспортировки СПГ с завода, учитывающая комплекс основных действующих факторов. Расчет изменения запаса СПГ в резервуарах хранения позволяет определять минимально возможные затраты на транспортирование и сохранность СПГ с учетом сезонности спроса, характеристик танкеров-газовозов, задержек и частоты отгрузки.

Методика позволяет найти минимум затрат по простоя танкера-газовоза и испарения газа из СПГ-резервуаров.

Граф модели «Танкер-газовоз — Завод по производству СПГ» имеет четыре состояния (вершины), соответствующие следующим состояниям системы:

$S1$ — наличие танкера-газовоза у СПГ-завода и наличие СПГ на СПГ-заводе для полной погрузки танкера-газовоза;

$S2$ — наличие танкера-газовоза у СПГ-завода и отсутствие нужного количества СПГ на СПГ-заводе для полной погрузки танкера-газовоза;

$S3$ — отсутствие танкера-газовоза у СПГ-завода и наличие СПГ на СПГ-заводе для полной погрузки танкера-газовоза;

$S4$ — отсутствие танкера-газовоза у СПГ-завода и отсутствие нужного количества СПГ на СПГ-заводе для полной погрузки танкера-газовоза.

Граф данной системы представлен на рисунке 6. Принято допущение о простейшем потоке событий перехода из одного состояния системы в другое с интенсивностью λ_{ij} в связи с тем, что:

- при постоянном числе танкеров-газовозов интервал времени между их подходами к СПГ-заводу является случайной величиной, характеристика которой может быть принята не зависящей от времени (свойство стационарности);

- вероятность появления одновременно двух танкеров-газовозов у СПГ-завода является величиной более высокого порядка малости, по сравнению с появлением одного танкера-газовоза (свойство ординарности);

– интервалы времени между подходами танкеров-газовозов независимы друг от друга (свойство отсутствия последействия).

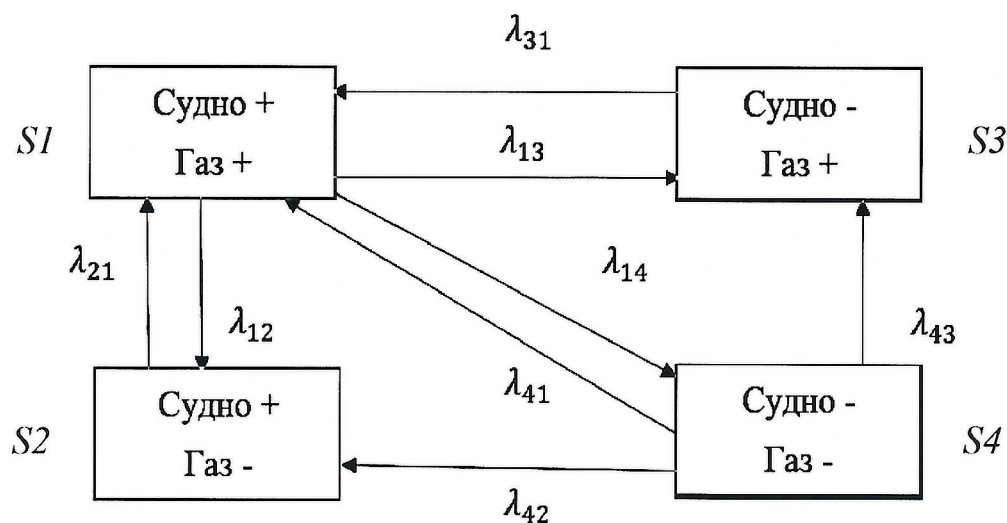


Рисунок 6 – Граф системы

Система алгебраических уравнений, где P_i , ($i=1,2,3,4$) — финальные вероятности состояний, имеет вид:

$$\begin{cases} P_1(\lambda_{12} + \lambda_{13} + \lambda_{14}) - P_3\lambda_{31} - P_2\lambda_{21} - P_4\lambda_{41} = 0; \\ P_2(\lambda_{21}) - P_1(\lambda_{12}) - P_4(\lambda_{42}) = 0; \\ P_3\lambda_{31} - P_1\lambda_{13} - P_4\lambda_{43} = 0; \\ P_1 + P_2 + P_3 + P_4 = 1. \end{cases} \quad (9)$$

Исходные данные по движению танкеров-газовозов в стесненных водах берутся для гидрометеорологических условий полуострова Ямал (Обская губа). Исходные данные производительности СПГ-завода на полуострове Ямал практически аналогичны проекту «Сахалин-2». Задача оптимизации формируется и решается не ко всему маршруту, а только к прохождению танкером-газовозом стесненных вод (при их наличии) и операций в морском порту, так как в иных случаях задержки могут быть компенсированы изменением скорости движения танкера-газовоза на других участках маршрута. Кроме того, увеличение времени движения танкера-газовоза в стесненных водах и операций в морском порту повышает финансовую нагрузку, так как кроме оплаты ежесуточной фрахтовой ставки танкера-газовоза, необходимо также учитывать оплату портовых сборов (корабельный, канальный, ледакольный, лоцманский, маячный, навигационный, причальный, экологический, транспортной безопасности акватории морского порта), швартовные и буксирные услуги, а также ледакольную проводку (при необходимости) в соответствии с утвержденными ставками. В таблице 3 приведены значения λ_{ij} по трем технологическим линиям по производству СПГ-завода, сезон — лето.

Таблица 3 – Интенсивности перехода

λ_{31}	λ_{12}	λ_{13}	λ_{14}	λ_{21}	λ_{42}	λ_{43}	λ_{41}
26,0	22,3	63,4	63,4	22,3	26,0	22,3	26,0

Принимая, что производительность каждой технологической линии по производству СПГ-завода одинакова, произведен расчет финальных вероятностей наличия газа на СПГ-заводе при работе разного количества технологических линий по производству СПГ (одна, две и три) и нахождения танкера-газовоза у СПГ-завода при различных гидрометеорологических условиях (таблица 4).

Таблица 4 – Величины финальных вероятностей

№	Количество технологических линий	Лето	Мягкая зима (ноябрь)	Средняя зима (январь)	Суровая зима (февраль)
P_1	1	0,105	0,103	0,099	0,094
	2	0,132	0,122	0,116	0,108
	3	0,143	0,129	0,122	0,111
P_2	1	0,495	0,416	0,391	0,349
	2	0,350	0,282	0,261	0,228
	3	0,284	0,227	0,209	0,182
P_3	1	0,288	0,355	0,379	0,419
	2	0,393	0,467	0,492	0,535
	3	0,452	0,526	0,551	0,593
P_4	1	0,112	0,127	0,131	0,137
	2	0,125	0,129	0,129	0,129
	4	0,122	0,119	0,118	0,114

В качестве номинала (τ) рассматривается время, необходимое танкеру-газовозу для прибытия к точке захода в стесненные воды, при котором издержки от его простоя и от испарения СПГ из СПГ-терминала будут сведены к минимуму. Величина номинала зависит от двух статистически независимых случайных величин, заданных своими законами распределения. Величина экономических потерь является нелинейной функцией этих случайных величин. Ставится задача выбора номинала, доставляющего минимум экономических потерь.

Для решения задачи оптимизации времени подхода танкера-газовоза на вход в стесненные воды по заданным критериям определена последовательность событий во времени:

$$T_{\text{цикла}} = t_0[n] - t_0[n-1] = t_1 + t_2 + t_3, \quad (10)$$

где $t_0[n-1]$ — момент отчаливания танкера-газовоза $n-1$;

t_1 — время с момента $t_0[n-1]$ до начала загрузки танкера-газовоза n , t_1 — случайная величина (СВ), ч;

t_2 — время загрузки СПГ танкера-газовоза (СВ), ч;

$t_{\text{онм}}$ — время загрузки СПГ танкера-газовоза на максимально возможной скорости закачки (неслучайная величина) ($t_2 \geq t_{\text{онм}}$), ч;

t_3 — время от окончания загрузки танкера-газовоза n до момента $t_0[n]$ (неслучайная величина, $t_3 = 2$), ч.

Графически представлена на рисунке 7.

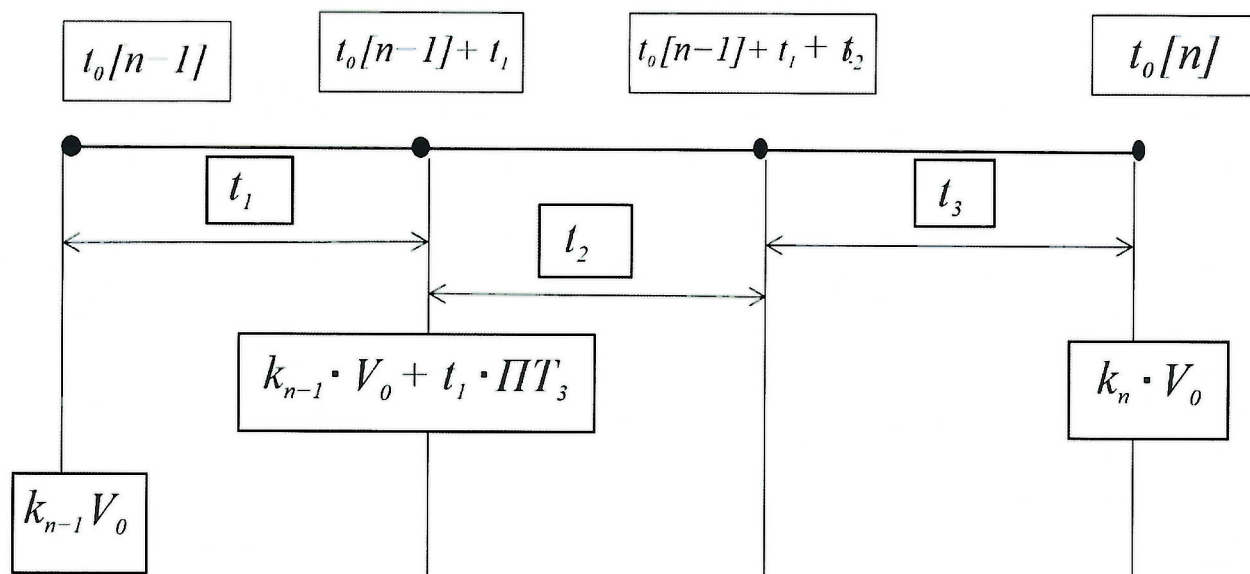


Рисунок 7 – Последовательность событий

Обслуживание СПГ-завода осуществляет n танкеров-газовозов грузоподъемностью $V_{\text{танкера}}$.

Вводятся следующие обозначения:

k_{n-1} — коэффициент, характеризующий степень заполненности СПГ-резервуаров на момент $t_0[n-1]$;

V_0 — объем резервуаров СПГ, м^3 ;

$k_{n-1}V_0$ — заполненность резервуаров СПГ на момент $t_0[n-1]$;

$V_{\text{танкера}}$ — объем танкера-газовоза, м^3 (следует отметить, что $V_{\text{танкера}} < V_0$);

T — тип погоды (лето, мягкая зима, средняя зима, суровая зима);

v_T — средняя производительность СПГ-завода при погоде типа T , $\text{м}^3/\text{ч}$;

$t_{\text{мин}}$ — время заполнения резервуаров СПГ с момента $t_0[n-1]$ до уровня $V_{\text{танкера}}$ — $t_{\text{онт}} \cdot v_T$, является СВ, ч;

$t_{\text{танкера}}$ — время движения танкера-газовоза по стесненным водам, включая время швартовки (СВ), при этом $t_1 = \tau + t_{\text{танкера}}$, ч;

$\tau_{\text{СПГ}}$ — время заполнения резервуаров СПГ полностью с момента $t_0[n-1]$ (СВ), ч;

$C_{\text{ТНК}}$ — стоимость простоя танкера-газовоза за единицу времени, $\$/\text{ч}$;

$C_{\text{СПГ}}$ — стоимость испарившегося газа вследствие простоя СПГ в единицу времени, $\$/\text{ч}$.

Для решения задачи необходимо определить функцию убытков. Для значения t_1 по отношению к степени заполненности СПГ-резервуаров возможны четыре варианта (рисунок 8).

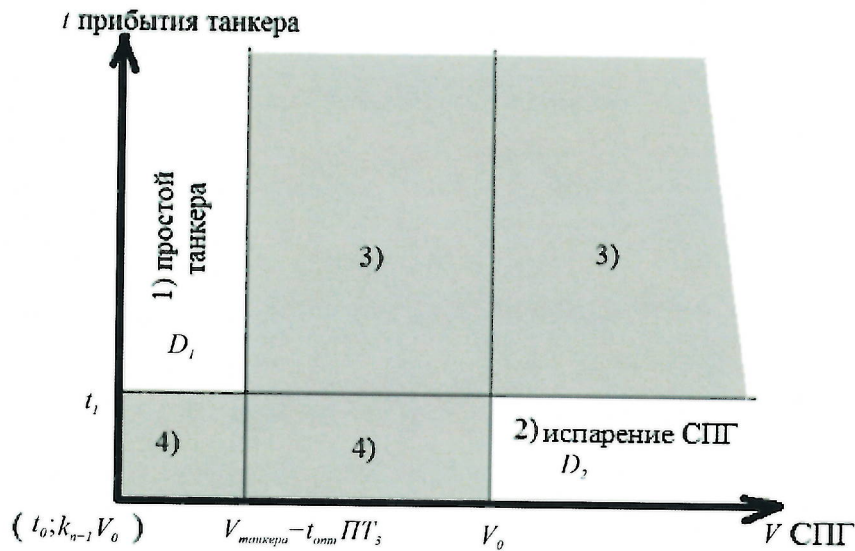


Рисунок 8 – Взаимозависимость нахождения танкера-газовоза и заполненности СПГ-резервуара

1. В области D_1 танкер-газовоз приходит и готов к загрузке до момента, когда объем загруженности резервуаров СПГ больше или хотя бы равен объему загрузки танкера-газовоза без простоя: $t_1 < t_{\min}$. В этом случае убытки определяются стоимостью аренды на время простоя танкера:

$$(t_{\min} - t_1)C_{\text{ТНК}} = \left(\frac{V_{\text{танкера}} - k_{n-1} \cdot V_0}{v_T} - t_{\text{опт}} - (\tau + t_{\text{танкера}}) \right) C_{\text{ТНК}}. \quad (11)$$

2. В области D_2 СПГ в резервуаре заполнен полностью, танкер-газовоз к загрузке не готов. В этом случае убытки определяются стоимостью испарения СПГ:

$$(t_1 - \tau_{\text{СПГ}})C_{\text{СПГ}} = \left((\tau + t_{\text{танкера}}) - \frac{V_0(1 - k_{n-1})}{v_T} \right) C_{\text{СПГ}}. \quad (12)$$

3. Танкер-газовоз готов к загрузке, СПГ резервуар заполнен не полностью, но степень заполненности превышает $V_{\text{танкера}} - t_{\text{опт}} \cdot ПТ_3$. В этом случае убытки нулевые.

4. Танкер-газовоз не готов к загрузке, СПГ резервуар заполнен не полностью. В этом случае убытки нулевые.

Функция убытков, определяемая как сумма убытков от простоя танкера-газовоза и от испарения СПГ, имеет вид:

$$\begin{aligned} F &= (t_{\min} - t_1)C_{\text{ТНК}} + (t_1 - \tau_{\text{СПГ}})C_{\text{СПГ}} = \\ &= \left(\frac{V_{\text{танкера}} - k_{n-1} \cdot V_0}{v_T} - t_{\text{опт}} - (\tau + t_{\text{танкера}}) \right) C_{\text{ТНК}} + \\ &\quad + \left((\tau + t_{\text{танкера}}) - \frac{V_0(1 - k_{n-1})}{v_T} \right) C_{\text{СПГ}}, \end{aligned} \quad (13)$$

$$\tau = \frac{V_0 C_{\text{СПГ}} - V_{\text{танкера}} C_{\text{ТНК}}}{v_T (C_{\text{СПГ}} - C_{\text{ТНК}})} - \frac{k_{n-1} \cdot V_0}{v_T} + t_{\text{опт}} \cdot \frac{C_{\text{ТНК}}}{C_{\text{СПГ}} - C_{\text{ТНК}}} - t_{\text{танкера}}. \quad (14)$$

При этом τ зависит от производительности СПГ-завода (V), которая является СВ и распределена по закону Гумбеля; время прохождения танкером-газовозом стесненных вод также является СВ, распределенной по показательному закону (S).

Следует выбрать такое номинальное значение τ , при котором суммарные издержки от простоя танкера-газовоза и испарения СПГ из СПГ-терминалов будут минимальными. Задачи такого типа называются задачами на определение оптимума номинала (термин, предложенный профессором Д. В. Свечарником). Решение указанной задачи изложено в диссертационной работе, где значение оптимума номинала вычисляется по выражению (15). Результаты решения сведены в таблицу 5.

$$\begin{aligned} \varphi(\tau, k) = & \int_0^{F^{-1}(0,99)} dv \int_0^{\frac{V_{\text{танкера}} - k_{n-1}V_0}{v} - \tau} \left(\frac{V_{\text{танкера}} - k_{n-1}V_0}{v} - (\tau + s) \right) C_{\text{ТНК}} \cdot \\ & \cdot g(s + \tau) \cdot f(v) ds + \\ + & \int_0^{F^{-1}(0,99)} dv \int_{\frac{V_0(1-k_{n-1})}{v} - \tau}^{G^{-1}(0,99)} \left((\tau + s) - \frac{V_0(1-k_{n-1})}{v} \right) C_{\text{СПГ}} \cdot g(s + \tau) \cdot f(v) ds. \quad (15) \end{aligned}$$

Таблица 5 – Результаты расчетов τ для каждого типа погоды по методу оптимума номинала

k_{n-1}	Лето (июль)	Мягкая зима (ноябрь)	Средняя зима (январь)	Суровая зима (февраль)
Заполненность резервуара	τ	τ	τ	τ
0	41,54	34,62	33,44	31,88
0,05	40,34	34,28	33,37	31,78
0,1	38,86	33,29	32,57	31,26
0,15	36,96	31,70	31,1	29,85
0,2	34,6	29,62	29,1	27,91
0,225	33,26	28,43	27,95	26,79
0,25	31,83	27,17	26,72	25,59
0,275	30,32	25,85	25,43	24,35

Таким образом, в данной главе получены вероятности сложного события — нахождения танкера-газовоза в точке загрузки сырьем и наличия СПГ в резервуарах завода-изготовителя. Расчеты показали вероятности состояний в зависимости от гидрометеорологического фактора, а также числа технологических линий на заводе по производству СПГ. Кроме того, решена задача оптимального выбора времени подхода танкера-газовоза на вход в стесненные воды по критерию минимума экономических затрат.

В четвертой главе на основе проведенных исследований разработаны принципы построения автоматизированной системы управления перевозками СПГ морским транспортом (АСУ ПСПГМТ).

Схема АСУ ПСПГМТ представлена на рисунке 9 и строится как четырехуровневая:

- Первый уровень. Решаются задачи за счет обмена информацией с другими уровнями. Здесь также подготавливаются программы для управления нижними уровнями. Указанный уровень состоит из блоков планового и фактического графиков движения танкеров-газовозов.
- Второй уровень. Управление реструктуризацией производства и настройка оборудования при переходе на внедрение новых продуктов в рамках технологических возможностей.
- Третий уровень. Контроль технологических объектов.
- Четвертый уровень. Объект управления — танкер-газовоз.

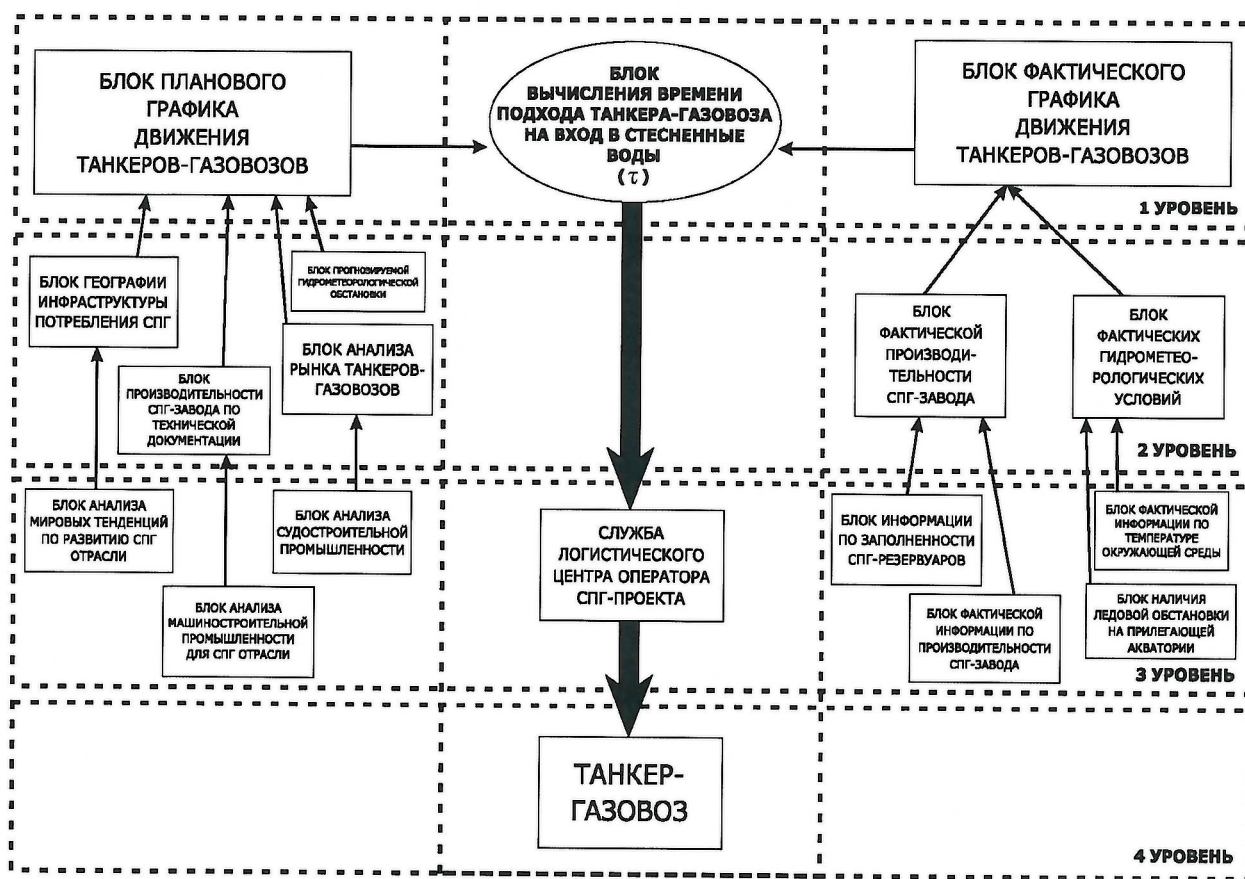


Рисунок 9 – Схема автоматизированной системы управления перевозками сжиженного природного газа морским транспортом

Блок фактического графика движения танкеров-газовозов корректирует плановый график движения танкеров-газовозов за счет поступления оперативной информации от объектов производства.

Кроме того, разработан алгоритм прогнозирования времени прибытия танкера-газовоза к точке входа в стесненные воды предназначен для расчета

указанного момента времени для различных случаев положения впередиидущего танкера-газовоза.

Реализация указанного алгоритма после инициализации переменных (T — тип погоды, производительность СПГ-завода при данном типе погоды) позволяет корректировать время подхода танкера-газовоза к точке захода в стесненные воды, при котором издержки от его простоя и от испарения СПГ из СПГ-терминала будут сведены к минимуму ($\tau_{\text{КОРРЕКТ}}$).

Разработанные принципы и алгоритмы функционирования АСУ ПСПГМТ позволяют снижать экономические затраты при транспортировке СПГ из замерзающих морей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведенный анализ методов планирования и управления перевозками СПГ морским транспортом показал наличие в настоящее время методов разработки логистических схем перевозки СПГ, построения графиков перевозок СПГ, экономически обоснованного способа транспортировки СПГ из районов с суровыми климатическими условиями, способов транспортировки СПГ. Вместе с тем, в мировой практике отсутствуют автоматизированные системы планирования и управления перевозками СПГ морским транспортом, в которых могут быть использованы перечисленные выше разработки. Проведенный анализ позволил сформулировать требования к автоматизированной системе управления.

2. Проведено исследование производительности заводов по производству СПГ (на примере производственного комплекса проекта «Сахалин-2», расположенного в п. Пригородное на острове Сахалин), в ходе которого установлена зависимость производительности СПГ-завода от метеорологического фактора, что оказывает существенное влияние на процесс транспортировки СПГ и должно, в отличие от известных методов, учитываться при планировании перевозок СПГ и построения графиков движения танкеров-газовозов.

3. Статистическое исследование динамики потребления СПГ в мире показало:

- увеличение количества потребляемой энергии от рассматриваемых СПГ-терминалов с 2014 до 2018 гг. на 22 % и скачок в 2019 г. на 45 %, по сравнению с 2018 г.;
- превалирующее воздействие на ценообразование (импорт и экспорт) СПГ стоимости нефти, по сравнению с конкуренцией источников газа;
- рост потребления СПГ подтвердил актуальность и необходимость создания автоматизированной системы управления перевозками СПГ морским транспортом.

4. Разработана математическая модель «Танкер-газовоз — Завод по производству сжиженного природного газа», базирующаяся на теории марковских процессов, позволяющая определить вероятность нахождения

танкера-газовоза в точке загрузки сырьем при различных погодных условиях и вероятность наличия СПГ в резервуарах завода-изготовителя.

5. Исследование динамики функционирования системы управления перевозками СПГ морским транспортом показало, что:

- вероятность наличия СПГ на заводе по производству СПГ при работе трех технологических линий и нахождения танкера-газовоза у завода по производству СПГ в летнее время выше соответствующей вероятности на 29 %, по отношению к условиям зимы;

- увеличение числа технологических линий завода по производству СПГ от одной до двух приводит к уменьшению вероятности простоя танкера-газовоза на 29 % летом и на 35 % зимой;

- увеличение числа технологических линий завода по производству СПГ от одной до трех приводит к уменьшению вероятности простоя танкера-газовоза на 43 % летом и на 48 % зимой, по отношению к одной технологической линии.

6. Проведен анализ движения танкеров-газовозов в стесненных водах при различных гидрометеорологических условиях, на основании которого поставлена и решена задача выбора времени подхода танкера-газовоза на вход в стесненные воды по критерию минимума экономических затрат методом оптимума-номинала.

7. Разработаны принципы построения, структура, алгоритмы функционирования автоматизированной системы управления перевозками сжиженного природного газа морским транспортом, позволяющие снижать убытки при транспортировке СПГ из замерзающих морей Арктической зоны путем исключения простоя танкеров-газовозов при погрузке и большого по времени хранения СПГ в резервуарах из-за его ежесуточной испаряемости.

8. Эффективность результатов работы подтверждается их использованием в компаниях Группы «Газпром» и включением в учебный процесс университетов Российской Федерации (ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет», ФГАОУ ВО «Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина», ФГБОУ ВО «Российский государственный гидрометеорологический университет»).

В качестве рекомендаций и перспектив дальнейшей разработки темы диссертации предлагается решение оптимизационной задачи для полного цикла движения танкера-газовоза от СПГ-завода до СПГ-терминала с разработкой соответствующей автоматизированной системы управления.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

а) публикации в рецензируемых научных изданиях:

1. Баранов, Л. А. Оптимизация времени подхода танкера-газовоза на вход в стесненные воды по критерию минимума убытков / Л. А. Баранов, Н. В. Першин // Наука и техника транспорта. — 2020. — № 4. — С. 45–51.

2. Першин, Н. В. Определение необходимого количества танкеро-газовозов для обеспечения потребности терминалов по регазификации сжиженного природного газа / Н. В. Першин // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. — 2020. — № 10. — С. 24–29.

3. Першин, Н. В. Анализ работы системы транспортировки сжиженного природного газа / Н. В. Першин // Морские интеллектуальные технологии. — 2020. — № 1 (47). — Т. 1. — С. 125–130.

4. Першин, Н. В. Анализ количества полученной энергии от терминалов по регазификации сжиженного природного газа в Европе / Н. В. Першин // Морские интеллектуальные технологии. — 2019. — № 13 (45). — Т. 3. — С. 182–190.

5. Баранов, Л. А. Анализ производительности завода по производству сжиженного природного газа как объекта автоматизированной системы управления перевозками / Л. А. Баранов, Н. В. Першин // Наука и техника транспорта. — 2019. — № 2. — С. 33–39.

б) в материалах конференций и других изданиях:

6. Баранов, Л. А. Изменение показателя производительности завода по производству сжиженного природного газа в зависимости от влияния метеорологического фактора / Л. А. Баранов, Н. В. Першин // Вестник Ассоциации буровых подрядчиков. — 2020. — № 4. — С. 2–5.

7. Буянов, А. С. Нормативно-правовое регулирование бункеровки судов сжиженным природным газом в морских портах России / А. С. Буянов, В. Е. Семенов, А. В. Лобанов, К. С. Вераксо, Н. В. Першин // Газовая промышленность. — 2020. — № 3. — С. 20–26.

8. Першин, Н. В. Анализ статистических данных от терминалов по регазификации сжиженного природного газа в Европе / Н. В. Першин // Сборник Всероссийской научной конференции «Инновационное развитие технологий производства СПГ». — 2019. — С. 20–23.

9. Першин, Н. В. Современные проблемы освоения месторождений нефти и газа на российском шельфе / Н. В. Першин // Сборник XI Всероссийской конференции молодых ученых специалистов и студентов «Новые технологии в газовой промышленности» (газ., нефть, энергетика). — 2015. — С. 416.

10. Раянова, Э. Т. Шельфовые проекты в Российской Федерации: причины медленного освоения континентального шельфа / Э. Т. Раянова, Н. В. Першин // Морское образование: традиции, реалии и перспективы: Материалы научно-практической конференции. — 2015. — С. 140–151.

Першин Никита Вячеславович

**АВТОМАТИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ПЕРЕВОЗКАМИ
СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА
МОРСКИМ ТРАНСПОРТОМ**

2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами
и производствами

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Подписано в печать _____ 2022 г. Заказ № _____ Формат 60x84 ¹/₁₆

Объём 1,5 усл. п.л. Тираж 80 экз.

127994, Россия, г. Москва, ул. Образцова, дом 9, стр. 9,