

УДК 656.6

ВЫБОР И ОБОСНОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ ЛОГИСТИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ДОСТАВКИ СПГ МОРСКИМ ТРАНСПОРТОМ НА ПРОЕКТИРУЕМЫЙ ТЕРМИНАЛ ДЛЯ ГАЗОСНАБЖЕНИЯ МУРМАНСКА И МУРМАНСКОЙ ОБЛАСТИ

О. М. Мудрова, канд. техн. наук, заведующий отделом развития морского транспорта
А. А. Карпенко, инженер 1-й категории отдела развития морского транспорта

Описана методология выполнения научно-исследовательской работы по выбору и обоснованию оптимальной логистической схемы доставки сжиженного природного газа (далее – СПГ) морским транспортом на проектируемый в Мурманске терминал. Выполнена постановка задачи имитационного моделирования для автоматизации формирования расписания работы газозовозов, графика потребления СПГ и расчета потребности в газозовозах. Представлена логика реализации имитационной модели и описание полученных результатов.

Ключевые слова: газификация, Мурманская область, СПГ, газозовоз, логистическая схема, морская транспортировка, расходы, себестоимость, имитационное моделирование, модель, алгоритм.

Проблема энергообеспечения Мурманского региона имеет давнюю историю. Еще в 2005 году ОАО «Газпром», являющееся основным поставщиком тепловой и электрической энергии потребителям региона, заключило Соглашение о сотрудничестве с Правительством области [1]. Была проведена оценка потребностей области в энергоресурсах с учетом всех доступных источников газоснабжения, выполнено технико-экономическое обоснование возможных вариантов сетевой, автономной и комбинированной газификации, в том числе с использованием СПГ [2]. В 2011 году утверждена «Генеральная схема газоснабжения и газификации Мурманской области», разработанная ОАО «Газпром промгаз». Однако в силу ряда объективных причин к 2021 году конкретных результатов добиться не удалось, и пока Мурманская область – единственный регион РФ, где в качестве энергоносителя используется в основном топочный мазут (рисунок 1) [1–4]. Необходимость дальнейшей проработки данного вопроса связана с реализацией проекта комплексного развития Мурманского транспортного узла, в рамках которого планируется строительство новых терминалов на западном берегу Кольского залива.



Рисунок 1 – Схема энергетических мощностей ОАО «ТГК-1» в Мурманской области [2]

В рамках обоснования инвестиций вариантов газоснабжения теплогенерирующих объектов и перспективных потребителей г. Мурманска сжиженным природным газом АО «ЦНИИМФ» выполнило выбор и обоснование оптимальной логистической схемы доставки СПГ морским транспортом на проектируемый в районе Зеленого Мыса терминал. Результаты представлены ниже.

1. Выбор оптимальных отправных точек поставки

На базе обзора рынка СПГ были установлены основные источники импорта СПГ. В соответствии с задачей реализуемого проекта подробно рассмотрены источники СПГ в Арктическом регионе и ближайших странах Атлантического бассейна. В качестве основных источников поставки СПГ на этой территории выделены действующие и перспективные терминалы стран-экспортеров в России и Норвегии, а также крупные перевалочные терминалы СПГ в России, Франции, Нидерландах, Бельгии и Великобритании.

Для выбора оптимальных отправных точек для газификации Мурманской области был использован системный анализ (матрица Кепнера – Трего), основанный на экспертной оценке веса факторов. Для обоснования и формирования матрицы приняты во внимание следующие факторы: удаленность, возможность поставок (степень законтрактованности СПГ), природно-климатические, производственно-технологические и политические риски, собственник сырья и транспортная доступность.

В результате определены наиболее предпочтительные отправные точки поставки СПГ для газификации Мурманской области:

- Выборг (комплекс СПГ КС «Портовая», ООО «Газпром СПГ Портовая») [5];
- Усть-Луга (комплекс по переработке этансодержащего газа и СПГ в районе г. Усть-Луга Ленинградской области) [6];
- Высоцк (терминал по производству и перегрузке СПГ в порту Высоцк Ленинградской области, ЗАО «Криогаз») [7];
- перевалочные комплексы ПАО «НОВАТЭК» в Мурманской области [8].

По ресурсным базам отправных точек были проанализированы характеристики СПГ, планируемого к поставке на проектируемый терминал. Все они удовлетворяют техническим требованиям, предъявляемым к топливу.

2. Разработка логистических схем транспортировки СПГ

Организация процесса доставки груза наиболее эффективным способом требует разработки оптимальной логистической схемы, которая в общем виде включает в себя следующие основные элементы:

- анализ общих условий и задач реализуемого проекта;
- прогноз объемов перевозок расчетного груза;
- порты погрузки/выгрузки;
- маршруты транспортировки;
- подбор вариантного ряда газозовов и плавучих хранилищ газа (ПлХГ);
- оценка потребности во флоте для обеспечения объемов перевозок.

В качестве исходных данных были даны 4 варианта автономного газоснабжения (рисунок 2).

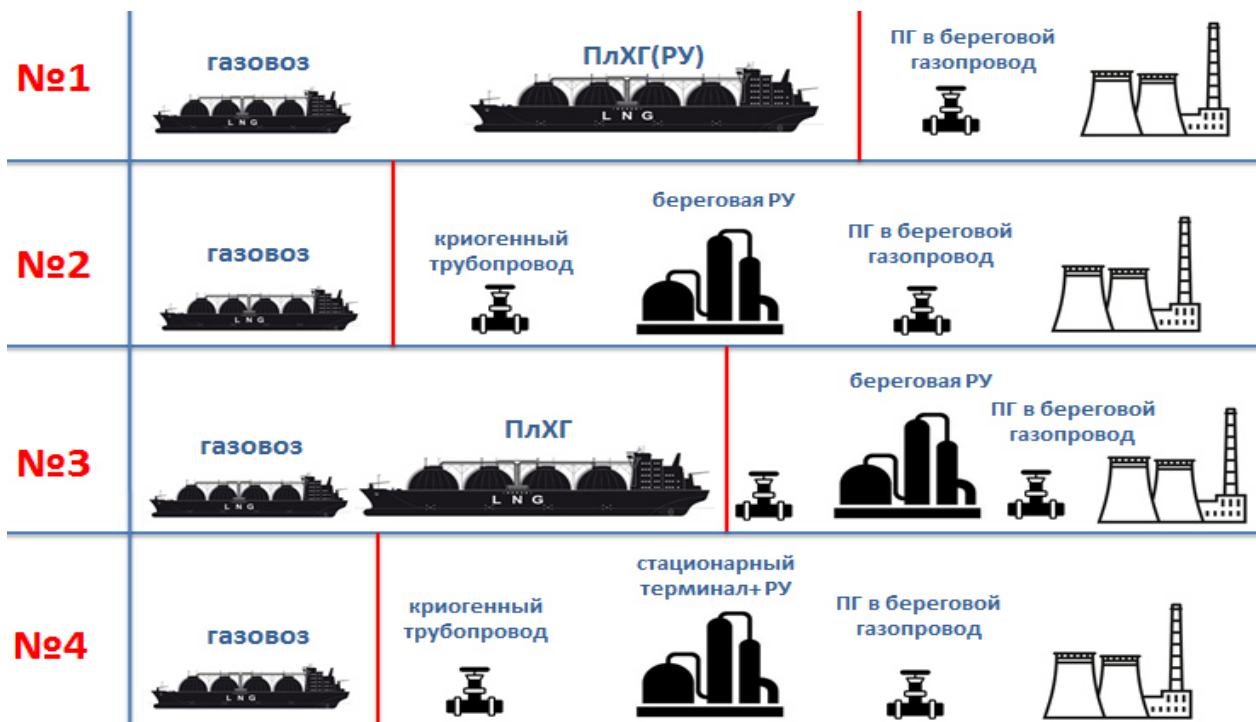


Рисунок 2 – Варианты газоснабжения

Все варианты основаны на морской транспортировке СПГ газовозами из выбранных отправных точек поставки СПГ до терминала в Мурманске. Два варианта включают перевалку СПГ через плавучее хранилище газа (с установкой по регазификации и без нее).

В качестве прогнозируемого объема перевозок груза принят планируемый объем потребления СПГ по двум сценариям: только ПАО «Мурманская ТЭЦ» в объеме 556 тыс. м³ СПГ в год; ПАО «Мурманская ТЭЦ» и иные перспективные потребители региона в объеме 1343 тыс. м³ СПГ в год. Динамика потребления неравномерна по сезонам, пики потребления приходится на зимние месяцы.

Расчетные маршруты транспортировки представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Расчетные маршруты транспортировки СПГ

Страна отправления	Порт отправления (погрузки)	Порт назначения (выгрузки)	Страна назначения	Расстояние, мили	Зона SECA, мили	Доля зоны SECA, %
Россия	Выборг/Высоцк	Мурманск	Россия	2201	1179	54
	Усть-Луга			2176	1161	53
	Кильдин/Ура-Губа			56	0	0

Из-за близкого расположения Выборг и Высоцк, а также Кильдин и Ура-Губа рассматривались как единые точки. Три порта (Выборг, Высоцк и Усть-Луга) принадлежат бассейну Балтийского моря, где в соответствии с Международной конвенцией МАРПОЛ-73/78 по предотвращению загрязнения окружающей среды [9, 10] суда должны использовать низкосернистое судовое топливо. Маршруты следования судов проходят по Балтийскому, Северному и Баренцеву морям. Были проанализированы гидрометеорологические и ледовые условия плавания на расчетных маршрутах. Полученные результаты использованы в эксплуатационно-экономических расчетах.

По данным базы Sea-web Ships [11], на 15 июня 2021 года в мире эксплуатировались 575 газовозов суммарным дедвейтом 49,1 млн тонн и суммарной вместимостью 89,3 млн м³. Наибольшее число судов насчитывается в группах от 130 до 175 тыс. м³. Из всех действующих и заказанных газовозов только 37 судов имеют классы Ice1–Arc4. В мире эксплуатируется и строится 61 плавучая регазификационная установка (ПРГУ). В основном ПРГУ имеют вместимость более 120 тыс. м³. ПРГУ меньшей вместимости всего 8 единиц.

Учитывая это, в качестве ПлХГ может рассматриваться как специализированное судно, так и «классический» газовоз, который в случае необходимости может быть дооборудован регазификационной установкой (таблица 2).

Таблица 2 – Возможное исполнение ПлХГ в зависимости от варианта газоснабжения

Вариант газоснабжения	Вариант ПлХГ
№ 1	– судно-газовоз, дооборудованное регазификационной установкой; – несамоходное ПлХГ, оборудованное регазификационной установкой; – специализированное судно – плавучая регазификационная установка
№ 2	–
№ 3	– судно-газовоз без регазификационной установки; – несамоходное ПлХГ без регазификационной установки
№ 4	–

Основной характеристикой как газовозов, так и ПлХГ является их вместимость. С увеличением вместимости ПлХГ и газовозов снижаются частота судовых заходов и потребность в транспортных судах, а также удельная себестоимость перевозки груза.

Выбор вместимости газовозов и ПлХГ выполнялся с учетом следующих факторов:

- соотношение между вместимостью газовоза и ПлХГ с учетом минимально необходимого запаса СПГ;
- оптимальное/возможное количество и частота судовых заходов газовозов для пополнения ПлХГ в пиковые периоды потребления СПГ;
- неравномерное потребление газа по периодам в течение года: в январе-феврале – максимальное, в июне – августе – минимальное;
- экономическая целесообразность.

Вместимость ПлХГ рассчитывалась исходя из вместимости газовоза и минимально необходимого запаса, который включает:

- неснижаемый запас для снабжения потребителей в случае срыва поставок СПГ морским транспортом (принят в расчете объемов на трое суток максимального потребления);
- запас СПГ для поддержания емкостей ПлХГ в захлаженном состоянии (3 % от объема).

На основании анализа наличия флота на рынке и выполненных расчетов был определен вариантный ряд вместимости газовозов и ПлХГ:

- газовоз вместимостью 7–10 тыс. м³ → ПлХГ вместимостью 20–35 тыс. м³;
- газовоз вместимостью 15–18 тыс. м³ → ПлХГ вместимостью 30–50 тыс. м³;
- газовоз вместимостью 23–25 тыс. м³ → ПлХГ вместимостью 35–65 тыс. м³.

Для выбранных типоразмеров судов были определены прототипы из имеющихся судов мирового флота и разработаны основные технико-эксплуатационные требования к расчетным судам.

3. Разработка математической транспортной модели

В соответствии с принятыми логистическими схемами было выполнено математическое моделирование работы газозовов на расчетных направлениях, по результатам которого рассчитаны следующие показатели:

- время на ходу и на стоянке;
- продолжительность кругового рейса;
- количество круговых рейсов;
- количество перевезенного груза;
- периодичность загрузки ПлХГ;
- количество загрузок в месяц;
- потребность в судах.

4. Оценка затрат на морскую транспортировку СПГ на проектируемый терминал

В соответствии с методикой АО «ЦНИИМФ» [12] была выполнена оценка бюджета постоянных и переменных расходов по газозовам и ПлХГ, определены годовые эксплуатационные затраты на морскую составляющую по каждой из логистических схем. Расчеты выполнены отдельно по сценариям газопотребления.

Для выполнения сравнительного анализа логистических схем доставки СПГ на проектируемый терминал был выполнен расчет себестоимости перевозки и хранения СПГ с учетом капитальных и операционных затрат. В результате определены оптимальные по величине «морской» составляющей схемы доставки СПГ (рисунок 3).



Рисунок 3 – Оптимальные логистические схемы доставки СПГ

Для автоматизации и визуализации расчетов, выполняемых на этапе 3, в среде имитационного моделирования AnyLogic была построена модель, позволяющая формировать расписание работы газозовов, график потребления СПГ и рассчитывать месячную потребность в газозовах.

AnyLogic – специализированная программная среда разработки имитационных моделей, обеспечивающая пользователей инструментами построения логико-математической модели исследуемого объекта с целью получения о нем информации посредством проведения ряда экспериментов над моделью [13, 14].

Программное обеспечение AnyLogic поддерживает использование трех видов имитационного моделирования:

- 1) агентное моделирование – способ построения логико-математической модели исследуемой системы в виде создания отдельного класса – совокупности объектов (переменных и постоянных характеристик), функций (функциональных зависимостей между объектами одного или нескольких классов) и методов (способов построения логического описания функционирования класса). В AnyLogic данные классы называются агентами и могут включать в себя подклассы различного уровня иерархии;
- 2) дискретно-событийное моделирование – позволяет составить строгую статистически сконструированную модель последовательного выполнения событий исследуемой системы;
- 3) системная динамика – создание непрерывных имитационных моделей с использованием дифференциальных уравнений, описывающих динамику протекания процессов исследуемой системы.

Классический подход к моделированию транспортных процессов предполагает получение оценок значений эксплуатационных показателей с помощью средств аналитического моделирования. При необходимости в учете дискретно меняющихся во времени факторов применение аналитического моделирования характеризуется повышенной трудоемкостью вычислений. При разработке математической транспортной модели поставок СПГ на проектируемый терминал таким фактором являлась в том числе неравномерность в потреблении СПГ по месяцам. При использовании аналитических методов расчета показатели эксплуатации морского транспорта осредняются в течение периода работы логистической схемы. В связи с этим невозможно рассмотреть переходы транспортной системы из состояния в состояние и, следовательно, учитывать влияние этих переходов на дальнейшее поведение системы.

Постановка задачи имитационного моделирования

Задача: построить логико-математическую модель и на ее основе провести симуляцию транспортного процесса со следующими *объектами*:

- 1) транспортные средства – газозовы, работающие на одной из линий логистической схемы доставки СПГ на проектируемый терминал;
- 2) плавучее хранилище газа;
- 3) Мировой океан – среда функционирования объектов;

- 4) потребитель – формальное представление потребности ПАО «Мурманская ТЭЦ» и иных перспективных потребителей Мурманской области в СПГ в виде функции потребления.

Методы реализации имитационной модели

Построение математической транспортной модели разделено на этапы, соотнесенные с рассматриваемыми технологическими процессами: погрузо-разгрузочными работами в портах, потреблением СПГ в хранилище, непосредственно эксплуатацией и составлением расписания рейсов газозовов. Взаимосвязь данных процессов основана на логико-функциональных зависимостях между переменными и состояниями моделируемых объектов.

Для моделирования погрузо-разгрузочных работ использовано *дискретно-событийное моделирование*. Моделирование алгоритма эксплуатации газозовов базируется на *агентном моделировании*. Как порт, так и газозов представляют собой агентов, переходящих из состояния в состояние в зависимости от протекающих технологических процессов (рисунок 4).

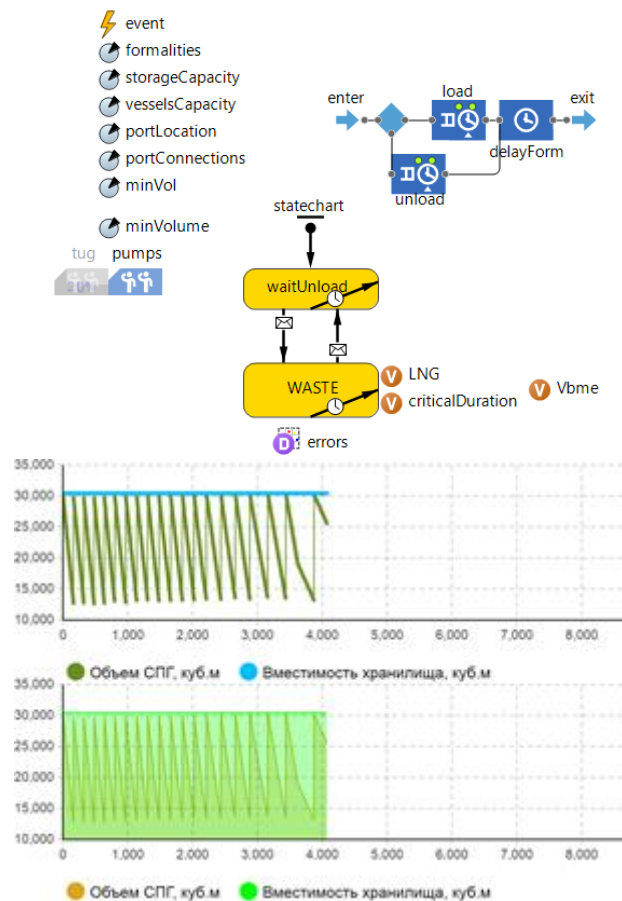


Рисунок 4 – Структура алгоритма работы порта в дискретно-событийной и агентной реализациях

Кроме используемых параметров и дискретно-событийных блоков, модель порта задействует переходы из состояния в состояние в определенные моменты модельного времени. Переход агента между состояниями может осуществляться с заданной интенсивностью, при выполнении условия, по тайм-ауту и т. д.

Потребление СПГ в ПлХГ симулируется посредством циклично выполняемого кода один раз в час. Для удобства пользователя на диаграмме работы порта представлены графики наличия СПГ в ПлХГ.

В окне уровня моделирования порта (рисунок 4) расположены основная диаграмма состояния моделирования и графики наличия СПГ в ПлХГ, по оси абсцисс которых – модельное время (ч), по оси ординат – уровень объема СПГ (m^3).

Каждому из портов в модели заданы координаты в геоинформационной среде (GIS), маршрут до которых пролегает через районированные участки Мирового океана (рисунок 5). Районирование регионов эксплуатации газозовов выполнено в соответствии со справочным руководством Российского морского регистра судоходства [15, 16], в связи с различными характеристиками ветро-волнового режима регионов. Основные характеристики ветро-волнового режима регионов эксплуатации представлены в виде таблиц распределения вероятностей по значениям характеристик. Поэтому детальный учет гидрометеорологических условий при оценке показателей эксплуатации флота может осуществляться только инструментами стохастического моделирования.

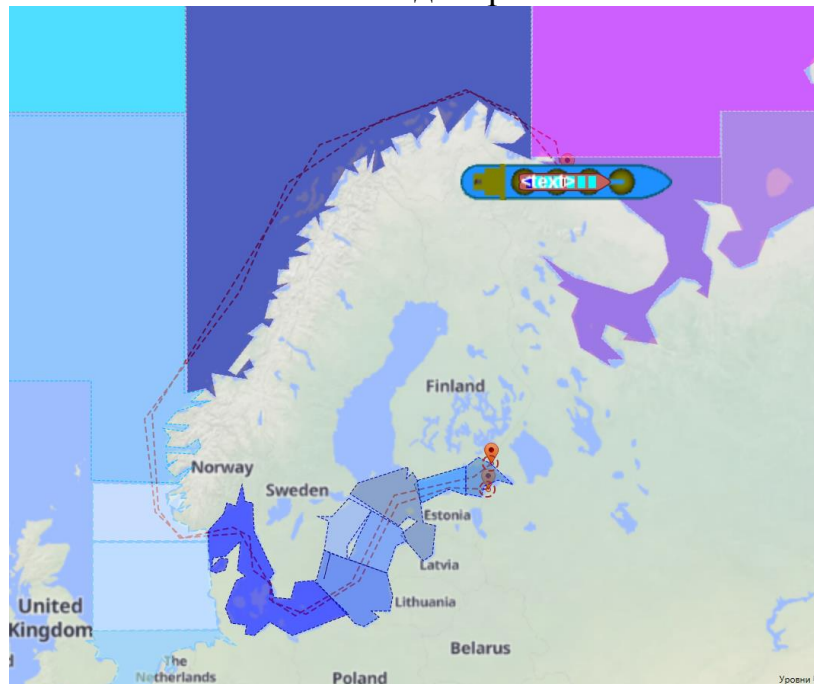


Рисунок 5 – Геоинформационная среда модели

Каждому из представленных на рисунке 5 районов поставлены в соответствие записи во внешней базе данных, определяющие максимальную скорость для каждого из типов газозовов. Данные районы занимают определенную площадь на GIS-карте – пространстве геоинформационных координат, загружаемых с опционально выбираемых серверов.

Все элементы модели газозова соответствуют описанию уровня моделирования порта (рисунок 6). Работа газозовов на линии построена по принципу «умного конвейера» – каждый газозов самостоятельно определяет необходимый

промежуток времени до начала рейса следующего газовоза. Динамическое формирование расписания рейсов на всем протяжении работы модели позволяет учесть неравномерность в потреблении СПГ.

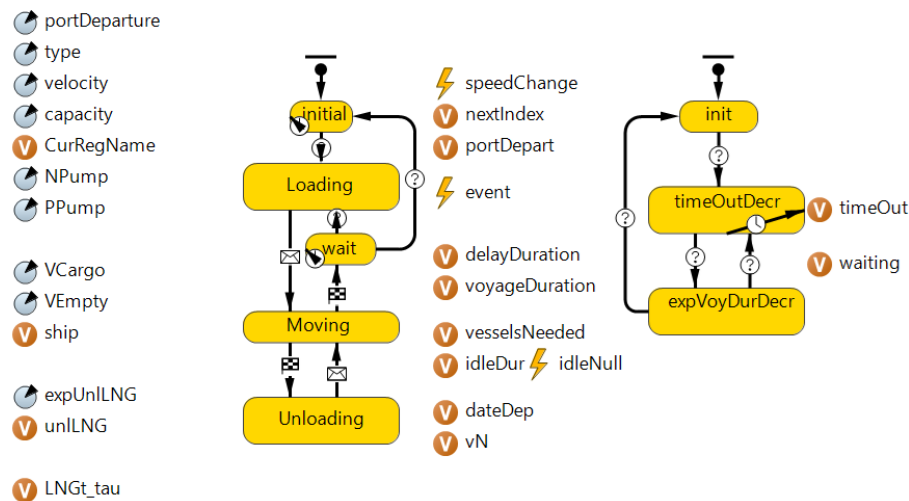


Рисунок 6 – Структура алгоритма эксплуатации газовоза в агентной реализации

В общем виде алгоритм эксплуатации газовоза в рамках системы «умного конвейера» выглядит следующим образом:

- 1) в состоянии initial в порту отправления находится весь флот доступных заказчику газовозов, который представляет собой коллекцию агентов с определенными для них индексами. В начале работы модели газовоз с индексом 0 самостоятельно рассчитывает для себя промежуток времени (устанавливает таймер), через который он должен поступить в эксплуатацию, чтобы к моменту выгрузки его партии СПГ в ПлХГ сохранился неснижаемый запас (условие своевременной поставки);
- 2) в момент выхода в эксплуатацию, или в состоянии Loading, газовоз с индексом 0 устанавливает для себя таймер до следующего рейса из порта отправления, который удовлетворяет условию своевременной поставки согласно методике расчета из теории управления запасами;
- 3) состояние Moving соответствует движению газовоза между пунктами погрузки и выгрузки, во время которого скорость хода меняется в зависимости от региона плавания;
- 4) состояние Unloading соответствует выгрузке газа в ПлХГ, с переходом в которое газовоз перенаправляется в диаграмму дискретно-событийного моделирования порта. По окончании всех погрузо-разгрузочных работ и формальностей в порту газовоз покидает блоки работы порта;
- 5) в зависимости от того, в каком из состояний газовоза обнулится таймер, установленный на шаге 2, выполняется код, согласно которому текущий газовоз определяет свое местоположение в GIS-пространстве: в случае если газовоз не находится на территории порта отправления, он вызывает газовоз из состояния initial со следующим индексом (в нашем случае – 1), который находится на территории порта отправления. В дальнейшем алгоритм эксплуатации следующего газовоза аналогичен и начинается с шага

2. В противном случае текущий газозов становится под погрузку в порту отправления и возвращается к шагу 2;
- б) по прибытии в порт отправления все газозовы, имеющие нулевой таймер, возвращаются в состояние initial, поскольку данное условие означает, что они не нужны в рамках рассматриваемого рейса.

Интерфейс имитационной модели

Начальный экран модели представляет собой список доступных для пользователя вариантов работы логистической схемы поставок СПГ на проектируемый терминал. После выбора начальных условий и запуска модели открывается окно геоинформационной системы с графиками потребления и наличия газа в хранилище (рисунок 7).

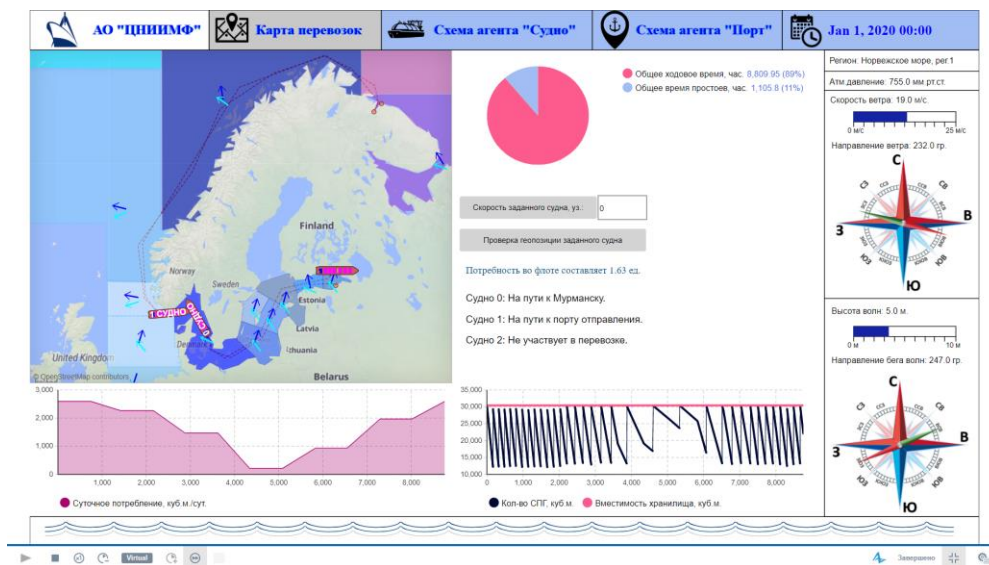


Рисунок 7 – Результаты прогона имитационной модели на протяжении одного года

Во время работы модели пользователю доступна информация о структуре эксплуатационного времени газозовов с начала запуска модели до текущего момента времени, потребность во флоте за предшествующий месяц, информация о состоянии $\tau + 1$ газозовов относительно эксплуатации, где τ – требуемое количество газозовов. С целью увеличения информативности главного окна имитационной модели в нем также присутствуют графики уровня суточного потребления СПГ и уровня СПГ в ПлХГ, имеется возможность получения информации о скорости хода и геопозиции любого судна в интерактивном режиме.

Выходные данные имитационной модели

В результате работы имитационной модели морской составляющей логистической схемы поставки СПГ на проектируемый терминал получены график работы флота, таблица месячной потребности в газозовах (таблица 3), график изменения объемов СПГ в хранилище (рисунок 8) и эксплуатационные показатели

работы судов (рейсооборот, ходовое и стояночное время). Представленные результаты относятся к логистической схеме «Выборг/Высоцк – Мурманск» при потреблении только ПАО «Мурманская ТЭЦ», без учета ледовых условий и задержек по сложным гидрометеорологическим условиям.

Таблица 3 – Значения месячной потребности в газозовах на линии Выборг/Высоцк – Мурманск

Месяц	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь
Потребность в газозовах ¹	1.73	1.80	1.69	1.36	0.99	0.41
Месяц	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
Потребность в газозовах	0.39	0.38	0.68	1.14	1.44	1.60

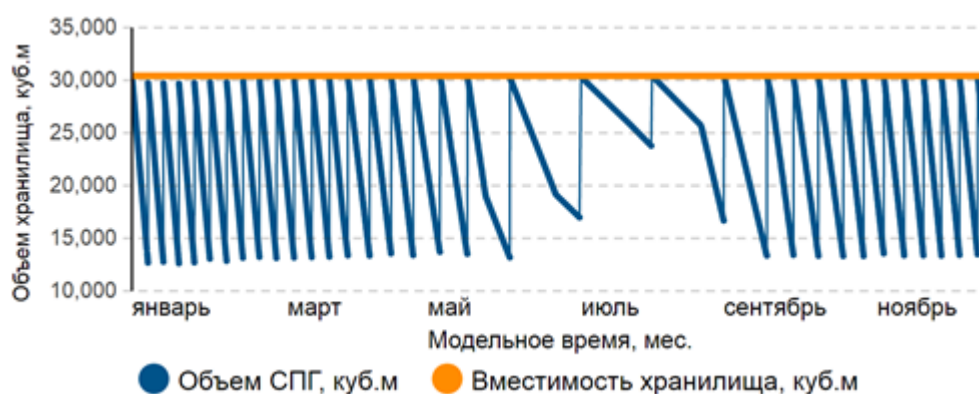


Рисунок 8 – Изменение объема СПГ в хранилище проектируемого терминала по месяцам

Таким образом, построение точной и достаточно близкой к реальным условиям эксплуатации флота математической модели должно проводиться с применением средств имитационного моделирования. Аналитические расчеты в рамках рассматриваемой сферы исследования находят применение только во вспомогательных расчетах технических характеристик транспортных и перегрузочных средств. Данный подход позволит учесть как стохастические факторы (например, гидрометеорологические условия навигации), так и неравномерное потребление СПГ при формировании расписания рейсов. Помимо прочего, средства имитационного моделирования формируют гибкую среду для расширения функционала модели с целью охвата тематически схожих задач.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. «Газпром» и Мурманская область подписали Соглашение о сотрудничестве [Электронный ресурс] // ПАО «Газпром»: [сайт]. URL: <https://www.gazprom.ru/press/news/2005/november/article55504/> (дата обращения: 15.06.2021).
2. Прорабатываются различные варианты газификации Мурманской области [Электронный ресурс] // ПАО «Газпром»: [сайт].

¹ Значения месячной потребности в газозовах представлены с дробной частью, где целая часть – это количество полностью занятых газозовов в логистической схеме, а дробная часть – доля рабочего времени газозовов, частично привлеченных для работы в логистической схеме.

- URL: <https://www.gazprom.ru/press/news/2014/june/article193740/> (дата обращения: 15.06.2021).
3. Neftegaz.ru: [сайт]. URL: <https://neftegaz.ru/news/gosreg/210511-d-medvedev-poruchil-a-novaku-sovmestno-s-regionalnym-pravitelstvom-dolozhit-o-perspektivakh-gazifika/>
 4. Власти Мурманской области к 15 июня ожидают расчеты Газпрома по газификации региона [Электронный ресурс] // Сетевое издание «Интерфакс-Россия»: [сайт]. URL: <https://www.interfax-russia.ru/northwest/news/vlasti-murmanskoy-oblasti-k-15-iyunya-ozhidayut-raschety-gazproma-po-gazifikacii-regiona> (дата обращения: 15.06.2021).
 5. ООО «Газпром СПГ Портовая»: [сайт]. URL: <https://portovaya-Ing.gazprom.ru/about/>
 6. Началось строительство Комплекса по переработке этансодержащего газа в районе Усть-Луги [Электронный ресурс] // ПАО «Газпром»: [сайт]. URL: <https://www.gazprom.ru/press/news/2021/may/article529170/> (дата обращения: 15.06.2021).
 7. В. Путин дал старт новому СПГ-заводу в порту Высоцк в Ленинградской области [Электронный ресурс] // Neftegaz.ru: [сайт]. URL: <https://neftegaz.ru/news/transport-and-storage/444212-ofitsialno-v-putin-dal-start-novomu-spg-zavodu-v-portu-vysotsk-v-leningradskoy-oblasti/> (дата обращения 15.06.2021).
 8. НОВАТЭК совершил 1-ю перевалку СПГ в Мурманской области [Электронный ресурс] // Neftegaz.ru: [сайт]. URL: <https://neftegaz.ru/news/spg-szhizhennyu-prirodnyu-gaz/651447-novatek-sovershil-1-yu-perevalku-spg-v-murmanskoy-oblasti/> (дата обращения: 15.06.2021).
 9. Международная морская организация (International Maritime Organization): [сайт]. URL: <http://www.imo.org/en/About/Conventions/Pages/Action-Dates.aspx>
 10. Приложение VI (пересмотренное) к Конвенции «Правила предотвращения загрязнения воздушной среды с судов» [Электронный ресурс]: МАРПОЛ 73/78. Доступ из электронного фонда правовых и нормативно-технических документов (Консорциум Кодекс).
 11. База данных Sea-Web: [сайт]. URL: <https://maritime.ihs.com>
 12. Стандарт организации: СТО ЯКУТ.23.01–2019 «Технико-экономическое обоснование проектирования, строительства и эксплуатации судов. Основные положения». СПб.: АО «ЦНИИМФ», 2019.
 13. Кельтон В. Имитационное моделирование / В. Кельтон, А. Лоу // СПб: Питер, 2004. 847 с.
 14. AnyLogic LLC: [сайт]. URL: <https://www.anylogic.com/>
 15. Справочные данные по режиму ветра и волнения Балтийского, Северного, Черного, Азовского и Средиземного морей // Российский морской регистр судоходства, 2006.
 16. Справочные данные по режиму ветра и волнения Баренцева, Охотского и Каспийского морей // Российский морской регистр судоходства, 2003.