

На правах рукописи



Мазуренко Ольга Игоревна

**РАСЧЕТ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАБОТЫ ПРОЕКТИРУЕМЫХ
МОРСКИХ УГОЛЬНЫХ ТЕРМИНАЛОВ НА ОСНОВЕ
ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Специальность 2.9.7 – «Эксплуатация водного транспорта, водные пути
сообщения и гидрография»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Русинов Игорь Александрович.

Официальные оппоненты: **Покровская Оксана Дмитриевна**
доктор технических наук, доцент,
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Петербургский
государственный университет путей
сообщения Императора Александра I»,
заведующий кафедрой «Управление
эксплуатационной работой»;

Семенов Антон Денисович
кандидат технических наук,
Акционерное общество
«ЛЕНМОРНИИПРОЕКТ» по
проектированию, изысканиям и научным
исследованиям в области морского
транспорта, инженер-технолог отдела
технологии и генерального планирования.

Ведущая организация: **Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Государственный морской
университет имени адмирала
Ф.Ф. Ушакова».**

Защита состоится «28» ноября 2024 г. в 13-30 часов на заседании диссертационного совета 45.2.003.03 при ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова» по адресу: 198035, г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, д. 5/7, ауд. 235а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова»:
https://gumrf.ru/naudejat/gna/disso_45200303/zd45200303

Автореферат разослан «__» _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Изотов Олег Альбертович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования обусловлена высокой значимостью и большим вкладом морских портов и навалочных терминалов в экономику России. В условиях постоянной конкуренции на рынке энергетические компании ведут работу по снижению стоимости предложения угля для заключения выгодных контрактов. Для целей снижения стоимости предложения большинство компаний действуют в 3 направлениях: снижение себестоимости добычи, снижение стоимости доставки в порты, снижение стоимости перевалки в портах за счёт специализации терминалов и эффекта экономии масштаба.

В РФ крупнейшие интегрированные энергетические компании активно формируют спрос как на строительство новых специализированных терминалов, так и на модернизацию уже действующих. Строительство специализированных терминалов и модернизация действующих требует значительных финансовых вложений, что определяет высокую цену принятия ошибочных проектных решений. Терминалы, спроектированные и построенные с ошибками в части компоновки и выбранного оборудования, оказываются неэффективными, что приводит к их быстрому моральному устареванию. Поэтому заказчики строительства выдвигают строгие требования к инженерным компаниям в части качества проведения проектирования. Применяемые сегодня в РФ нормы и методы проектирования терминалов, базирующиеся на устаревших методиках, утратили свою актуальность и стали препятствием для коммерческой деятельности.

Использование устаревшей нормативной базы при проведении расчетов планируемых показателей работы проектируемых терминалов приводит к ошибочным и несоответствующим реальности результатам. Стремление к повышению качества проектирования сегодня сталкивается с устаревшей нормативной базой. Низкая точность и достоверность результатов, получаемых с использованием действующей нормативной базы, подрывает доверие заказчиков к итоговым планам и цифрам, предоставляемым проектными организациями. Это порождает **противоречие** — отечественные проектные и инженеринговые компании нуждаются в научно-обоснованных современных методах и методиках расчёта показателей проектируемых терминалов в связи с тем, что существующие нормы и методики устарели, дают недостоверные результаты и не позволяют достичь требуемой точности. Однако подобных методов и методик в России сегодня нет.

Степень разработанности темы исследования. Исследования в области проектирования и развития морских портов и терминалов проводились иностранными и отечественными учёными. Среди иностранных авторов выделяются работы Lederer E., Thorensen C., Beresford A., Nagorski B., Rodrigue Jean-Paul, Barros V. H., Alderton P., Radmilovich Z.R., Legato P., Cudina P., Watanabe I., Park C.S., Gordon W. Zonailo.

Большинство исследований по данному вопросу проводилось ещё в XX веке. Основное внимание уделялось проектированию и развитию контейнерных терминалов, тогда как вопросам проектирования навалочных терминалов посвящено ограниченное количество исследований. Среди современных зарубежных авторов, занимающихся вопросами проектирования и развития навалочных терминалов, следует отметить Cuadrat M., Van den Heuvel W., Van der Goot M., Van Vianen T. В России научными проблемами эффективного проектирования и развития морских портов занимался широкий круг авторов – А. В. Галин, Д. С. Скрябин, А. Г. Черняев, В. А. Фетисов, А. В. Степанец, В. В. Устинов, К. М. Семенов, Г. Б. Попов, Л. Д. Ветренко, С. С. Валькова, Д. А. Ломаш, В. Е. Черненко, А. П. Агеев, В. В. Дерябин, А. В. Кириченко, А. Л. Кузнецов, В. И. Немчиков, О. Б. Маликов, Н. Н. Майоров, В. А. Погодин, И. А. Русинов, А. Л. Степанов, Я. Б. Спасский, Я. Я. Эглит. Вопросами эффективного проектирования и функционирования морских навалочных терминалов занимались достаточно ограниченное число авторов. Среди них следует особо отметить Р. А. Истратова, Р. Г. Король и Н. В. Купцова.

Цель диссертационного исследования – повышение эффективности организации перегрузочных процессов в перспективных и реконструируемых капиталоемких морских угольных терминалах путем рационализации расчетов показателей их работы на этапе проектирования, достигаемой методами имитационного моделирования. **Научная задача**, решение которой должно способствовать достижению цели, является разработка методики расчёта показателей работы проектируемых морских угольных терминалов, базирующейся на использовании методов имитационного моделирования, учитывающей детерминированные и стохастические факторы, влияющие на работу терминала и его грузовых фронтов, а также специфику работы морского и ж/д транспорта. Достижение сформулированной цели предполагает решение ряда **частных задач исследования**:

1. Проведения идентификации и анализа основных требований к структуре, оснащению и технологическим процессам угольных терминалов на основании оценки мирового опыта их проектирования и эксплуатации;
2. Разработки комплексной дискретно-событийной имитационной модели морского экспортного угольного терминала;
3. Разработки практической методики расчета показателей работы проектируемых морских угольных терминалов, базирующейся на модели;
4. Формулировки рекомендаций по использованию разработанной методики в качестве инструмента поддержки принятия решений при осуществлении проектирования морских угольных терминалов.

Научная новизна исследования заключается в разработке комплексной гибко настраиваемой имитационной модели специализированного объекта – морского экспортного угольного терминала, состоящего из отдельных взаимодействующих между собой технологических зон,

функционирующих под влиянием детерминированных и стохастических процессов, а также внешних факторов, зависящих от специфики работы смежного транспорта. Формируемая в исследовании практическая методика расчета показателей работы проектируемых терминалов позволит получать наглядные и подтвержденные количественные и качественные показатели работы проектируемого объекта и отдельных зон в виде постоянно уточняемых интервалов (вероятностей), проводить оценку чувствительности работы объекта к изменению условий, а также устанавливать минимальные и максимально возможные пределы показателей в различных конфигурациях.

Теоретическая значимость исследования заключается в идентификации основных требований к структуре, оснащению и технологическим процессам современных морских угольных терминалов, формулировке принципов создания модели подобных объектов, а также формировании рекомендации по использованию разработанной методики в качестве инструмента поддержки принятия решений при осуществлении проектирования перспективных и реконструируемых морских терминалов.

Практическая значимость исследования заключается в создании комплексной дискретно-событийной модели морского угольного терминала и разработке практической методики расчета показателей работы проектируемых угольных терминалов, базирующейся на разработанной модели, а также формировании рекомендаций в отношении этого инструмента при проектировании морских навалочных терминалов.

Объектом исследования является технология, организация и управление перегрузочными процессами морского угольного терминала, функционирующего на базе машин непрерывного действия и конвейерной механизации. **Предмет исследования** – методы имитационного моделирования, направленные на получение функционального диапазона количественных и качественных показателей работы морских экспортных угольных терминалов. **Границами исследования** установлена совокупность всех процессов, протекающих на морских угольных терминалах с учетом внутренних связей между технологическими зонами и фронтами, а также взаимодействия со смежными видами транспорта. **Методы исследования.** В связи с тем, что решаемая научная задача является комплексной, для ее решения помимо классификации, анализа, синтеза, обобщения, применяются и экспериментальные методы – сбор данных и их статистическая обработка. В исследовании используются расчетно-аналитические методы, базирующиеся на положениях, изложенных в «Нормах технологического проектирования портов СП 350.1326000.2018», методы теории вероятности, методы математической статистики, методы теории массового обслуживания, теории алгоритмов, а также методы имитационного моделирования. **Методология исследования** основана на системном подходе, методах ТМО, теории и практике моделирования, парадигме объектно-ориентированного программирования, методах теории вероятности и математической статистики.

Положения, выносимые на защиту:

1. Комплексная дискретно-событийная имитационная модель морского экспортного угольного терминала, реализованная в программной среде Anylogic©;

2. Результаты серий имитационных экспериментов с моделью, включая эксперименты по валидации и верификации модели, а также эксперименты с различными конфигурациями модели, позволяющее оценить чувствительность и устойчивость проектных решений;

3. Методика расчета показателей работы проектируемых морских угольных терминалов, базирующаяся на разработанной имитационной модели;

4. Рекомендации по использованию методики в качестве инструмента поддержки принятия решений при осуществлении проектирования перспективных и реконструируемых морских угольных терминалов.

Степень достоверности результатов подтверждается проведенным анализом существующих научных работ по предмету исследования, использованием апробированных моделей и методов, сходимостью расчетных величин с имеющимися статистическими данными работы реальных терминалов, доказанным совпадением результатов, приведенных в исследовании, с результатами, полученными другими существующими методами в пределах применимости последних.

Апробация результатов работы. Основные положения и результаты доложены и обсуждены на научно-практических конференциях: XVII Международная научно-практическая конференция «Логистика: современные тенденции развития», г. Санкт-Петербург, 12-13.04.2018; II Международная научно-практическая конференция «Порто-ориентированная логистика», г. Санкт-Петербург, 1-2.11.2018; XVIII Международная научно-практическая конференция «Молодежь и наука» г. Алматы, 28.03.2019; научно-практическая конференция профессорско-преподавательского состава ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова», г. Санкт-Петербург, 16.09 – 25.10.2019; XV Международная научно-техническая конференция «Проблемы морского транспорта», г. Баку, 7-8.05.2020. Результаты исследования изложены в 8 научных работах, 6 из которых опубликованы в рецензируемых научных изданиях из списка рекомендованных ВАК Минобрнауки России. По результатам исследований зарегистрирована программа для ЭВМ в Федеральной службе по интеллектуальной собственности под № RU 2022614960 от 28.03.2022.

Структура и объем работы определены целью и задачами исследования. Диссертационное исследование включает в себя введение, 3 раздела, заключение, перечень сокращений и условных обозначений, список литературы. Список источников – 140 наименований. Общий объем работы – 197 с., в том числе 20 таблиц и 79 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** определена цель работы, научная задача и частные задачи, предмет и объект исследования, обоснована актуальность работы, её научная новизна, отражены положения, выносимые на защиту.

В **первом разделе** проведена оценка тенденций угольной промышленности, выполнен анализ структуры, оснащения и технологических процессов угольных терминалов в портах, проведена оценка состояния, оснащения и перспектив угольных терминалов в РФ, выполнена оценка степени научной разработанности проблемы.

Установлено, что в XXI в. уголь продолжает играть важнейшую роль в мировой экономике и остаётся одним из основных источников энергии. В структуре потребления энергетических ресурсов в 2023 г. доля угля – 28%. Мировое потребление угля стабильно растёт. В 2022 г. добыча и потребление угля в мире составили 8,803 млрд. т, что на 8% выше 2021 г. В 2023 г. – уже 8,7 млрд т. Крупнейшие потребители – Индия и Китай. Наибольшее количество также добывается в Китае, Индии и Индонезии. Морские международные перевозки угля стабильно растут – 1,2 млрд т (+6% к 2022 г.).

При морских перевозках угля его перевалка на суда осуществляется на перегрузочных комплексах 2 типов: универсальных, использующих машины циклического действия (МЦД), и специализированных, использующих машины непрерывного действия (МНД). Достоинство универсальных – обратимость (возможность осуществлять экспорт и импорт), и относительно низкая себестоимость. Недостаток – низкая производительность. Эксплуатация универсальных комплексов оправдана при грузообороте <3 млн т/г. Вследствие этого они повсеместно заменяются специализированными. На 9 крупнейших производителей угля (Индонезию, Австралию, Китай, ЮАР, США, Канаду, Индию, Россию и Колумбию) приходится 75% портовых мощностей его по перевалке (41% в Индонезии и Австралии).

В России в 2023 г. добыто 438 млн т угля, из них экспорт – 212,5 млн т (-3,9%). Россия экспортирует уголь в 50 стран. Крупнейшие покупатели – Китай (100 млн т или +42%) и Индия (15 млн т или -6%). При этом более 70% угля добывается в Сибири, откуда транспортируется по сети железных дорог на расстояния ≈ 4500 км в адрес морских портов. В 2023 г. в РФ функционируют 43 морских угольных терминала. Большинство из них – 32, используют МЦД.

8 крупнейших терминалов являются специализированными и переваливают >15 млн т/год. Более 60% угля переваливается в портах Дальнего Востока. Наибольшие объёмы на терминалах «АО Восточный Порт» (25,5 млн т), АО «Дальтрансуголь», АО «ВаниноТрансУголь», АО «Порт Ванино». Крупнейший терминал – ООО «ОТЭКО Портсервис» в порту Тамань (30 млн т). На 3 месте – АО «Ростерминалуголь» в Усть-Луге (21,6 млн т).

В международной практике вопросы проектирования морских навалочных терминалов не регламентированы едиными стандартами и решаются инжиниринговыми компаниями индивидуально на базе прогрессивных методов вычислений. В отечественной практике проектирования применяют СП 350.1326000.2018 «Нормы технологического проектирования морских портов», которые обладают существенными недостатками и слабо охватывают вопросы расчета показателей работы терминалов. В работах отечественных авторов – А.В. Галина, Я.Б. Спасского, С.С. Вальковой, А.В. Кириченко, А.Л. Кузнецова, О.Б. Маликова, Н.Н. Майорова, И.А. Русинова обосновано использование моделирования, как прогрессивного и адекватного инструмента при осуществлении проектирования и планирования работы морских портов.

Проведенный анализ специфики морских угольных терминалов и оценка степени научной разработанности проблемы позволили уточнить цель и сформулировать частные задачи исследования.

Во **втором разделе** для решения научной задачи принята парадигма дискретно-событийного имитационного моделирования, позволяющая представлять процесс работы терминала с точки зрения потока технологических операций – прибытия ж/д состава с углем, выгрузки на склад, штабелирования, погрузки на суда и т.д. Ядро моделирования - компьютерная модель, в которой реализованы и описаны машинным языком алгоритмы, элементы, системы, их связи, имитирующие процессы, происходящие внутри моделируемого терминала.

Использование дискретно-событийного моделирования позволяет представлять технологические операции и процессы терминала и проводить эксперименты в различных режимах работы, что даёт возможность сформулировать методику расчёта, учитывающую детерминированные и стохастические факторы, влияющие на работу терминала и его грузовых фронтов, а также специфику работы смежного транспорта.

В отечественной транспортной науке отсутствуют примеры аналогичных моделей в опубликованных исследовательских работах.

Поставлена следующая цель имитационного моделирования – создание компьютерной модели (симулятора) морского экспортного угольного терминала, пригодной для проведения имитационных экспериментов, позволяющих отслеживать динамику изменения состояния и показателей работы угольного терминала.

Получаемые по результатам моделирования данные должны содержать верифицированные сведения о динамике результатов работы моделируемого объекта при изменении входящих параметров. Задача компьютерной модели – служить инструментом поддержки принятия решений на этапе проектных разработок при осуществлении проектирования новых морских угольных терминалов, а также при осуществлении модернизации оборудования и технологических процессов уже действующих.

Временные рамки моделирования – 1 год, единица модельного времени – 1 час. Разработанная концептуальная модель (рис. 1) базируется на концепции ориентирования на объекты и позволяет выстраивать модель как набор взаимодействующих и параллельно протекающих процессов. В качестве инструмента моделирования выбран пакет ПО Anylogic© University Researcher.



Рисунок 1 – Концептуальная схема модели угольного терминала

Разработанная модель состоит из 3 виртуальных взаимосвязанных технологических зон (блоков) – зона тылового железнодорожного грузового фронта (ЖГФ; моделирует поступления ж/д составов, выгрузку вагонов на станции разгрузки (СРВ) и убытие порожних), зона открытого склада (СК; моделирует работу складской зоны, стакеров/реклаймеров и конвейеров), зона морского грузового фронта (МГФ; моделирует работу причалов и причальных погрузочных машин (СПМ), прибытие, очереди, погрузку и убытие морских судов).

Концептуальная модель ориентирована на возможности данного пакета. Разработанная компьютерная модель зарегистрирована в Федеральной службе по интеллектуальной собственности под № RU2022614960 от 28.03.2022.

В процессе разработки модели первым был реализован модуль технологической зоны ЖГФ. С помощью средств пакета ПО Anylogic© в рабочем окне агента «*Main*» было реализовано 6 основных зон:

- зона «*view2D*»: графический план терминала, ландшафт среды, элементы инфраструктуры, связи между функциональными элементами;
- зона «*viewLogic*»: реализация логики поведения модели с использованием встроенных блоков ПО Anylogic© и скриптов, написанных на языке JavaScript;
- зона «*view3D*»: трехмерная визуализация плана терминала, позволяющая в режиме «летающей камеры» перемещаться по модели;
- зона «*view3DMultiple*»: компоновка камер обзора трехмерной реализации зоны «*view3D*», визуализирующая участки модели;
- зона «*viewControl*»: главное окно управления моделью, в котором реализовано управление всеми настраиваемыми параметрами;
- зона «*viewStat*»: результаты работы имитационной модели, представленные в виде графиков, и табло итоговых показателей работы.

Реализация логики поведения моделируемого ЖГФ выполнена с помощью «Железнодорожной библиотеки» ПО Anylogic©. В зоне «*view2D*» с помощью элементов разметки пространства прорисован план, структура и связи (ж/д пути, стрелки, развязки) ЖГФ терминала. В зоне «*viewLogic*» с помощью блоков «Железнодорожной библиотеки» ПО Anylogic© и дополнительных скриптов, написанных машинным языком JavaScript, задана логика работы модуля технологической зоны ЖГФ (рис. 2):

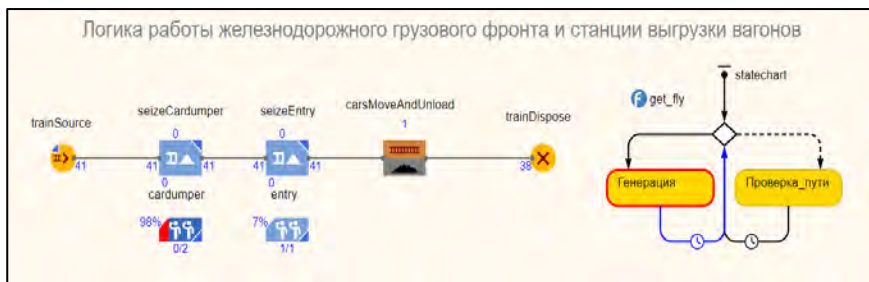


Рисунок 2 – Блок-схема логики модуля зоны тылового грузового фронта

Блоки логики, изменяющие материальные потоки и моделирующие выгрузку, приведены внутри блока – *CarsMoveAndUnload*. Он симулирует работу СРВ, состоящей из комплекса 2 тандемных ВО и 2 вагонных трансбордеров.

В зоне «*view3D*» реализована трехмерная визуализация графического плана модели, позволяющая в режиме «летающей камеры» перемещаться по симуляции. На рис. 3 представлен момент подачи груженных вагонов под выгрузку на СРВ:

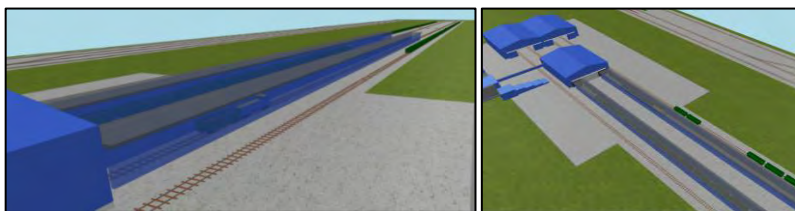


Рисунок 3 – 3D визуализация подачи вагонов под выгрузку на СРВ

В зоне «*viewStat*» реализован интерфейс управления указанным блоком имитационной модели (рис. 4), а также представлены графики результатов работы модели ЖГФ в режиме реального времени (рис. 5).

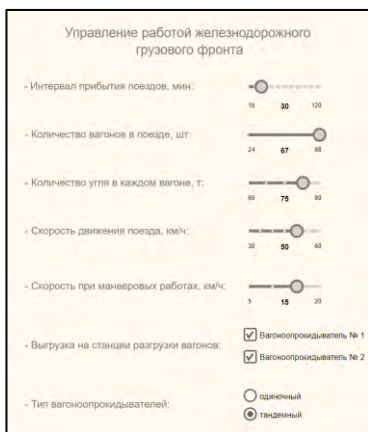


Рисунок 4 – Интерфейс окна управления блоком модели

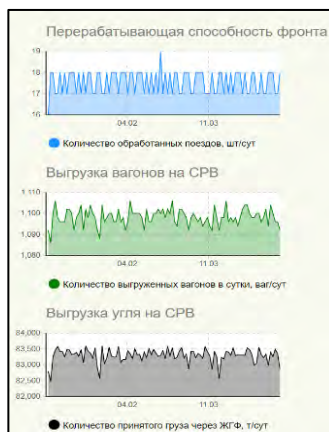


Рисунок 5 – Экран результатов работы блока модели

Далее в модель был добавлен блок зоны склада терминала – буфера, сглаживающим неравномерности грузопотока между сухопутным и морским транспортом. В модели используется открытый склад, уголь на нём размещается в виде отдельных штабелей. Выбор размера и компоновки склада является задачей проектирования, решенной в исследовании. Размер склада составляет порядка 2,5-3% планируемого годового грузооборота. Штабеля формируются по 2 вариантам: либо из угля одной марки, либо из угля одной коносаментной партии. Количество груза, хранимого на складе, может сильно меняться в течение суток в связи со стохастической природой транспортных процессов, степень влияния которых можно определить только с использованием симуляции. Операции по складированию и забору груза из штабелей выполняется МНД – комбинированными укладчиками (стакерами) и заборщиками (реклаймерами) на рельсовом ходу (С-Р).

Эксплуатационная производительность С-Р подбирается под производительность конвейеров и МНД. Среднее значение эксплуатационной коэффициента составляет для стакеров – 0,5-0,65, для реклаймеров – 0,4-0,8. С-Р соединены с конвейерной сетью, состоящей из нескольких ленточных конвейеров, связанных между собой в «маршруты», соединяющие различные участки терминала. Между собой конвейеры соединяются в пересыпных станциях (ПС). В зоне «view2D» модели проведена прорисовка технологической зоны склада: нарисована композиционная структура и внутренние связи склада: конвейеры, ПС, С-Р, ряды и штабели угля (рис. 6).

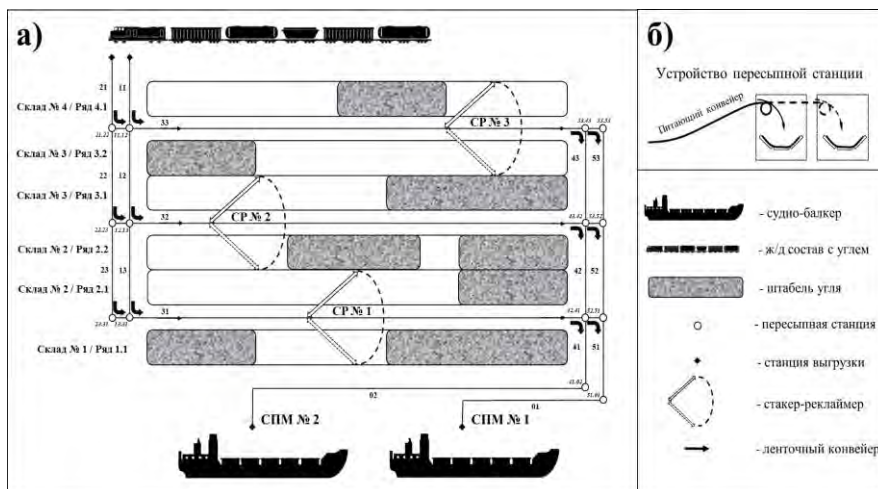


Рисунок 6 – План технологической зоны склада терминала (а – план склада и основные техсредства, б – принцип работы пересыпных станций)

В зону «viewLogic» с помощью «Библиотеки моделирования процессов» и «Библиотеки моделирования потоков» ПО Anylogic© добавлен алгоритм работы склада угольного терминала (рис. 7).

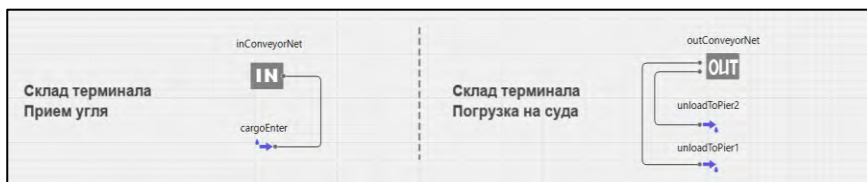


Рисунок 7 – Блок-схема логики модуля склада морского терминала

Материальный поток в модели – партии сыпучего груза угля. Движение потоков груза отражается как на 2-мерном плане, так и в 3D. В блок склада груз попадает из ЖГФ через блок логики «cargoEnter», а затем направляется

в нестандартный блок «*InConveyorNet*». Далее автоматически выбирается склад, на который отправляется партия для хранения. Всего в модели реализовано 4 склада – № 1-4. Они отличаются местоположением и размером. Физические общие размеры моделируемого склада – 820х420 м. Размер рядов 1.1 и 4.1 – 800х30 м. Размер рядов 2.1, 2.2, 3.1 и 3.2 – 800х60 м. Склады № 1 и 4 по краям зоны и имеют вместимость, равную параметру «*smallStorageCapacity*». Склады № 2 и 3, расположены в центре и имеют вместимость «*largeStorageCapacity*». Каждый склад обслуживается С-Р: склад № 1 – С-Р № 1; склад № 2 – С-Р № 1 и № 2, склад № 3 С-Р № 2 и № 3, склад № 4 С-Р № 3. Принцип загрузки складов — поочередный, от ближайшего к причальной линии (№ 1), к наиболее удаленному (№ 4). С-Р последовательно работают на укладку и забор угля. Склады в модели представлены в агенте «*Main*» в зоне «*view2D*» в виде контейнеров: «*coal_storage_1*», ..., «*coal_storage_4*».

В зонах «*viewControl*» и «*viewStat*» (рис. 8, 9) в блоке склада добавлены элементы управления конфигурацией склада, а также представлены графики показателей работы склада: ежесуточный учет количества угля и мониторинг текущей загруженности участков.

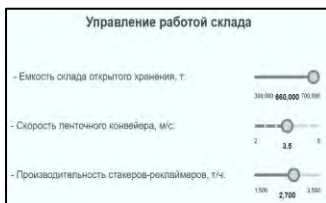


Рисунок 8 – Интерфейс окна управления блоком



Рисунок 9 – Экран результатов работы блока склада имитационной модели

Далее в модель добавлен блок МГФ. На терминале суда, используемые для перевозки угля, обслуживаются у причальной стенки. На основе статистики АО «Ростерминалуголь» и АО «Дальтрансуголь» за 2018-2021 гг. были определены типовые ТТХ судов, обслуживаемых у причалов. Для симуляции выбраны суда дедевейтом от 50 до 100 тыс. т. В модели за основу МГФ была взята его конфигурация на терминале АО «Ростерминалуголь». Компоновка и схема МГФ терминала АО «Ростерминалуголь» является типовой для специализированных угольных терминалов по всему миру:

- непрерывная причальная линия длиной 800 м с 2-мя выделенными местами для швартовки судов (причалы №1 и №2) и 2-мя судопогрузочными машинами (СПМ) с подъемной неповоротной стрелой (СПМ №1 и №2);
- эксплуатационная производительность СПМ соответствует производительности стакеров-реклаймеров – 1500 – 3500 т/ч.;
- целевая пропускная способность МГФ составляет $\approx 10\text{--}30$ млн т/год (в зависимости от выбранных режимов и комбинаций оборудования).

В зоне «**view2D**» рабочего окна агента «**Main**» с помощью элементов разметки пространства Anylogic© был прорисован план МГФ моделируемого терминала, нанесены основные элементы, машины и механизмы МГФ, а также нарисованы связи между элементами. В зоне «**viewLogic**» на базе «Библиотеки моделирования процессов» и «Библиотеки моделирования потоков» с использованием блоков ПО Anylogic© и скриптов, написанных языком JavaScript, прописана логика поведения МГФ (рис. 10). Цифровая модель МГФ терминала позволяет получать данные о показателях работы МГФ с различными вариантами компоновки: суточную и годовую пропускную способность, время обработки судов, количество погруженных судов.

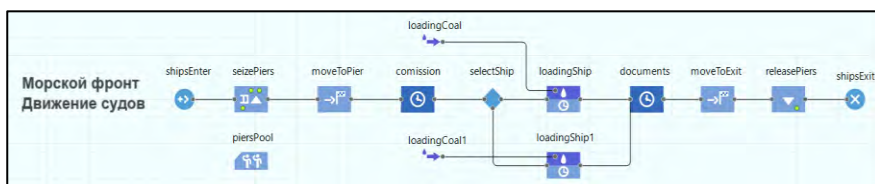


Рисунок 10 – Блок-схема логики модуля МГФ угольного терминала

В зонах «**viewControl**» реализовано управление параметрами МГФ. В зоне «**viewStat**» реализовано представление результатов работы модели МГФ в режиме реального времени в виде графиков, а также организован подсчет итоговых показателей деятельности МГФ и работы терминала в целом (рис. 11, 12):



Рисунок 11 – Интерфейс окна управления блоком МГФ модели



Рисунок 12 – Экран результатов работы блока МГФ модели

Поток заявок в блоке – движение агентов (судов) случайной вместимости. Модельное отражение движения потока заявок – сменяющиеся фазы иницирования, их прерывание, задержка и обработка на участках движения, а затем и выход агентов из среды с измененными итоговыми показателями. Блоки логики, направляющие потоки угля на МГФ, соединены в нестандартном блоке – «**outConveyorNet**».

В нестандартный блок «*OutConveyorNet*» груз угля попадает со склада терминала в агенте «*Main*» через блоки логики «*enterStorage1*», ..., «*enterStorage4*», а затем направляется со склада в адрес причалов, попадая в блоки логики «*unloadToPier1*» и «*unloadToPier2*», которые затем перенаправляют потоки в блоки – «*loadingCoal*» и «*loadingCoal1*».

В третьем разделе выполнена оценка качества модели, её верификация и валидация. В целях оценки адекватности разработанной модели проведено 3 серии экспериментов (по 100 прогонов), в которых модель в среде Anylogic© максимально возможно точно конфигурировалась под параметры терминалов АО «Ростерминалуголь» (I), АО «Дальтрансуголь» (II) и АО «ВаниноТрансУголь» (III). В I серии экспериментов полученный расчетный средний результат показателя грузооборота (медиана) – 24,5 млн т (рис. 13, 14). Значение для АО «Ростерминалуголь» за 2019-2021 гг. – 25,2 млн т. Сходимость результатов – 97%, ошибка вычислений – 3%.

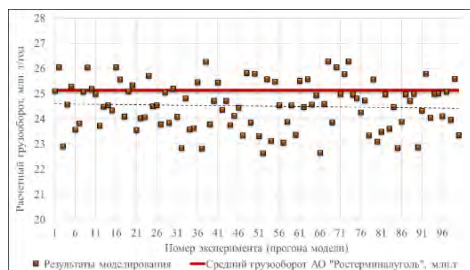


Рисунок 13 – Распределение значений грузооборота в I серии экспериментов

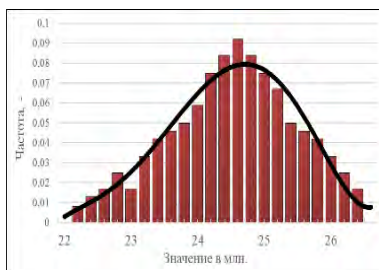


Рисунок 14 – Плотность вероятности грузооборота

Сходимость полученных расчетных результатов показателей количества разгруженных вагонов и погруженных судов-балкеров со статистикой АО «Ростерминалуголь» за 2019-2021 гг. составили 96,4% и 94,5%, ошибка вычислений 3,6% и 5,5% соответственно. Диапазон полученных результатов моделирования свидетельствует об адекватности модели.

Во II серии экспериментов полученный расчетный средний результат показателя грузооборота (медиана) – 20,4 млн. т (рис. 15, 16). Значение для АО «Дальтрансуголь» за 2019-2021 гг. – 21,12 млн т. Сходимость результатов – 96,5%, ошибка вычислений – 3,5%.

Сходимости полученных результатов показателей количества разгруженных вагонов и погруженных судов со статистикой АО «Дальтрансуголь» за 2019–2021 гг. составили 96,1% и 95,7%, ошибка вычислений 3,9% и 4,3% соответственно. Диапазон полученных результатов также свидетельствует об адекватности модели.

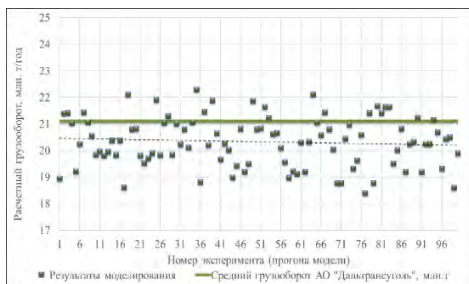


Рисунок 15 – Распределение значений грузооборота в II серии экспериментов

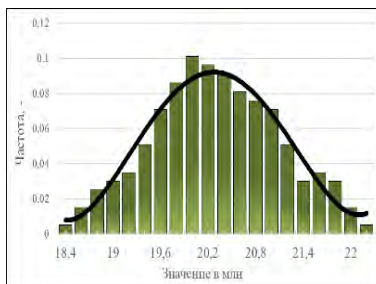


Рисунок 16 – Плотность вероятности грузооборота

В III серии полученный результат показателя грузооборота (медиана) – 10,53 млн. т (рис. 17, 18). Значение для АО «ВаниноТрансУголь» за 2021 г. – 11,1 млн. т. Сходимость результатов – 94,6%, ошибка вычислений составляет порядка 5,4%.

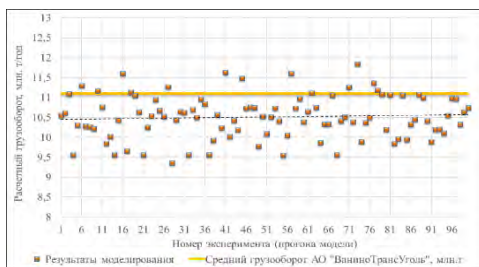


Рисунок 17 – Распределение значений грузооборота в III серии

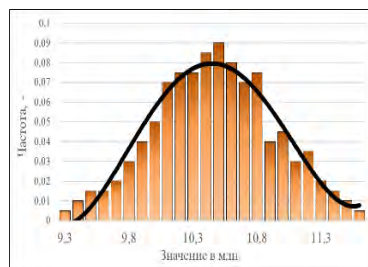


Рисунок 18 – Плотность вероятности грузооборота

Сходимости результатов показателей количества разгруженных вагонов и погруженных судов со статистикой АО «ВаниноТрансУголь» за 2021 г. – 94,5% и 94,7%, ошибка – 5,5% и 5,3% соответственно. Диапазон свидетельствует об адекватности модели.

Далее проведено исследование чувствительности модели (для I варианта) (рис. 19), которое показало значительное влияние на итоговые показатели работы терминала интенсивности выгрузки груза угля на СРВ терминала. Влияние также оказывает эксплуатационная производительность МНД (–24,7% при минимальной, +17,4% при максимальной), тип работающих ВО на СРВ (–12,5% при одиночном, +10,4% при tandemном), количество причалов (–9,5% при 1 причале, +12,9% при 2) и т.д.

Таким образом, модель является адекватной, т.к. обеспечена высокая степень сходимости результатов с реальной статистикой в, и устойчивой, т.к. модель сохраняет работоспособность и адекватность при изменении

исходных параметров. Модель обладает доказанной высокой точностью и степенью соответствия реальным терминалам, что делает её валидной.

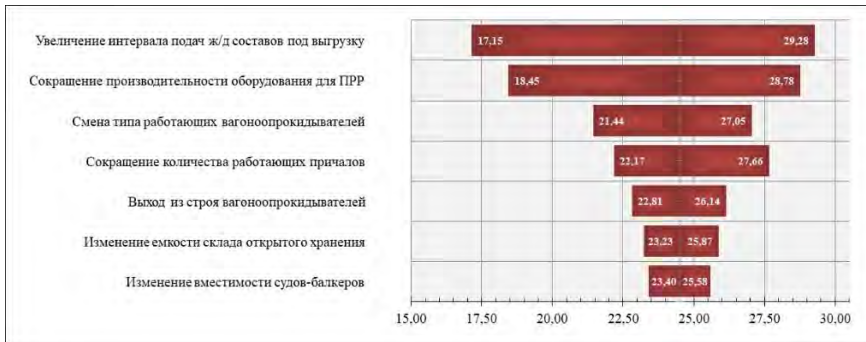


Рисунок 19 – Анализ чувствительности имитационной модели

Далее с целью установления пригодности разработанной модели, как инструмента поддержки принятия решений была проведена ещё одна серия имитационных экспериментов, объединенных в 4 группы в зависимости от конфигураций: I – минимально оснащенный терминал (грузооборот до 10 млн т/г.), II – средне оснащенный (грузооборот до 15 млн т/г.), III – выше среднего (грузооборот до 20 млн т/г.), IV – максимально оснащенный (грузооборот до 30 млн т/г.). Расчетные экспериментальные данные о количественных показателях работы модели за 1 год позволяют оценивать грузооборот, грузооборот и вагонооборот моделируемого в 4 конфигурациях терминала с учетом различной интенсивности поступления составов и выгрузки угля на СРВ. Анализ данных позволил определить зависимость грузооборота терминала от интенсивности поступления груза на ЖГФ (рис. 20).

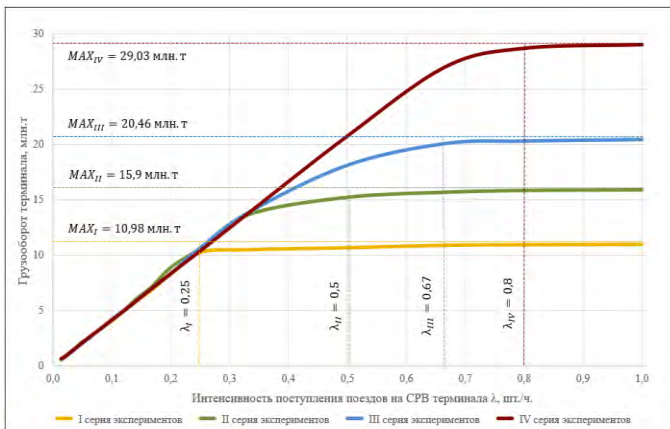


Рисунок 20 – Зависимость грузооборота от интенсивности выгрузки на СРВ

Полученные данные также позволили оценить судооборот терминала в 4 конфигурациях и его зависимость от интенсивности поступления груза ж/д транспортом и выгрузки угля на СРВ (рис. 21).

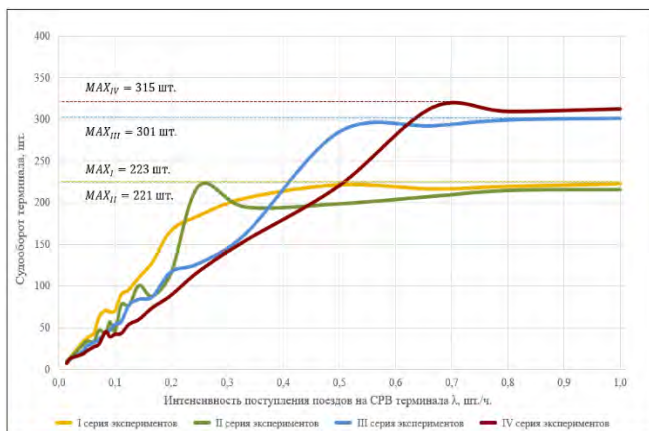


Рисунок 21 – Зависимость судооборота от интенсивности выгрузки на СРВ

Экспериментальные данные позволяют оценивать и качественные показатели работы: коэффициент занятости причала – $k_{МП}$, отражающий качество использования ресурсов терминала по причальному фронту (рис. 22), и коэффициент занятости СРВ – $k_{СРВ}$, отражающий качество использования ресурсов терминала по ЖГФ (рис. 23).

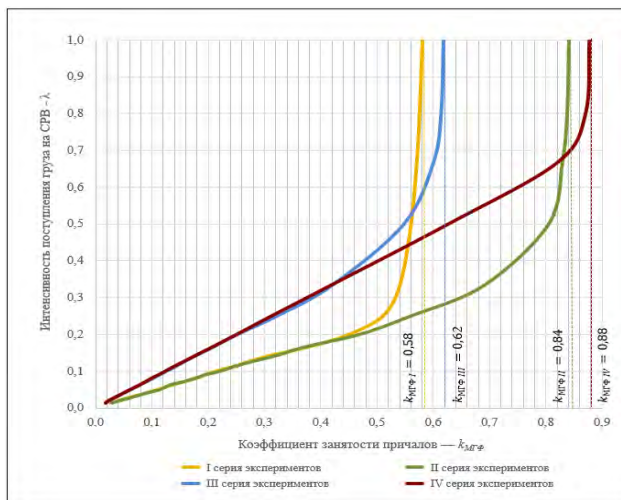


Рисунок 22 – Интенсивность поступления угля на СРВ как функция занятости причалов

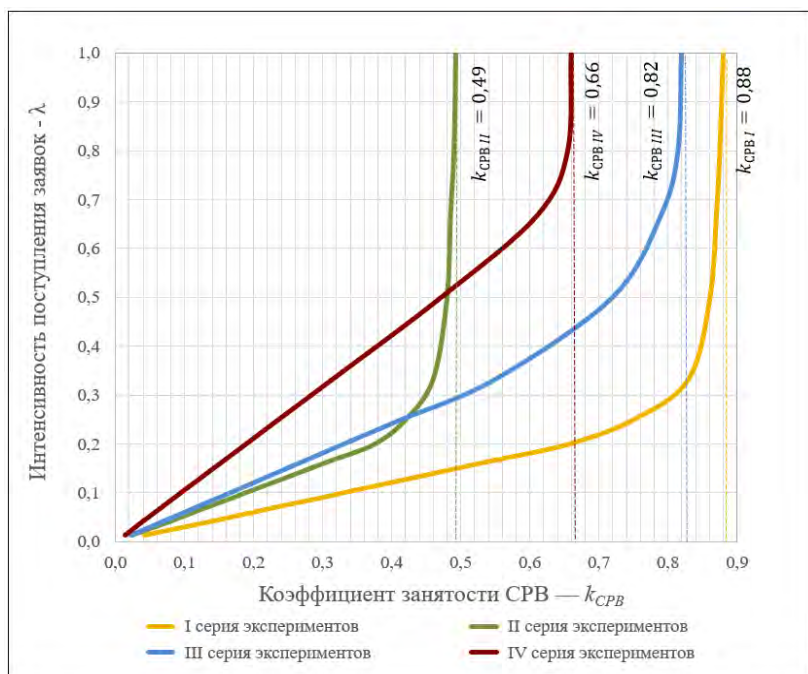


Рисунок 23 – Интенсивность поступления груза на СРВ как функция занятости ЖГФ

Руководствуясь полученными результатами, экспериментально установлена пригодность модели для расчета количественных и качественных показателей работы морских угольных терминалов и их фронтов. На основании опыта имитационного моделирования сформулирована методика расчета показателей работы морских угольных терминалов (рис. 24).

Доказана её пригодность как инструмента поддержки принятия решений. Определено место и даны рекомендации по использованию разработанной методики в процессе решения задачи проектирования морских угольных терминалов (рис. 25). Использование разработанной в настоящем исследовании методики целесообразно при осуществлении внутреннего проектирования угольных терминалов.

В процессе осуществления проектирования рекомендуется использовать метод последовательных приближений. Таким образом каждый цикл и этап проектирования позволит более точно определять функции элементов и проекта в целом, а также устанавливать необходимость дополнительной проработки его узлов или отдельных частей.

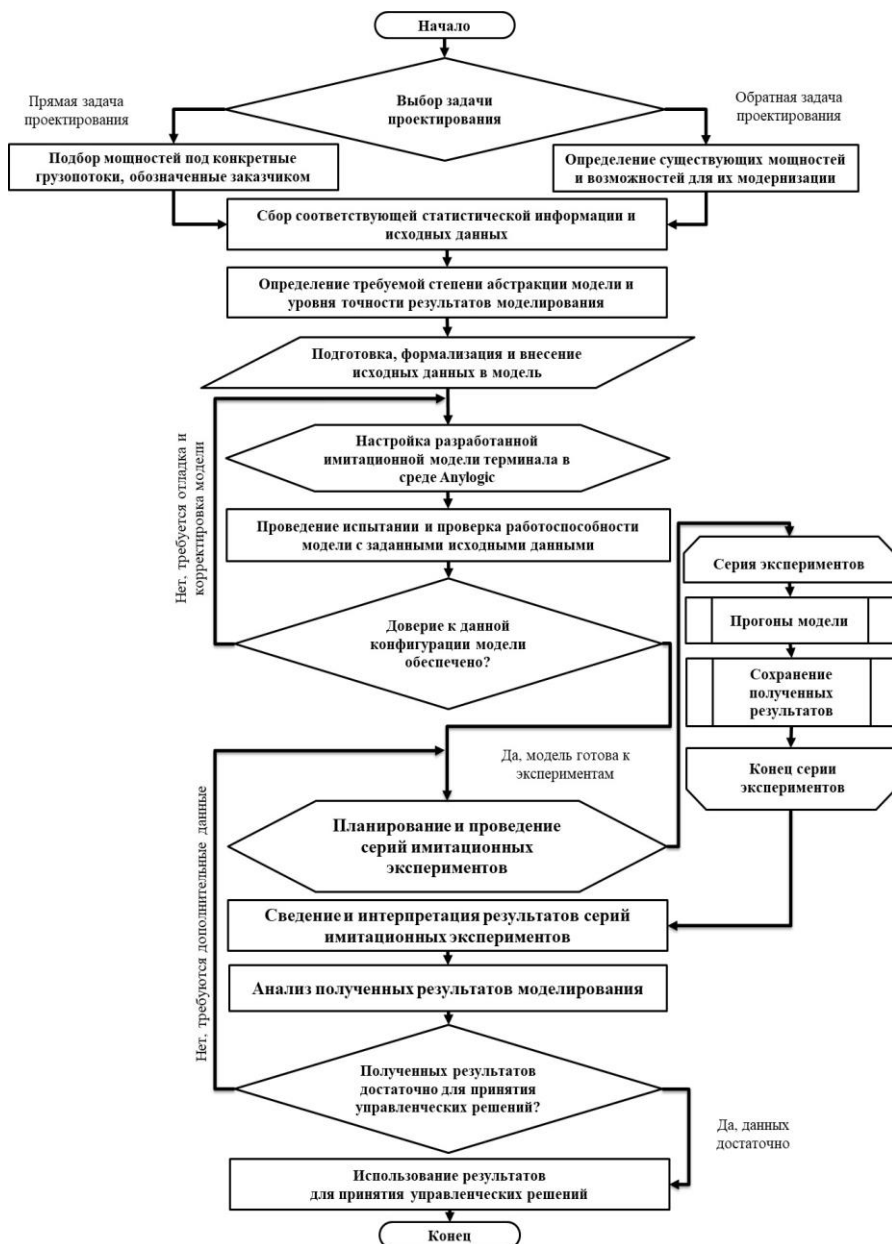


Рисунок 24 – Блок-схема методики расчета показателей работы проектируемых морских экспортных угольных терминалов

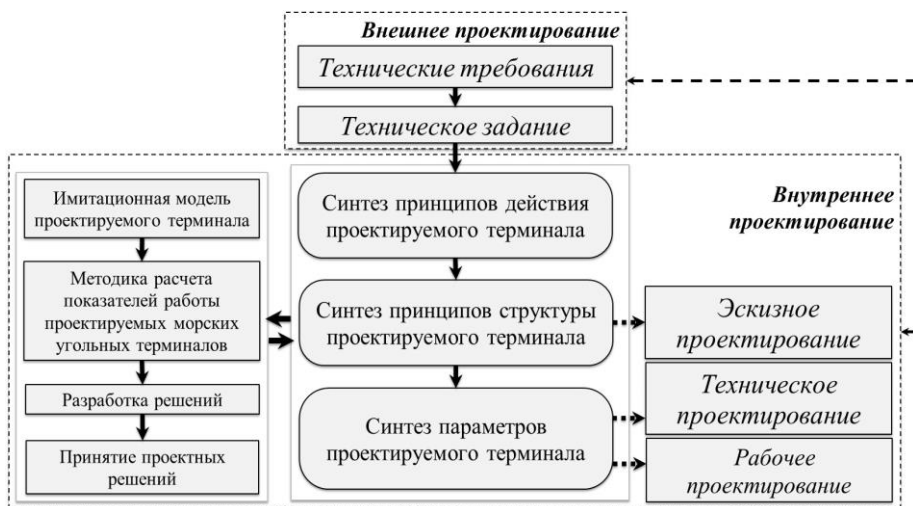


Рисунок 25 – Место разработанной методики в процессе проектирования морских экспортных угольных терминалов

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В исследовании создана и апробирована методика расчета показателей работы проектируемых морских экспортных угольных терминалов, базирующаяся на имитационной модели. Применение моделирования позволило качественно повысить точность расчета показателей работы моделируемого терминала и увеличило степень соответствия реальным прототипам.

Разработанная модель и базирующаяся на ней методика реализованы в программном виде и содержат рекомендации по их применению в качестве готового инструмента поддержки принятия решений при осуществлении проектирования терминалов.

Направления развития исследования – уменьшение уровня абстракции модели, повышение детализации операционных процессов, использование дополнительных модулей агентного моделирования, интеграция расписания движения судов и ж/д составов, внедрение технологических перерывов обслуживания оборудования и МНД.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Работы, опубликованные в журналах перечня ВАК:

1. Мазуренко, О. И. Анализ современного состояния и перспектив развития морских угольных терминалов портов России / О.И. Мазуренко, И.В. Русинов // Транспортное Дело России. – 2020. – №4. – С. 154-159.

2. Мазуренко, О. И. Моделирование тылового грузового фронта морского угольного терминала / О. И. Мазуренко, И. А. Русинов // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. – 2021. – Т. 13. – № 5. – С. 636-650.

3. Мазуренко, О. И. Дискретно-событийное имитационное моделирование склада морского угольного терминала в среде Anylogic / О. И. Мазуренко, И. А. Русинов // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. – 2022. – Т. 14. – № 2. – С. 181-198.

4. Мазуренко, О. И. Дискретно-событийное моделирование морского грузового фронта экспортного угольного терминала в среде Anylogic / О. И. Мазуренко, И. А. Русинов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. – 2022. – № 2. – С. 102-114.

5. Мазуренко, О. И. Методика расчета показателей работы проектируемых морских экспортных угольных терминалов на основе имитационной модели / О. И. Мазуренко, И. А. Русинов, С. С. Павленко // Транспортное дело России. – 2022. – № 4. – С. 181-188.

6. Мазуренко, О. И. Разработка рекомендаций по использованию методики расчета показателей работы проектируемых морских экспортных угольных терминалов, базирующейся на имитационной модели, в качестве инструмента поддержки принятия проектных решений / О. И. Мазуренко, И. А. Русинов, С. С. Павленко // Транспортное дело России. – 2023. – № 4. – С. 122-129.

Работы, опубликованные в других изданиях:

7. Мазуренко, О. И. Оценка мирового опыта оснащения и эксплуатации экспортных перегрузочных комплексов по перевалке угля в морских портах / О. И. Мазуренко // Научное обозрение. Технические науки. – 2020. – № 5. – С. 48-57.

8. Мазуренко, О. И. Обоснование использования дискретно-событийного имитационного моделирования для планирования работы грузовых фронтов морских угольных терминалов / О.И. Мазуренко // Научное обозрение. Технические науки. – 2021. – № 2. – С. 11-15.

Свидетельства о государственной регистрации:

9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022614960 Российская Федерация. Имитационная модель морского экспортного угольного терминала: № 2022613773: заявл. 15.03.2022; опубл. 28.03.2022/ Мазуренко О. И., Павленко С. С.; заявители: ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова», ОАО «РЖД». – 1 с.