

На правах рукописи



Зайкин Дмитрий Аркадьевич

**ПЛАНИРОВАНИЕ РАБОТЫ ФЛОТА ОБЕСПЕЧЕНИЯ МОРСКОЙ  
ЛЕДОСТОЙКОЙ СТАЦИОНАРНОЙ ПЛАТФОРМЫ МЕТОДАМИ  
ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

05.22.19 – Эксплуатация водного транспорта, судовождение

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2019

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  
**Кириченко Александр Викторович**

Официальные оппоненты: **Маликова Татьяна Егоровна**  
доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Морской государственный университет имени адмирала Г. И. Невельского», профессор кафедры теории и устройства судна.

**Майоров Николай Николаевич**  
кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения», доцент кафедры системного анализа и логистики.

Ведущая организация: Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования «Военный учебно-научный центр Военно-морского флота «Военно-морская академия имени Адмирала Флота Советского Союза Н. Г. Кузнецова».

Защита состоится «26» сентября 2019 года в 15-00 часов на заседании диссертационного совета Д223.009.05 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 ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова  
[https://gumrf.ru/useruploads/files/dissovet/d22300905/Diss\\_Zaykin DA.pdf](https://gumrf.ru/useruploads/files/dissovet/d22300905/Diss_Zaykin DA.pdf)

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совет



Изотов Олег Альбертович

## **Общая характеристика работы**

Актуальность темы исследования. Проект, каким является освоение арктического шельфа, должен рассматриваться как сложная, многоуровневая, иерархически организованная система, функционирование которой включает в себя процессы разного характера и генезиса: транспортные, технологические, природные, управленческие. В качестве структурных элементов такой системы выступают суда (как транспортные, так и обеспечения), обладающие различными ледовым классом и ледопродолжительностью, стационарные и мобильные ледостойкие морские объекты (платформы, буровые установки, плавучие установки и т. д.), оборудованные средствами грузообработки и хранилищами грузов и осуществляющие те или иные производственные процессы (бурение, добыча и т. д.), береговая инфраструктура (базы снабжения, диспетчерские пункты и пр.). Указанные элементы взаимосвязаны, поскольку технологические процессы протекают совместно.

Кроме того, функционирование системы происходит во внешней среде, образованной процессами антропогенного характера, разделяемыми на две основные группы:

- процессы морской логистики (транспортировка и погрузка/выгрузка добываемых ресурсов и грузов обеспечения);
- технологические процессы жизненного цикла шельфового сооружения как производственной системы.

Специфика многофункциональных шельфовых сооружений такова, что комплексный анализ эффективности их функционирования невозможно произвести, рассматривая эти группы процессов изолированно и независимо. Технологические процессы не только определяют структуру грузопотоков ввоза и вывоза материально-технических средств (необходимых для обеспечения производства и жизнедеятельности), но и формируют среду взаимодействия транспортных потоков. Среди них необходимо выделить конкуренцию транспортных судов и судов снабжения за одни и те же ресурсы (причалы терминалов, средства грузообработки, погодные окна, потребности в оперативной корректировке планов рейсов при опасности переполнения или критического опустошения хранилищ грузов и т. д.) Фактор взаимовлияния различных процессов существенно влияет на производительность любой транспортной системы, но становится особенно актуальным в случае арктических морских систем, что объясняется сложностью судоходства и существенной динамичностью ледовой обстановки.

Требование учета всего комплекса описанных процессов для адекватной оценки эффективности работы существующих и проектируемых транспортно-технологических систем освоения шельфа делает практически невозможным использование для этой цели упрощенных качественных или аналитических подходов, традиционно составляющих методологический базис для лиц, принимающих решение. Единственной альтернативной формированию надежного инструментария для этой цели на сегодняшний день является технология имитационного моделирования, предполагающая создание дина-

мической исполнимой компьютерной модели изучаемой морской транспортно-технологической системы (МТТС).

Типичным примером такой системы является морская ледовая стационарная платформа (МЛСП) «Приразломная». Впервые в современной практике МЛСП автономно осуществляет все необходимые технологические операции – бурение скважин, добычу, хранение, отгрузку нефти на танкеры, выработку тепловой и электрической энергии. Важной особенностью эксплуатации является то, что платформа использует собственные хранилища для добытой и отгружаемой нефти и не имеет возможности использовать в критических ситуациях береговой резервуарный парк.

С момента ее ввода в промышленную эксплуатацию в 2014 году накоплен значительный опыт работы в области взаимодействия технологических процессов на платформе и эксплуатации флота, обеспечивающего ее работу. Практика требует повышения эффективности функционирования МЛСП, которое должно опираться на комплекс мер по снижению уровня неопределенности в управлении ею. Все это обеспечивает обширный базис первичных данных в отношении типичного и репрезентативного объекта из исследуемой области, а также предметно доказывает как актуальность темы научного исследования, так и наличие практической его значимости.

Степень разработанности темы исследования. Решению комплекса проблем в области организации транспортно-технологических систем морских и шельфовых сооружений посвящено достаточно большое количество научных и прикладных исследований. В частности, следует упомянуть работы Бацких Ю. М., Бугаева В. Г., Зимина А. Д., Кириченко А. В., Колосовой Е. А., Кондратенко А. А., Космина М. С., Крестьянцева А. Б., Кузнецова А. Л., Лубенко В. Н., Майорова Н. Н., Маликовой Т. Е., Малыханова А. А., Пашина В. М., Петрова М. П., Пичугина Д. А., Славникова А. И., Соколова В. П., Таровик О. В., Топаж А. Г., Черненко В. Е., зарубежных ученых и практиков Bergström M., Besnard F., Breinholt C., Christiansen M., Ehrke K.C., Erikstad S.O., Eskandari H., Fagerholt K., Fischer K., Gribkovskaia I., Halskau Ø., Mahmoodi E. Milaković A.S., Pantuso M. и других.

Созданные общие теоретические основы организации транспортно-технологических систем шельфовых сооружений при этом не ориентированы на целенаправленную разработку научно-методического аппарата оценки и прогнозирования работы флота обеспечения во взаимодействии с транспортным флотом, лишая методического обоснования процедуру принятия решений на этапах планирования и оперативного управления технологическим и транспортным процессами арктических шельфовых сооружений. Имея несколько другую постановку цели, выполненные исследования не в полной мере оценивают специфику взаимосвязи разнородных транспортных потоков и различных фаз перевозочного процесса с внесистемными явлениями и процессами, не учитывают автономную природу грузовых операций МЛСП.

Цели и задачи исследования. Целью исследования является повышение эффективности и надежности выполнения комплекса технологических про-

цессов и морских операций флота обеспечения МЛСП за счет выработки решений, базирующихся на использовании дискретно-событийного имитационного моделирования. Указанный подход, среди прочего, позволит определить рациональный состав флота обеспечения.

Научная задача исследования формулируется как обоснование состава и функциональных свойств системы имитационных моделей, установление их адекватности, проведение экспериментов, обеспечивающих формирование обоснованной методики планирования работы флота обеспечения МЛСП.

Решение поставленной научной задачи предполагает последовательное решение частных задач:

- определение состава основных элементов и принципиальной структуры комплексной системы частных имитационных моделей работы платформ и флота;

- разработка частных дискретно-событийных моделей технологических процессов и операций МЛСП с учетом элементов оперативного планирования на основе формирования правил динамических приоритетов;

- обоснование облика и разработка общей комплексной имитационной модели работы флота обеспечения МЛСП.

- доказательство адекватности системы моделей, формирование методики планирования работы флота обеспечения МЛСП помощью имитационного моделирования.

Объект исследования – технология, организация и управление транспортно-технологической системой обеспечения арктического шельфового сооружения, включающей в качестве компонент флот судов снабжения и флот транспортных судов, грузовые хранилища и средства грузообработки.

Предмет исследования – зависимости интегральных показателей эффективности технологических процессов работы флота обеспечения и отгрузочного оборудования многофункциональных стационарных шельфовых сооружений от влияющих природных и антропогенных факторов, используемых методов управления и мероприятий организационного и технического характера.

Данная постановка цели и задач исследования соответствует объектам 1 и 2 и области исследования 13 паспорта специальности 05.22.19 – Эксплуатация водного транспорта, судовождение.

Исследование проводится в границах транспортно-технологической системы арктических шельфовых сооружений.

Научная новизна исследования определяется тем, что на основе результатов многофакторных имитационных экспериментов, при установленной статистической достоверности, впервые получены оценки степени отдельного и совокупного влияния различных внутренних и внешних факторов на интегральные показатели эффективности функционирования транспортных систем обеспечения шельфовых арктических объектов. Установлено, что технология комплексного имитационного моделирования позволяет на содержательном уровне описать и на количественном уровне исследовать

эмерджентные свойства сложных технических систем, к которым в полной мере относится изучаемый объект.

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическая значимость определяется дальнейшим развитием основных положений общей теории систем. Разработанная методика планирования работы флота обеспечения МЛСП позволяет учитывать многообразие факторов, определяющих специфику перевозочного процесса в домене арктических шельфовых сооружений, отражает общие закономерности изменения параметров транспортных потоков в различных условиях внешней среды. Их учёт необходим при проведении целенаправленных исследований в области совершенствования планирования процессов функционирования шельфовых объектов и организации их транспортного обеспечения в ледовых условиях эксплуатационной работы.

Принципы, подходы и конкретная методика, описанные в работе, были применены для создания компьютерной системы анализа и оптимизации транспортно-технологической системы МЛСП «Приразломная». Полученный инструмент был использован для поиска адекватных технических и организационных решений, направленных на повышение ее эффективности. Результаты исследования послужили основой для принятия управленческих решений и пересмотра текущих регламентов работы платформы «Приразломная». Созданная система может найти применения при проектировании и управлении аналогичными объектами.

Методология и методы исследования. Для решения поставленных задач использованы современные методы системного анализа, теории моделирования, дискретно-событийного и агентно-ориентированного имитационного моделирования; имитация процессов случайной природы проводилась с использованием методов теории вероятностей, математической статистики и стохастического моделирования.

Положения, выносимые на защиту:

- состав и структура комплексной системы имитационных моделей функционирования МЛСП для анализа и оптимизации ее транспортно-технологической системы.
- дискретно-событийная модель операций обработки судна обеспечения у стационарного многотерминального шельфового сооружения;
- модель динамически возникающих условий доступности грузовых терминалов МЛСП по природным условиям;
- модель технологических процессов отгрузки нефти при выполнении ситуационного снижения уровня добычи с возможным использованием концепции кусочно-линейного агрегата;
- методика планирования работы флота обеспечения МЛСП, используемая в целях повышения эффективности ее эксплуатации.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность полученных результатов обусловлена корректной постановкой задач, применени-

ем математически обоснованных принципов исследования, использованием классических методов и программных инструментов математического анализа, высокоуровневых сред имитационного моделирования, а также совпадением результатов имитационных экспериментов с фактическими данными, полученными в ходе эксплуатации МЛСП «Приразломная».

Основные положения и результаты диссертации докладывались на конференциях: III Международном форуме «Арктика: настоящее и будущее»<sup>1</sup>, Санкт-Петербург, 2013 г.; 12-й Международной конференции и выставке по освоению ресурсов нефти и газа Российской Арктики и континентального шельфа стран СНГ «RAO / CIS Offshore 2015», Санкт-Петербург, 2015 г.; Третьей международной научной конференции «Полярная механика», Владивосток, 2016 г.; VI Международном форуме «Арктика: настоящее и будущее»<sup>2</sup>, Санкт-Петербург, 2016 г.; Международной конференции по судостроению и разработке высокотехнологичного оборудования для освоения Арктики и шельфа OFFSHORE MARINTEC RUSSIA<sup>3</sup>, Санкт-Петербург, 2016 г.; IV Международной научно-практической конференции «Имитационное и комплексное моделирование морской техники и морских транспортных систем» (ИКМ МТМТС-2017), Санкт-Петербург, 2017.

По теме диссертации опубликовано 12 работ. Из них 4 статьи опубликованы в рецензируемых изданиях из списка рекомендованных ВАК Минобрнауки России для публикации результатов диссертационных исследований. По результатам одного из исследований, описанных в диссертации, автором получен патент на изобретение.

Работа состоит из введения, трех глав, заключения и трех приложений, изложена на 183 страницах, содержит 36 рисунков, 5 таблиц. Список используемых источников состоит из 115 наименований, из них 56 – иностранных.

### **Основное содержание работы**

Во введении обоснованы актуальность диссертационного исследования, названы его цель и задачи, раскрыты научная новизна и практическая значимость выводов и результатов работы.

В первой главе «Анализ особенностей транспортных систем арктических шельфовых платформ и существующих подходов к моделированию работы флота обеспечения» доказано отсутствие научно обоснованной планирования работы флота обеспечения МЛСП для принятия своевременных управленческих решений в условиях взаимодействия (в т. ч. конкуренции) транспортных, технологических и природных факторов, имеющих вероятностную природу.

Произведен сравнительный анализ выполненных ранее работ и существующих подходов к оптимизации и моделированию работы флота МЛСП.

---

<sup>1</sup>URL:[http://www.forumarctic.com/upload/medialibrary/docs/conf2013/FANB\\_2013\\_programme.pdf](http://www.forumarctic.com/upload/medialibrary/docs/conf2013/FANB_2013_programme.pdf)

<sup>2</sup>URL:<http://www.forumarctic.com/conf2016/agenda/2078/>

<sup>3</sup>URL:<http://offshoremartec-rus-sia.ru/index/OMR2016/>

Комплексно оценены экспертно-аналитические методы, методы теории графов и комбинаторной оптимизации, методы теории массового обслуживания, имитационное моделирование. Результаты приведены в таблице 1.

Обосновано, что в качестве основного инструмента исследования работы системы обеспечения морской платформы целесообразно рассматривать дискретно-событийное и агентное имитационное моделирование. На основе произведенного анализа можно утверждать, что исследование работы флота обеспечения морских ледовых платформ с помощью комплексного имитационного моделирования в постановке данного исследования является достаточно новой и малоизученной задачей. При этом основную сложность представляет не столько сама имитационная модель системы снабжения, сколько эффекты взаимодействия различных транспортных и технологических процессов, происходящие на стыке «платформа» – «транспортная система».

Таблица 1 – Сравнительный анализ существующих подходов к оптимизации и моделированию работы флота

Параметр сопоставления	Экспертно-аналитические методы	Методы теории графов и комбинаторной оптимизации	Методы теории массового обслуживания	Имитационное моделирование
Трудоемкость разработки и вычислительная сложность	низкая	средняя	средняя	высокая
Возможность учета технологических и аварийно-спасательных операций судов обеспечения	да	нет	да	да
Учет различных типов перевозимых грузов	нет	да	нет	да
Учет прямого и обратного грузопотоков	нет	да	нет	да
Учет стохастических факторов природного и техногенного характера	нет	нет	да	да
Учет окон погоды в портах и на терминалах	нет	да	да	да
Степень детализации пространственной логики движения судов	низкая	высокая	средняя	высокая
Возможность оптимизации пространственной логики движения судов	нет	да	возможно с использованием внешних решений	
Возможность оптимизации скорости хода судна в рейсе	нет	да		
Достижимая глубина детализации объектной модели системы	низкая	средняя	средняя	высокая

Другими словами, основной научный интерес представляет разработка подхода, позволяющего учитывать технологические особенности платформы при планировании работы флота обеспечения и определении необходимого числа и характеристик судов для каждого этапа развития месторождения и с необходимой детальностью, определяемой сложностью модели (системы взаимодействующих подмоделей).

На основании проведенного анализа формулируется цель исследования и его частные задачи.

**Во второй главе** «Моделирование процессов работы флота обеспечения морской ледостойкой стационарной платформы» получены следующие научные результаты.

*Определена принципиальная структура комплексной имитационной модели функционирования МЛСП и обеспечивающего флота.* Платформа представляется как изолированный узел логистической цепи, обладающий сложной и многоуровневой структурой. Основные свойства такого узла – его способность потреблять и производить определенные номенклатуры грузов. Соответственно, грузы, которые потребляются на платформе, должны быть своевременно и в нужном объеме доставлены, а обратные грузы – своевременно и в нужном объеме вывезены. Полученная, исходя из этих соображений, информационная модель МЛСП представлена на рисунке 1, где для отображения структуры модели использован язык объектного моделирования UML.

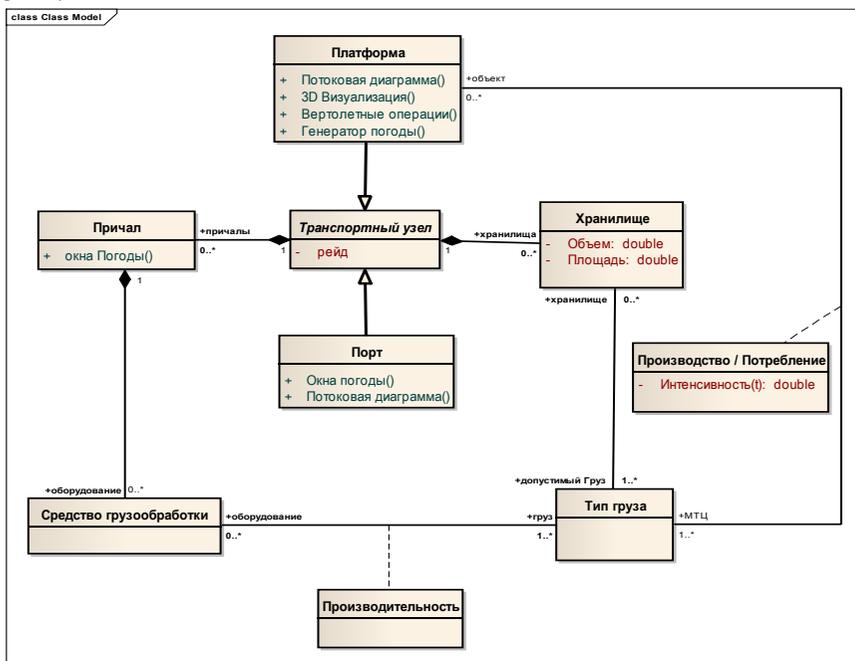


Рисунок 1 – Укрупненная информационная модель инфраструктуры МЛСП как узла логистической сети снабжения в нотации UML

В самом общем виде и в терминах описанных выше информационных сущностей имитационная модель логистической системы снабжения МЛСП должна описывать следующие процессы:

1. Перераспределение грузов внутри моделируемых хранилищ вследствие производственно-технологических процессов, таких как пополнение хранилищ вывозимых грузов (в частности – нефти) и исчерпание запасов в хранилищах грузов снабжения.

2. Движение судов от рейда МЛСП к базам снабжения (портам перегрузки) и обратно.

3. Грузовые операции судов у терминалов платформы.

4. Тактическое планирование рейсов судов и оперативное перепланирование последовательности обслуживания их у МЛСП, исходя из состояния доступности причальных терминалов и «конкуренции» судов различного типа за одни и те же места погрузки/разгрузки.

5. Динамика смены доступности конкретных причалов или грузового оборудования в зависимости от складывающейся метеорологической и ледовой обстановки.

6. Изъятие или пополнение партий груза из хранилищ МЛСП по мере их вывоза или доставки судами.

Сторонние модули, описывающие процессы, протекающие за границами исследования, составляют неотъемлемую часть комплексной модели транспортно-технологической системы снабжения стационарных нефтяных платформ. Однако они имеют достаточно универсальный характер и могут использоваться для описания произвольной морской транспортной системы. В свою очередь, блоки, выделенные на рисунке цветом, имеют более узкую и предметно-ориентированную направленность. Именно они описывают специфические процессы взаимодействия судов с шельфовым сооружением особого типа – мультифункциональной стационарной платформой.



Рисунок 2 – Логические и функциональные блоки комплексной модели функционирования МЛСП и обслуживающего флота (цветом выделены блоки моделей, созданных автором)

*Выполнено обоснование выбора типа модели для описания транспортно-технологической системы МЛСП и входящих в нее подмоделей. Прове-*

денное автором исследование показало, что в настоящее время существуют три основных системы взглядов, подходов и концепций, используемых в качестве каркаса при построении имитационных моделей:

- динамические системы или системная динамика;
- дискретно-событийное моделирование;
- мультиагентные системы.

В случае моделирования транспортно-технологической системы МЛСП уровень детализации описания системы при учете всех значимо-влияющих факторов может быть достаточно высоким. При этом, по крайней мере для части включенных в рассмотрение сущностей, важным является учет особенностей не только их статической структуры, но и динамического поведения. Кроме того, характер решаемых с помощью имитационного моделирования задач оказывается связано с оптимизацией процессов или структуры системы. Учитывая эти факторы, можно заключить, что наиболее подходящей парадигмой моделирования в данном случае может выступать агентное моделирование (см. таблицу 2).

Таблица 2 – Выбор парадигмы имитационного моделирования по характеристикам решаемой задачи

Характеристика задачи	Системная динамика	Дискретные события	Агентные системы
Уровень детализации/абстракции	Стратегический	Тактический, оперативный	Стратегический, тактический, оперативный
Разнообразие сущностей	Низкое	Среднее	Высокое
Важность учета особенностей поведения сущностей	Низкая	Низкая	Высокая
Количество сущностей	Большое	Среднее	Любое
Наличие случайных процессов	Малое	Большое	Большое
Цель применения	Определение тенденций	Оптимизация, прогнозирование, сравнение	Оптимизация, прогнозирование, сравнение

Однако следует учитывать, что любая транспортная система, в том числе и транспортная система МЛСП может быть декомпозирована на подсистемы, которые, в свою очередь, представляют отдельные объекты исследования. В таких случаях исключительно полезным оказывается совмещение нескольких подходов имитационного моделирования в рамках одной модели. Большинство современных специализированных высокоуровневых средств и сред имитационного моделирования (например, AnyLogic) поддерживают подобное соединение разных техник в единой модели.

*Создана дискретно-событийная модель операций обработки судна у МЛСП с учетом элементов оперативного планирования на основе правил динамических приоритетов.* В качестве заявок дискретно-событийной модели выступают задания приходящих нефтеналивных танкеров и судов обеспечения на грузообработку у МЛСП. Вид соответствующей процессной диаграммы в нотации AnyLogic представлен на рисунке 3.

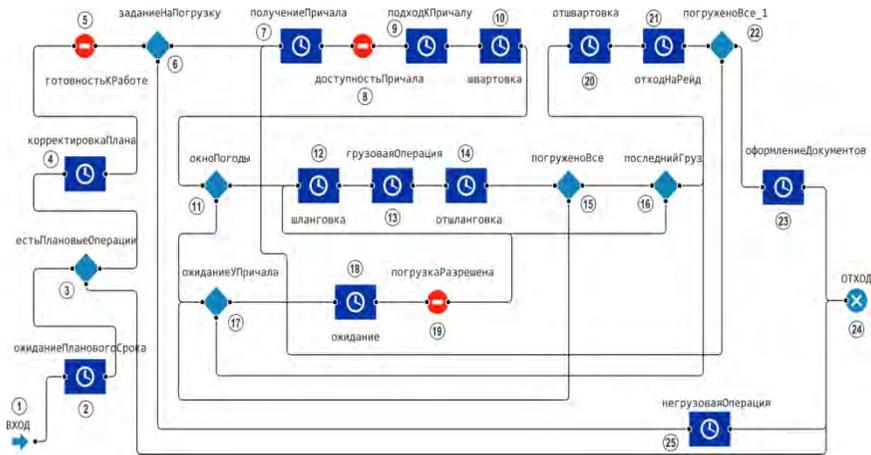


Рисунок 3 – Процессная диаграмма модели операций обработки судна у МЛСП

Модель описывает работу судна у терминала, в которой присутствует несколько контуров разной степени вложенности, позволяющих отразить сколько угодно прерываний и возобновлений основной ветки процесса в течение времени его исполнения. Они соответствуют пережиданиям или подходам-отходам судна к одному или разным терминалам, которые могут иметь место за один портозаход. В рамках формального описания данного процесса реализованы определенные правила разрешения конфликтов «конкуренции» судов за «окна погоды» одного и того же терминала. Логика разрешения данных ситуаций основывается на predeterminedenных строго формализованных правилах приоритетов.

*Разработана модель описания технологических процессов отгрузки нефти на МЛСП с учетом ситуационного снижения уровня добычи.* Отслеживаемыми процессами рассматриваемого алгоритма являются плановая ежесуточная интенсивность добычи нефти и уровень наполнения хранилища нефти на МЛСП, которые определяют логику снижения/возобновления уровня добычи исходя из минимизации риска полного наполнения хранилища нефти и связанного с этим экстренного останова добычи.

Эта логика описывается дискретным динамическим процессом, диаграмма состояний которого представлена на рисунке 4. Процесс может находиться в каком-либо одном из указанных predeterminedenных состояний. Условия перехода из состояния в состояние приведены у ребер, соединяющих состояния, а порядок расчета текущей (фактической) интенсивности добычи нефти на каждом модельном шаге указан в голубом прямоугольнике.

В ходе имитационного эксперимента с указанным алгоритмом снижения добычи могут быть определены следующие параметры:

- дата начала отклонения от плановой интенсивности добычи;

- дата возврата к плановой интенсивности добычи;
- дата начала принудительной полной остановки добычи;
- дата окончания принудительной полной остановки добычи;
- объем недополученной нефти (накопленная потеря).

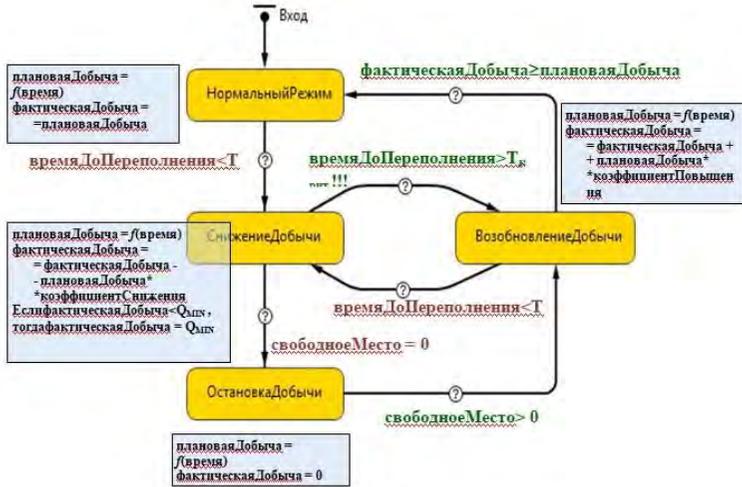


Рисунок 4 – Диаграмма состояний процесса определения фактической интенсивности добычи с учетом риска переополнения

Создана модель для описания доступности грузовых терминалов МЛСП под влиянием множества внешних погодных факторов. Особенностью данного алгоритма является то, что доступность каждого грузового терминала не определяется пороговым значением только одного природного параметра (скорость ветра, направление ветра, высота волн и т. п.), а может достаточно сложным образом зависеть от сочетания значений всех параметров. При этом моделирование природных условий производится при помощи стохастического генератора погодных условий, который выдает значения 16-ти природных динамических параметров. Очевидно, что число возможных сочетаний этих параметров практически не ограничено, поэтому для создания алгоритма определения доступности терминалов был использован не полный перебор возможных сочетаний параметров, а упрощенный экспертный подход, ориентированный на ключевые параметры и их пороговые совместные значения.

В алгоритме были учтены все четыре моделируемых грузовых терминала МЛСП: юго-восточный комплекс устройств прямой отгрузки нефти (КУ-ПОН), северо-западный КУПОН, восточный кран и западный кран. На рисунках 5 и 6 показаны алгоритмы определения доступности юго-восточного КУПОН и восточного крана соответственно. Доступность терминала моде-



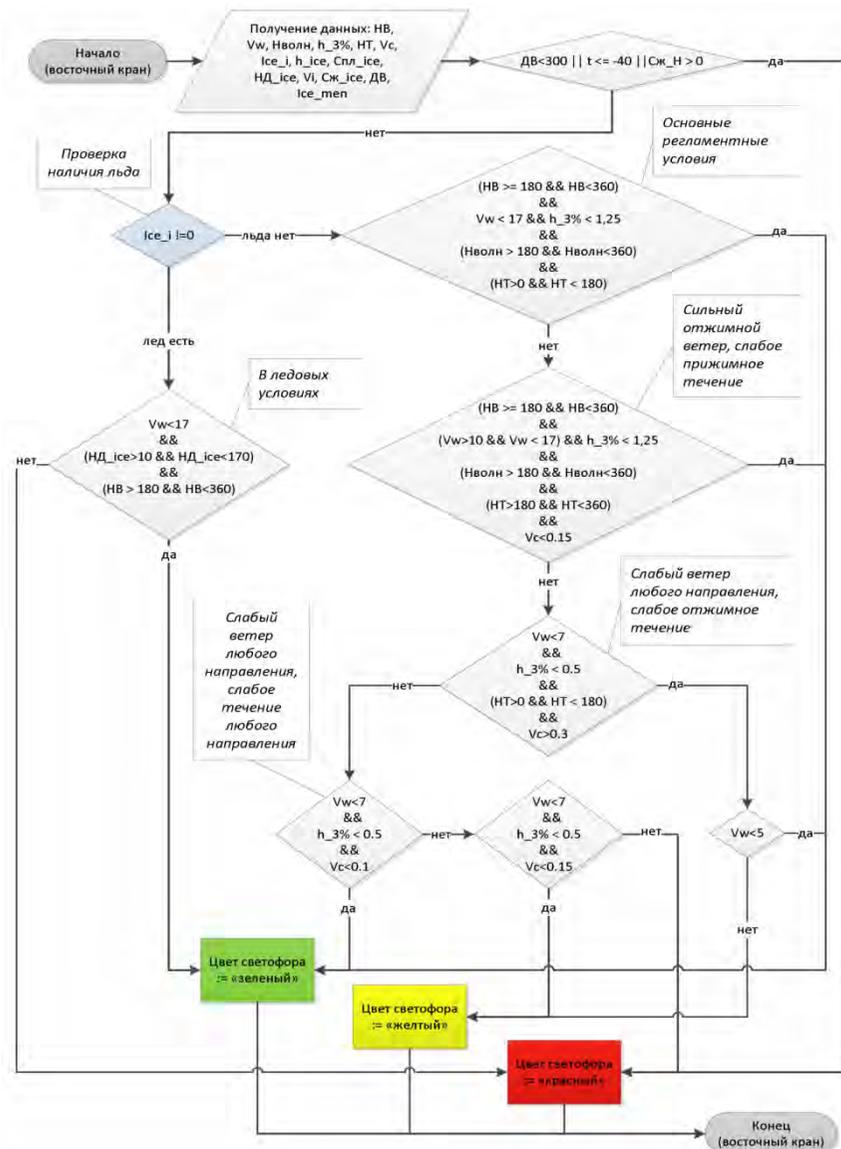


Рисунок 6 – Алгоритм определения доступности восточного крана по погодным параметрам

Синтезирована комплексная имитационная модель работы флота обеспечения МЛСП. Условная схема взаимодействия параллельно моделируемых динамических процессов на стационарной платформе, реализованная в

рамках описываемого имитационного алгоритма представлена схемой, приведенной на рисунке 7.

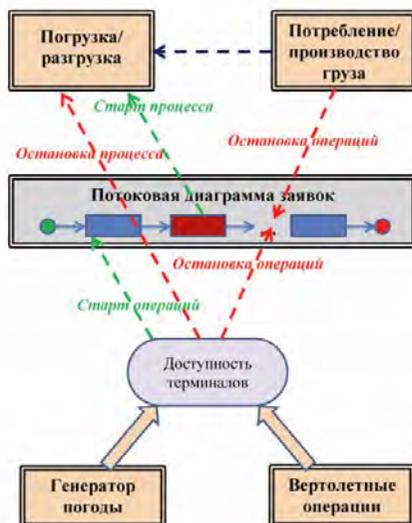


Рисунок 7 – Условная схема взаимодействия параллельных динамических процессов в имитационном алгоритме имитационной модели работы флота обеспечения МЛСП

Таким образом, установлено, что для создания адекватной имитационной модели функционирования МЛСП необходимо одновременное моделирование целого ряда взаимодействующих динамических процессов, определяющих функционирование изучаемого транспортного узла. Подмодель портовых операций представляет собой лишь один из процессов, примерами других являются: динамика уровня хранилищ, изменение природных условий, случайные события и т. п.

**В третьей главе** «Оценка результатов модельных исследований и формирование методики планирования работы флота обеспечения МЛСП с помощью имитационного моделирования» произведена верификация выше комплексной модели работы флота обеспечения МЛСП, для чего были использованы следующие натурные характеристики:

- число подходов судна к терминалу в течение одной погрузки;
- суммарная длительность грузовых операций судна у МЛСП;
- распределение длительности одной непрерывной погрузки/разгрузки судна у МЛСП;
- число рейсов судов за рассматриваемый период.

На рисунке 8 представлено сопоставление статистических распределений основных показателей грузообработки танкера у МЛСП, полученных по

натурным данным за 2015–2016 гг. и на основе имитационной модели (период моделирования 2015–2019 гг.). Проверка взаимного соответствия расчетных и натуральных распределений выполнялась по критерию Колмогорова-Смирнова, в результате чего для всех пар натуральных и расчетных распределений был получен вывод о том, что они соответствуют друг другу с уровнем доверия 95 %.

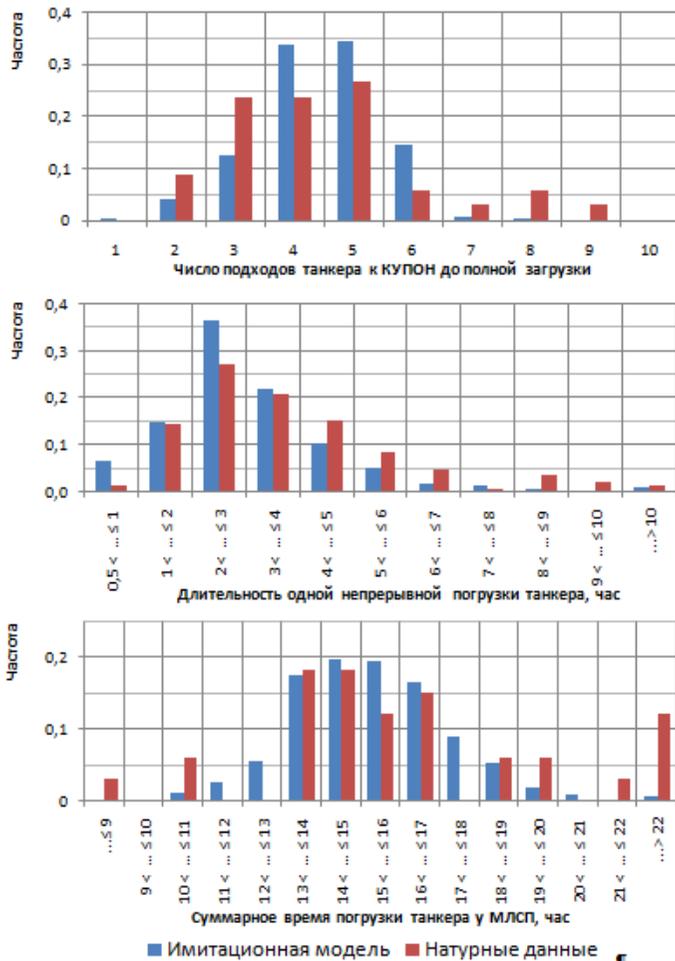


Рисунок 8 – Сопоставление статистических распределений основных показателей грузообработки танкера у МЛСП, полученных по натурным данным и на основе имитационной модели

*Сформирована методика планирования работы флота обеспечения МЛСП с помощью имитационного моделирования. Методические рекоменда-*

дации могут быть использованы для оценки и анализа проектных или организационно-эксплуатационных решений для существующих или будущих многофункциональных шельфовых объектов. Укрупненная блок-схема методики планирования работы флота обеспечения МЛСП с помощью имитационного моделирования приведена на рисунке 9.



Рисунок 9 – Укрупненная блок-схема методики планирования работы флота обеспечения МЛСП с помощью имитационного моделирования

В ходе исследования на основе созданного программного инструмента была смоделирована работа более 30-ти различных вариантов конфигурации транспортной системы МЛСП «Приразломная». Рассмотрен анализ влияния на эффективность системы 11-ти улучшающих мероприятий организационно-технического характера, имеющих различный масштаб и стоимость реализации.

Дополнительно исследовался вопрос эффективности выполнения судами обеспечения операций управления ледовой обстановкой при погрузке

танкера. Таким образом, изложенные в настоящем исследовании подходы, относящиеся к математическому имитационному моделированию, были подкреплены работами из альтернативной ветви имитационного моделирования, также интенсивно развивающегося в последние годы – экспериментах с созданием виртуальной реальности на специальных тренажерах.

Кроме того, некоторые перечисленные выше варианты усовершенствования были исследованы в натурных экспериментах в ходе экспедиций к МЛСП «Приразломная» в 2015–2018 гг. при непосредственном участии автора. Цель экспериментов – реализация прикладных технических решений на уровне оперативного управления технологическими процессами в условиях, когда пересчет данных оказывается невозможным. В частности, в ходе экспедиции весной 2017 года было апробировано техническое решение по разрушению нагромождения обломков льда (стамухи) вблизи МЛСП, на которое автором в составе коллектива получен патент РФ на изобретение «Способ разрушения нагромождения обломков льда вблизи ледостойких морских нефтегазовых и гидротехнических сооружений и устройство для его осуществления» (рисунки 10, 11), что позволяет придать судам обеспечения дополнительные функции, учитываемые моделью.



Рисунок 10 – Максимальный размер стамухи за период эксплуатации

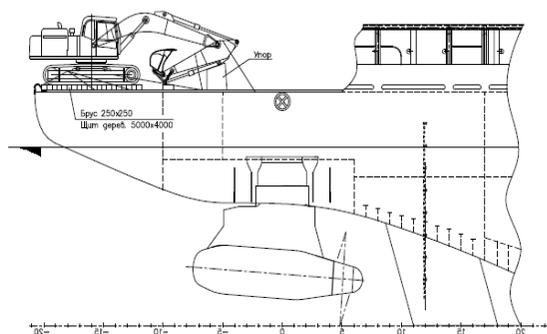


Рисунок 11 – Средство активного воздействия на стамуху

В описанных условиях очевидна потребность формирования в портовых объектах специальных комплексов организационно-технических мероприятий, направленных на оперативное принятие решений в непрерывно меняющейся обстановке.

Влияние предложенных организационно-технических мероприятий на критерии эффективности работы системы показаны в таблице 3.

Конечная цель проведенных прикладных исследований заключалась в поиске рационального сочетания улучшающих мероприятий с позиций соотношения затрат и достигаемого снижения объемов недополученной нефти за весь период работы МТТС. В соответствии с этим был сформирован план расчетного эксперимента: вначале было исследовано изолированное влияние каждого мероприятия на эффективность МТТС в ледовых условиях различного типа, а затем на основе полученных результатов были исследованы конфигурации с комплексными улучшениями.

Сводные результаты исследования показаны в таблице 3, где для случая изолированного влияния показан средний процент снижения объемов недополученной нефти, а для случая совместного использования приведен интегральный эффект от применения мероприятий №№ 1–5 и указано какое дополнительное снижение потерь можно получить, если в дополнение к улучшениям №№ 1–5 применять одно из мероприятий №№ 6–9.

Таким образом, установлено, что общая методика планирования работы флота обеспечения МЛСП с использованием имитационного моделирования включает восемь этапов: постановка задач; выбор целевых уровней планирования; формирование перечня моделируемых процессов и детальности их описания; разработка подмоделей; создание комплексной модели; верификация комплексной модели по интегральным параметрам; выполнение массовых численных экспериментов; обоснование организационно-управленческих и технологических решений по результатам моделирования. В тексте работы описаны альтернативные варианты реализации типовых расчетных блоков комплексной имитационной модели.

Таблица 3 – Исследованные мероприятия, повышающие эффективность морской транспортно-технологической системы (МТТС)

№	Мероприятие, повышающее эффективность МТТС	Снижение средних объемов недополученной нефти	
		изолированное	совместное
1	Разрешение совместной работы танкеров и судов снабжения на противоположных терминалах МЛСП	6 %	69 %
2	Сокращение средней длительности швартовно-шланговых операций танкеров у МЛСП с 1,5 до 1,2 часа	8 %	
3	Разрешение работы танкера у МЛСП в момент прилета вертолета (интенсивность прилета – 1 раз в 4,5 дня)	13 %	
4	Сокращение средней длительности оформления документов после погрузки танкеров с 10,8 до 2 часов	25 %	
5	Повышение средней производительности отгрузки нефти на 60 %	38%	
6	Снижение минимальной длительности используемых танкерами окон погоды с 6 до 4 часов	44 %	+16 %
7	Строительство дополнительного однотипного челночного танкера	30 %	+7 %
8	Повышение средней скорости двух танкеров на 1 узел	21 %	+5 %
9	Привлечение дополнительного ледокола для обеспечения ледового менеджмента	3 %	+1 %
10	Строительство выносного ледостойкого отгрузочного нефтяного терминала кругового действия	100 %	-
11	Строительство дополнительного хранилища добытой нефти	100 %	-

Представленная методика может использоваться при выполнении исследований работы произвольных морских транспортно-технологических систем и стратегическом планировании работы флота обеспечения.

### Заключение

В настоящем исследовании получены следующие научные и практические результаты:

Обоснована принципиальная структура и определены основные составные элементы комплексной имитационной модели функционирования МЛСП, предназначенной для решения задач стратегического планирования работы флота. Осуществлен выбор уровня детальности описания транспортных и технологических процессов в составе общей модели.

На основе сопоставительных расчетов с использованием имитационных моделей различного типа выполнено обоснование типов применяемых моделей как для описания всей транспортно-технологической системы МЛСП в целом, так и входящих в нее подмоделей.

Разработана дискретно-событийная модель операций обработки судна у МЛСП, которая: а) учитывает возможность множественных отходов судов из-за погодных условий в ходе грузовых операций, б) содержит элементы

оперативного планирования работы флота на основе правил динамических приоритетов.

Создана математическая модель описания технологических процессов отгрузки нефти на МЛСП, которая позволяет учитывать динамику ситуационного снижения и повышения уровня добычи в зависимости от складывающихся обстоятельств работы флота.

Создан алгоритм для описания доступности грузовых терминалов МЛСП под влиянием внешних погодных факторов, который позволяет учитывать значения 16-ти природных параметров. Алгоритм базируется на последовательной проверке сначала наиболее общих требований, а затем – частных ограничений и регламентированных сочетаний параметров.

На этой основе синтезирована комплексная имитационная модель работы флота обеспечения МЛСП.

На базе комплексной имитационной модели сформирована общая методика планирования работы флота обеспечения МЛСП. Методика включает восемь этапов: постановка задач; выбор целевых уровней планирования; формирование перечня моделируемых процессов и детальности их описания; разработка подмоделей; создание комплексной модели; верификация комплексной модели по интегральным параметрам; выполнение массовых численных экспериментов; обоснование организационно-управленческих и технологических решений по результатам моделирования. Описаны альтернативные варианты реализации типовых расчетных блоков комплексной имитационной модели. Методика может использоваться при выполнении исследований работы произвольных МТТС и стратегическом планировании работы флота обеспечения МЛСП.

Выполнена верификация результатов работы имитационной модели обработки судна у МЛСП по интегральным показателям. Показано, что для подтверждения адекватности сложной имитационной модели, в рамках которой моделируется целый ряд процессов различной природы, необходимо использовать интегральные показатели натурной системы. В качестве интегральных показателей должны выступать такие характеристики системы, которые не задаются напрямую в качестве входных параметров моделей частных процессов, т. е. не имеют прямого параметризованного модельного аналога, а могут быть определены только в результате работы комплексной модели.

В качестве практической реализации научных результатов исследования предлагается разработанный комплекс организационно-технических мероприятий по улучшению работы транспортно-технологической системы МЛСП «Приразломная», опирающийся на сочетание предложенного методического подхода к планированию с рядом технических решений, реализуемых как на оперативном уровне, в зависимости от складывающейся транспортной обстановки, так и при долгосрочном планировании технического развития платформы.

### **Список работ, опубликованных автором по теме диссертации**

Работы, опубликованные автором в перечне ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, рекомендованных ВАК:

1. Кузнецов, А.Л. Моделирование работы морского грузового фронта / А.Л. Кузнецов, А.В. Кириченко, Д.А. Зайкин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. – 2019. – №1(53). – С. 33-42. (0,7/0,2).

2. Зайкин, Д.А. О выборе парадигмы имитационного моделирования при построении моделей портовых транспортно-технологических систем / Д.А. Зайкин // Транспортное дело России. – 2018. – № 5. – С. 163-165. (0,2).

3. Зайкин, Д.А. Моделирование возможности проведения грузовых операций на платформе «Приразломная» по погодным условиям / Д.А. Зайкин, А. Г. Топаж, А. В. Косортов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. – 2018. – Т. 10. – №1(47). – С. 62-77. (1,0/0,3).

4. Зайкин, Д.А. Использование имитационного моделирования для анализа морской транспортно-технологической системы платформы «Приразломная» / Д. А. Зайкин [и др.] // Транспорт Российской Федерации – 2017. – № 1 (68). – С. 44-48. (0,25/0,1).

5. Зайкин, Д.А. Способ разрушения нагромождения обломков льда вблизи ледостойких морских нефтегазовых и гидротехнических сооружений и устройство для его осуществления / Д. А. Зайкин [и др.] // Патент на изобретение. Федеральная служба по интеллектуальной собственности № 218.016.3F4В от 10.05.2018 г. № охранного документа 0002648657 от 27.03.2018 г., бюл. № 9.

Работы, опубликованные в других изданиях:

1. Зайкин, Д.А. Комплексная имитационная модель морской транспортно-технологической системы платформы «Приразломная» / О.В. Таровик, Д.А. Зайкин [и др.]// Арктика: экология и экономика. – 2017. – № 3 (27). – С. 86-102.(1,0/0,2).

2. Зайкин, Д.А. Использование имитационного моделирования для анализа морской транспортно-технологической системы платформы «Приразломная» / Д. А. Зайкин [и др.] // Neftegas.ru – 2017. – № 8. –С. 24-31. (0,4/0,1).

3. Зайкин, Д.А. Исследование и оптимизация процессов снабжения шельфовых сооружений методами имитационного моделирования на примере анализа транспортно-технологической системы платформы «Приразломная» / А. Г. Топаж, Д. А. Зайкин [и др.] // Сб. трудов IV Международной научно-практической конференции «Имитационное и комплексное моделирование морской техники и морских транспортных систем» (ИКМ МТМТС-2017). – СПб., 2017. – С. 153-157. (0,25/0,1).

4. Зайкин, Д.А. Имитационная модель морской транспортно-технологической системы платформы «Приразломная» / Д. А. Зайкин [и др.] // Рго нефть. – 2017. – № 2 (4). С. 61-68. (0,4/0,1).

5. Зайкин, Д.А. Разработка методов предотвращения образования ледяных нагромождений и их разрушений / Е. Б. Карулин, Д. А. Зайкин [и др.] // Труды Центр. науч.-исслед. ин-т им. акад. А. Н. Крылова. СПб., 2016. – Вып. 94(378). – С. 99-112. (0,8/0,2).

6. Зайкин, Д.А. Практическое применение на Приразломном нефтяном месторождении методики разрушения нагромождения обломков льда вблизи ледостойких морских стационарных платформ / Д.А. Зайкин, Е.Б. Карулин, А.А. Проняшкин // Полярная механика: материалы 3-й международной научной конференции, 27–30 сентября 2016 г. – Владивосток, 2016. – С. 278-293. (0,9/0,3).

7. Зайкин, Д.А. Новые требования и конструктивные решения для судов обеспечения арктических платформ: опыт эксплуатации Приразломного нефтяного месторождения / Д. А. Зайкин // Труды 12-й Международной конференции и выставки RAO / CISOffshore 2015 по освоению ресурсов нефти и газа Российской Арктики и континентального шельфа стран СНГ, Санкт-Петербург, 15–18 сентября 2015 года. – СПб.: Химиздат, 2015. – С. 377-380. (0,2).