

## КОМПЛЕКСНАЯ ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ МОРСКОЙ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПЛАТФОРМЫ «ПРИРАЗЛОМНАЯ»

О. В. Таровик, А. Г. Топаж, А. Б. Крестьянцев, А. А. Кондратенко  
ФГУП «Крыловский государственный научный центр» (Санкт-Петербург, Российская Федерация)

Д. А. Зайкин  
ООО «Газпром нефть шельф» (Санкт-Петербург, Российская Федерация)

*Подробно описана имитационная модель системы морского транспорта для платформы «Приразломная». На основе модели исследованы альтернативные решения по повышению эффективности и устойчивости функционирования системы с учетом множества натуральных факторов. Результаты моделирования послужили основой для принятия управленческих решений и корректировки технологических документов.*

**Ключевые слова:** морская транспортная система, добычная платформа, погодный генератор, планирование рейсов судов, суда снабжения, арктические танкеры, дискретно-событийное моделирование, имитационное моделирование платформ.

Статья поступила в редакцию 14 апреля 2017 г.

### Введение

Морская ледостойкая стационарная платформа (МЛСП) «Приразломная», работающая под управлением компании «Газпром нефть шельф» (ГНШ), — уникальный по сложности шельфовый объект. Это первая в мире стационарная платформа, которая ведет добычу нефти на шельфе в тяжелых условиях Арктики. Здесь применены самые современные и оригинальные организационно-технические решения, ведется постоянная работа над повышением безопасности, эффективности, а также качества управления экологическими и технологическими рисками. За время, прошедшее с момента введения платформы в эксплуатацию в 2014 г., все службы ГНШ накопили значительный опыт работы МЛСП и флота в сложных и постоянно меняющихся условиях Арктики. Этот опыт является основой для уточнения плановых решений, заложенных в прошлом. В частности, в данное время в ГНШ ставится задача обеспечения проактивного управления работой платформы и флота на стратегическом уровне, т. е. прогностического анализа и упреждения рисков, которые могут возникнуть в будущем.

Так, в связи с запланированными темпами роста интенсивности добычи нефти с 2,1 млн т в 2016 г. до 5 млн т к 2023 г. возникла необходимость в анализе работы морской транспортно-технологической

системы (МТТС) вывоза нефти с платформы и доставки грузов снабжения с учетом реальной практики работы флота. Первостепенную важность имеет нахождение комплекса мер, направленных на повышение устойчивости системы и снижение уровня прогнозной неопределенности на горизонте до 2038 г. Для решения этой задачи была применена технология имитационного моделирования и использован научно-технический задел Крыловского государственного научного центра (КГНЦ) в сфере исследования арктических транспортных систем.

### Постановка задачи

Линейная схема перевозок «МЛСП-Мурманск» включает два принципиальных направления грузопотоков: завоз грузов снабжения и вывоз нефти и технологических отходов. В состав МТТС входят сама платформа, два челночных танкера и суда снабжения. Несмотря на простую структуру, рассматриваемая транспортная система имеет ряд особенностей.

Во-первых, значительное влияние на показатели работы МТТС и платформы оказывает переменчивость метеорологической и ледовой обстановки. Это приводит к необходимости детального описания природных условий как у самой платформы, так и на маршрутах следования судов.

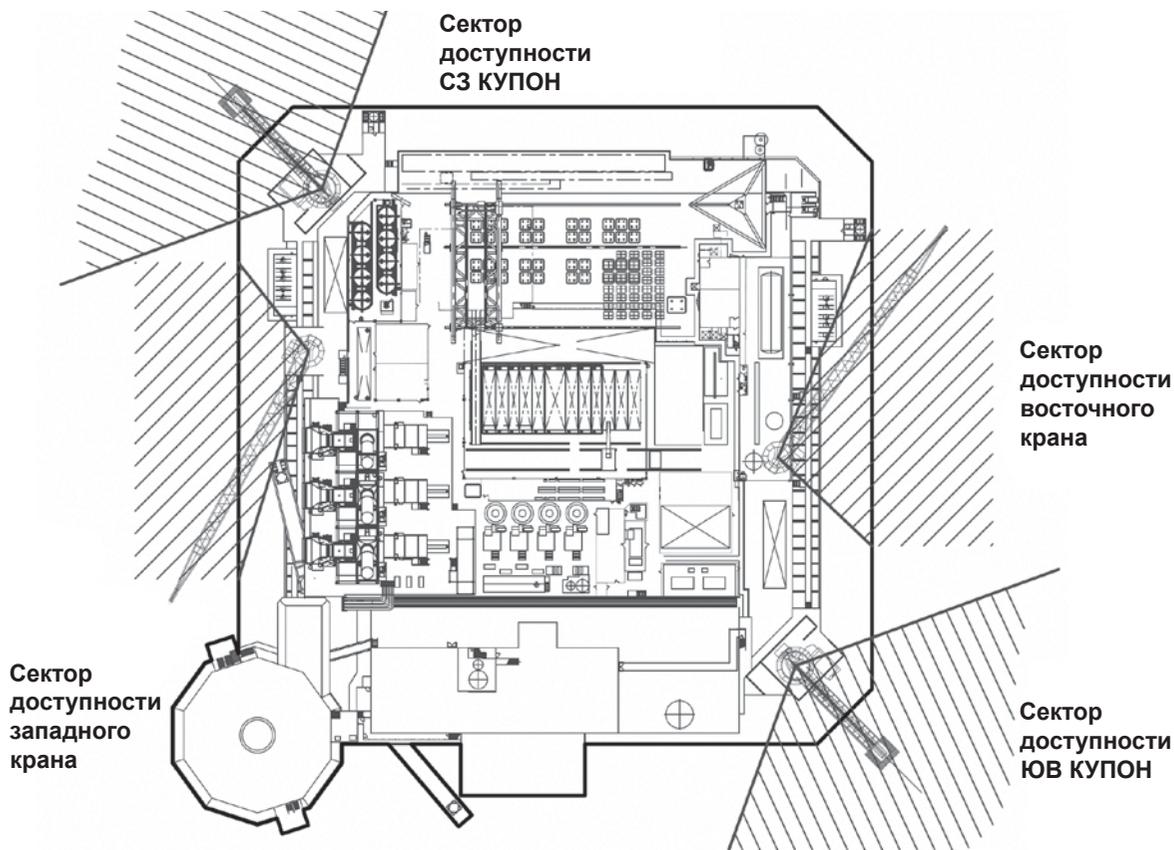


Рис. 1. Схема доступности грузовых терминалов МЛСП по направлению интегрального воздействия от ветра, волнения, течения и дрейфа льда

Во-вторых, система грузообработки судов у МЛСП нетипична для мировой практики, так как отгрузка нефти на танкер производится напрямую с платформы наряду с обработкой на платформе грузов снабжения. При этом имеются ограничения на одновременное осуществление грузовых операций танкерами и судами снабжения, что приводит к конкуренции судов разных типов за «окна погоды» терминалов платформы. Условная схема секторов доступности грузовых терминалов МЛСП по направлению интегрального воздействия от ветра, волнения, течения и дрейфа льда приведена на рис. 1, из которого видно, что каждый терминал имеет свои природные ограничения. Всего на платформе четыре терминала: восточный и западный грузовые краны для обработки судов снабжения, северо-западный и юго-восточный комплексы устройств для прямой отгрузки нефти (КУПОН) на танкеры. Вертолетная площадка также выступает как отдельный пассажирский терминал со своими ограничениями.

Наличие природных ограничений на выполнение грузовых операций и изменчивость условий внешней среды приводят к тому, что грузообработка как танкеров, так и судов снабжения производится не непрерывно, а за несколько подходов к различным терминалам платформы. Каждый подход включает множество технологических и организационных

подопераций (швартовка, шланговка, оформление документов и т. д.), длительность которых описывается различными законами случайного распределения.

Третьей принципиальной особенностью рассматриваемой системы является сложность структуры грузопотоков. На протяжении исследуемого периода работы платформы грузопотоки нефти и грузов снабжения значительно изменяются как по количеству, так и по структуре. Кроме того, обязательного учета требуют причинно-следственные связи между объемами доставки снабжения на платформу и вывоза с нее отработанных материалов. Дополнительными важными обстоятельствами являются множественность типов грузов снабжения и вопрос использования единой тары для различных типов снабжения.

И последней, четвертой, принципиальной особенностью является ограниченность объема хранения нефти на платформе (около 101 тыс. м<sup>3</sup>), а также объемов и площадей хранилищ грузов снабжения. Это обуславливает невозможность создания «мертвых запасов» грузов и ведет к необходимости организации процессов снабжения и вывоза нефти по принципу «точно вовремя». При этом как достижение высокого уровня наполнения хранилища нефти, так и близость к исчерпанию хранилищ грузов снабжения рассматриваются как нежелательные

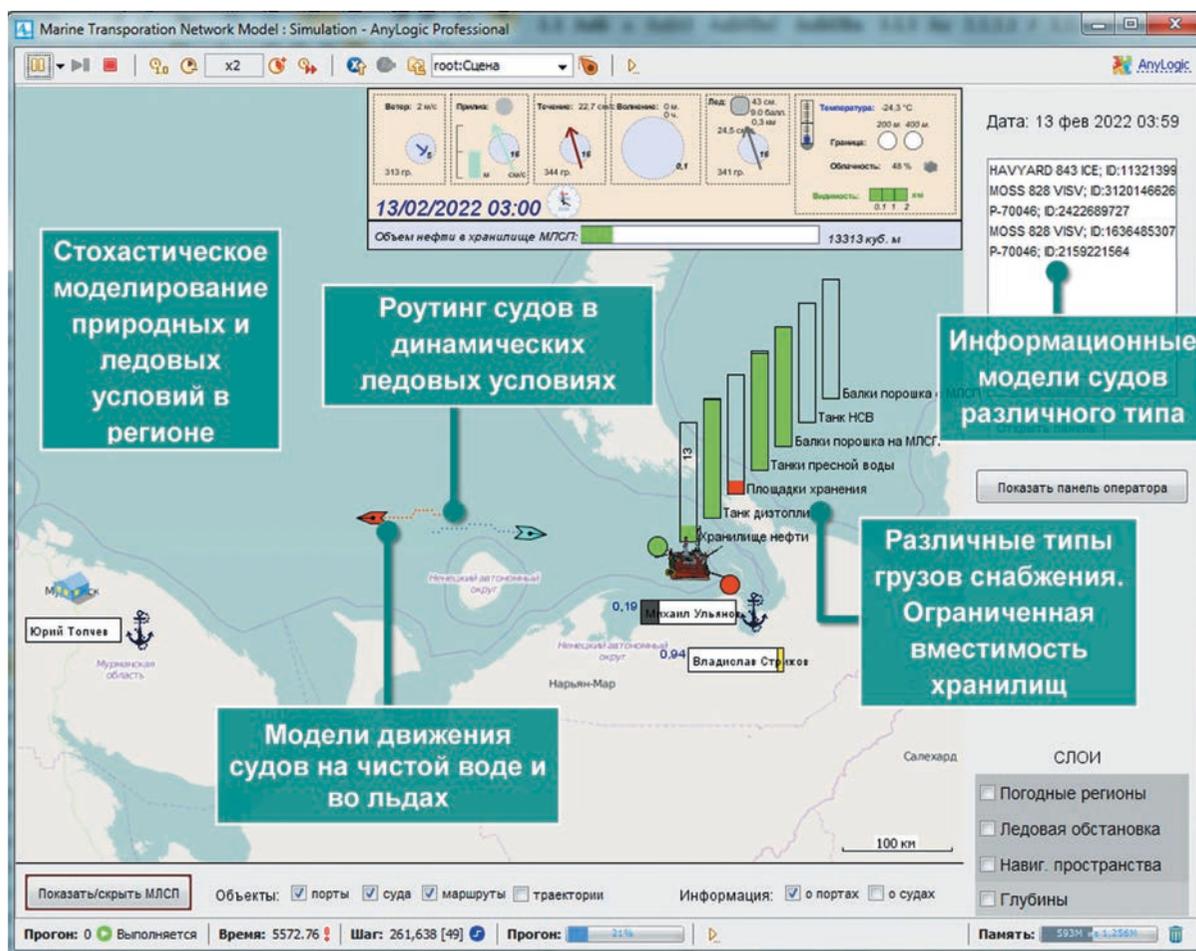


Рис. 2. Имитационная модель работы МТТС в геоинформационной среде

события, для предотвращения которых должны заблаговременно приниматься специальные меры. Например, при наличии риска полного наполнения хранилища производится плавное снижение интенсивности добычи по отношению к плановому уровню.

Очевидно, что исследование такой системы и одновременный учет всех перечисленных факторов с приемлемой степенью точности возможны только в рамках комплексной динамической имитационной модели. Основой для реализации такой модели послужил созданный ранее в КГНЦ программный инструмент для исследования арктических транспортных систем [1], который был адаптирован к моделированию инфраструктуры МЛСП.

В настоящем исследовании также были приняты следующие допущения: в Мурманске отсутствуют какие-либо задержки судов по организационно-техническим причинам и рассматривается только штатная работа флота без реализации аварийных сценариев. Также полагается, что бункеровка судов производится в ходе их разгрузки, а докование выполняется в период ежегодных плановых остановов МЛСП, не оказывая влияния на систему.

### Общие принципы построения имитационной модели

В соответствии с принципами междисциплинарного подхода к исследованию МТТС [1] в настоящем исследовании все суда представляются в виде отдельных динамических элементов (агентов), функционирующих в геоинформационной среде (ГИС) (рис. 2). При этом производится стохастическое моделирование природных условий региона (ветер и волны, ледовые условия). Определение скоростей хода и расходов топлива судов при движении во льдах и на чистой воде производится на каждом шаге имитации (1 ч) с помощью специальной расчетной модели. Траектория движения судов в ледовых условиях определяется с использованием ранее созданной технологии ледового роутинга [1], позволяющей моделировать реальную практику плавания судов во льдах по разводьям и участкам слабого льда. При моделировании движения судов в качестве желаемой скорости хода принималась экономичная скорость 10—11 узлов. Перечисленные аспекты имитационной модели являются базовыми, и их детальное описание выходит за рамки настоящей статьи. Далее основное внимание уделено

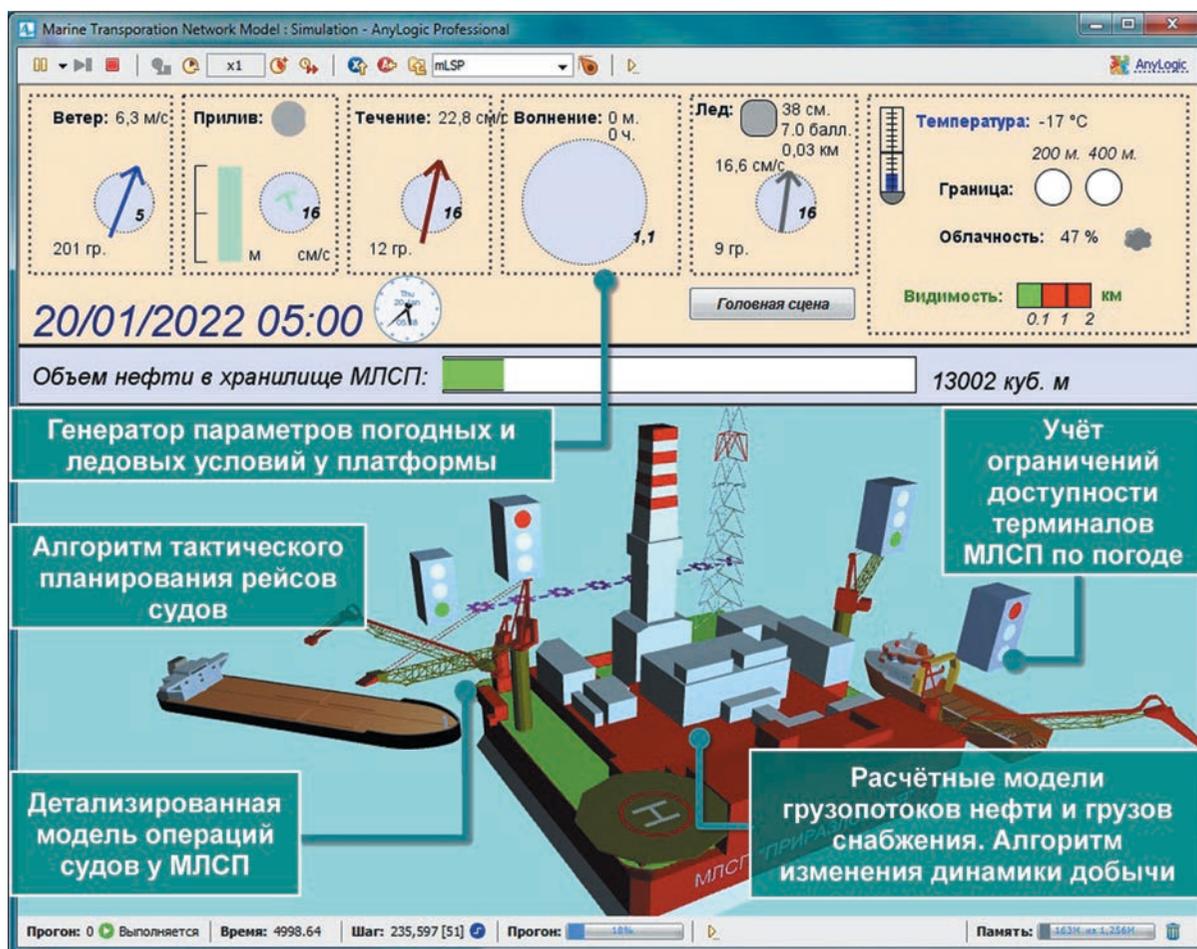


Рис. 3. Компоненты комплексной динамической имитационной модели

именно специфике настоящего исследования — моделированию платформы «Приразломная» и связанном с этим аспектам.

Подмодель платформы, интегрированная в состав общей модели, включает набор элементов, показанных на рис. 3. Базовая логика имитационной модели МТС состоит из нескольких параллельных и взаимодействующих вычислительных процессов, каждый из которых представляет собой отдельный имитационный алгоритм:

- выполнение грузоперевозок, т. е. исполнение плана операций судов;
- генерация параметров погодных условий в районе расположения платформы и определение доступности ее грузовых терминалов;
- моделирование динамики наполнения/опустошения хранилищ на платформе в соответствии с заданными грузопотоками и текущим состоянием моделируемых транспортных процессов;
- моделирование операций грузообработки судов у платформы;
- вспомогательные процессы и события (например ввод-вывод судов из эксплуатации, прибытия вертолета и т. п.).

Центральным процессом, вокруг которого строится вся имитационная модель, является исполнение плана операций судов. Принципиально важно, что план операций создается до запуска имитационной модели, в которой моделируется исполнение этого плана.

### Стохастический генератор параметров природных условий в районе МЛСП

Обычно для моделирования природных ограничений при решении логистических задач используется метод «окон погоды», подразумевающий описание доступности какого-либо объекта (порта, терминала) с помощью двух альтернативных состояний: «погода» и «непогода». Длительность каждого состояния описывается вероятностными распределениями, полученными на основе временных рядов погодных реализаций и комплекса отдельных ограничений доступности моделируемого объекта по высоте волны, скорости ветра, видимости и другим параметрам. Однако в данной работе такой подход не применим, поскольку МЛСП имеет несколько грузовых терминалов, каждый из которых характеризуется различными природными ограничениями, поэтому метод обобщенных «окон погоды» не позволяет

в достаточной мере учесть статистическую взаимозависимость состояний доступности различных терминалов по отношению к разным судам в одни и те же или соседние моменты времени.

Для построения непротиворечивого имитационного алгоритма приходится задействовать прямой метод описания внешних условий, т. е. явное моделирование всех интересующих параметров окружающей среды в районе МЛСП и последующее вычисление доступности различных терминалов в модельных условиях. Созданный для решения этих задач оригинальный генератор природных условий морской акватории позволяет получать временные ряды 15 имитируемых параметров. К ним относятся:

- температура воздуха;
- скорость и направление ветра;
- облачность и высота облаков; видимость;
- высота и направление ветровых волн;
- скорость и направление течения;
- время высокой/низкой воды;
- скорость и направление дрейфа льда;
- сплоченность и толщина льда.

Временное разрешение генератора (частота обновления показателей состояния погоды) настраивается в интервале 1—24 ч. Внутренняя логика алгоритма погодного генератора содержит в себе как элементы формального статистического моделирования (получение реализаций погоды как многомерного дискретного случайного процесса с заданными авто- и кросскорреляционными свойствами методами формирующих фильтров и марковских цепей), так и физически обоснованные подходы. Последние, в частности, используются для описания приливных и ветровых составляющих поверхностных течений, определения характеристик ветрового волнения, а также скорости и направления дрейфа ледовых полей. Многочисленные параметры, определяющие стохастические свойства генератора (годовой и суточный ход моментов используемых вероятностных распределений, корреляционные коэффициенты, вероятности переходов марковских цепей и т. д.) идентифицировались путем статистической обработки реальных записей о погоде, полученных из нескольких альтернативных источников. Среди них данные погодной и ледовой обстановки на МЛСП за четыре года фактических измерений, многолетние архивы срочных наблюдений с нескольких ближайших метеостанций сети WMO, результаты обработки маринотраграмм с открытых метеорологических серверов, справочники и др.

Запуск генератора погоды в режиме моделирования в «будущем времени» позволяет эмулировать в имитационной модели наличие гипотетических краткосрочных прогнозов погоды длительностью 4—7 ч, характеризуемых 100%-ной оправдываемостью. Такой прогноз позволяет осуществлять оперативное планирование грузовых операций. Внешний вид панели погодного генератора в имитационной модели показан на рис. 3.

*Моделирование доступности грузовых терминалов МЛСП по природным условиям*

Основная сложность при определении доступности грузового терминала МЛСП для грузообработки судов в заданных природных условиях заключается в том, что принципиальное значение имеет не один природный параметр, а совместное значение нескольких показателей. При этом число возможных сочетаний 15 моделируемых природных параметров практически не ограничено, что исключает применение полного перебора. Вместо этого используется специальный эвристический алгоритм, ориентированный на ключевые показатели и их пороговые совместные значения. В качестве основы для создания алгоритма использованы: регламенты выполнения грузовых операций на МЛСП; статистические данные реальных грузовых операций на МЛСП; результаты моделирования работы судов при различных погодных и ледовых условиях в навигационном тренажере КГНЦ; экспертные оценки капитанов судов, выполняющих грузовые операции у платформы. Доступность всех грузовых терминалов МЛСП моделируется по принципу светофора, который далее также используется в имитационной модели:

- «зеленый» — разрешены подход, швартовка и грузовые операции;
- «желтый» — разрешены только грузовые операции (подход запрещен);
- «красный» — подход запрещен.

Принципиальная блок-схема алгоритма определения доступности КУПОН приведена на рис. 4, где цветом выделены результирующие показатели «светофора».

В начале алгоритма выполняется проверка базовых условий: дальность видимости не должна быть менее 300 м, температура — менее  $-40^{\circ}\text{C}$ , также должны отсутствовать сжатия льда. Если базовые условия выполняются, производится дальнейшая проверка для случая наличия и отсутствия льда, которая в обоих случаях начинается с проверки основных регламентных условий. При отсутствии льда эти условия заключаются в том, что направления ветра, волнения и течения укладываются в сектор доступности КУПОН (см. рис. 1), а абсолютные значения не превышают пороговых. В случае наличия льда эти требования дополняются требованиями по толщине льда при сохранении условия благоприятного направления дрейфа. Понятно, что основные регламентные условия выполняются далеко не всегда, однако это не означает, что грузовые операции невозможны, поэтому далее проверяются специфические эксплуатационные случаи.

При отсутствии льда последовательно проверяются: случай сильного ветра благоприятного направления при слабом течении произвольного направления и благоприятной волне высотой менее 3,5 м; случай произвольного слабого ветра при сильном благоприятном течении и волне менее 0,5 м; случай, когда у МЛСП установился практически штиль при

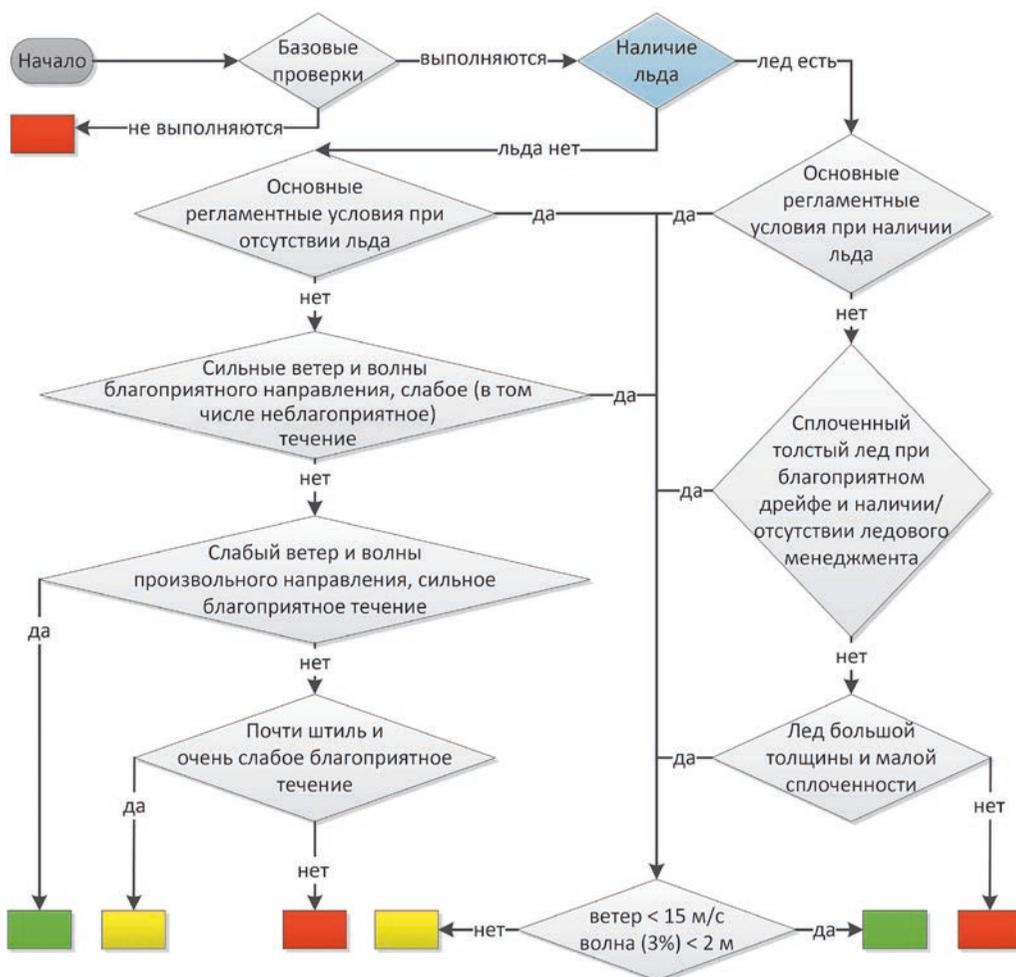


Рис. 4. Принципиальная блок-схема алгоритма определения доступности КУПОН

слабом благоприятном течении. При наличии льда у МЛСП рассматриваются дополнительные эксплуатационные случаи: случай сплоченного толстого льда при благоприятном дрейфе (отдельно при наличии и при отсутствии ледового менеджмента), случай льда большой толщины и малой сплоченности при благоприятном направлении дрейфа.

Схожие по принципам алгоритмы были разработаны и для грузовых терминалов снабженцев, а также для гипотетического варианта добавления в состав МТТС выносного ледостойкого отгрузочного нефтяного терминала кругового действия. В последнем случае учитывались не совместные значения природных параметров, а скорости изменения внешних воздействий по направлению. При этом в качестве допустимого угла изменения направлений ветра, волнения, течения и дрейфа льда в течение одного часа был принят угол 90°.

#### Информационные модели судов

Описание судна в составе транспортной системы производится по следующим направлениям: основные проектные характеристики, грузовые пространства, средства грузообработки, состояния загрузки,

группы гребных винтов. Эти данные используются при планировании рейсов и при имитационном моделировании. Информационные модели созданы для:

- арктического челночного танкера проекта P-70046 («Михаил Ульянов»);
- транспортно-буксирного судна проекта Moss 828 MISV («Владислав Стрижов»);
- транспортно-буксирного судна проекта Navyard 843 Ice («Алеут»).

Для каждого типа судна определены грузовые пространства: танки, балки и грузовые палубы, в которых могут перевозиться массовые (наливные и насыпные) и генеральные грузы. А для каждого грузового пространства заданы назначение и площадь или объем, а также специфицированы судовые средства грузообработки, характеризующиеся производительностью.

Состояния загрузки танкеров предусмотрены двух типов — в грузу и в балласте, а для судов-снабженцев введено одно состояние, поскольку такие суда имеют близкую посадку во всех эксплуатационных случаях загрузки. Для каждого состояния определены: эксплуатационные качества (водоизмещение,

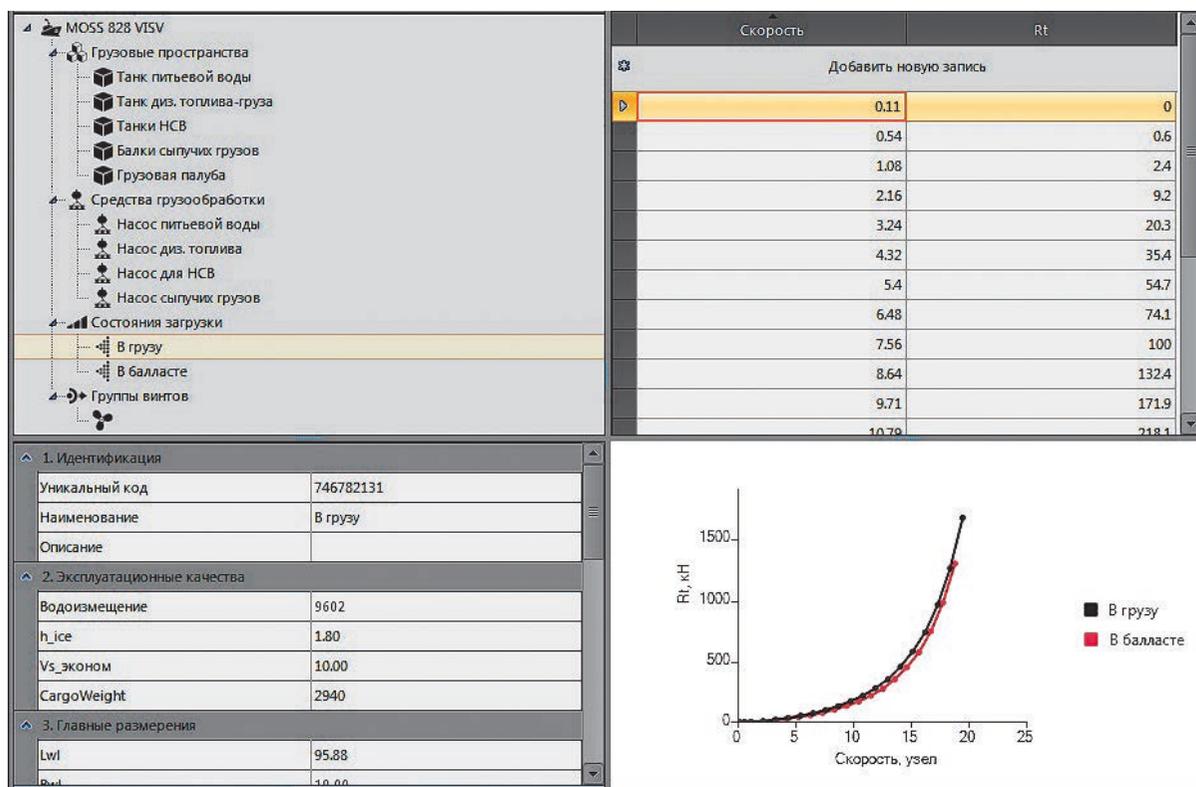


Рис. 5. Описание параметров судна в информационной модели



Рис. 6. Реконструкция обводов танкера (слева) и судна снабжения (справа)

ледопроездимость, экономичная скорость, масса груза), главные размерения по ватерлинии, параметры формы корпуса (коэффициенты полноты, смоченная площадь), параметры ходкости (кривая сопротивления на тихой воде, кривая коэффициента засасывания). Данные по движителям включают: главные характеристики (диаметр, мощность на валах, предельные обороты), коэффициенты упора и момента, коэффициенты взаимодействия с корпусом судна. Пример интерфейса описания судна приведен на рис. 5.

Для формирования подробных информационных описаний судов была выполнена реконструкция их обводов (рис. 6), которые использовались как при определении параметров формы, так и при расчетах сопротивления на тихой воде и коэффициентов взаимодействия. Верификация полученных ходовых параметров моделей судов выполнялась на основе протоколов натурных сдаточных испытаний, что позволило подтвердить высокую степень точности модельных параметров и методов расчета. В частности, отклонения достижимой скорости судов по расчетной

модели и по натурным данным в одинаковых условиях ветра и волнения вошли в интервал  $\pm 0,2$  узла.

Расчеты скоростей хода и расходов топлива судов в эксплуатационных условиях всех типов в имитационной модели производились в соответствии с принципами, указанными в [1].

### Модель грузопотоков нефти и снабжения

Расчетные значения грузопотоков снабжения МЛСП и добычи товарной нефти на платформе были получены на период до 2038 г. — момента окончания моделирования МТТС.

Для определения потоков грузов снабжения в качестве исходных использовались фактические данные по обороту тары за 2015—2016 гг., а также прогнозные значения обобщенных (без привязки к таре) грузопотоков снабжения МЛСП и вывоза отходов на период до 2038 г. Прогнозные грузопотоки включают следующие позиции: сыпучие материалы, ГСМ, пресная вода, нефтесодержащие воды, химические реагенты, оборудование, продукты, твердые бытовые отходы, промышленные отходы, трубная

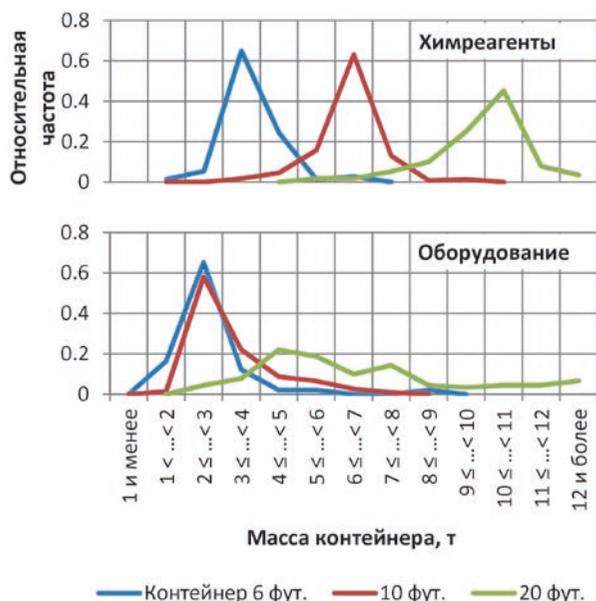


Рис. 7. Распределение массы 6-, 10- и 20-футовых контейнеров с грузом оборудования и химреагентов

продукция, шлам. Задача заключалась в определении годовых грузопотоков снабжения в терминах количества перевозимых тарных единиц и количества бестарных грузов в направлениях «на МЛСП» (прямой грузопоток) и «с МЛСП» (обратный грузопоток).

Для этого вначале на основе анализа данных о грузообороте тары был определен расчетный состав типов тарных единиц, причем из 25 реально используемых типов тары (контейнеры и транспортные корзины) для дальнейшего моделирования оставлено только 10, которые обеспечивают 95% перевозок. Далее была определена масса каждой тарной единицы с грузами различных типов (рис. 7), а также установлена доля, которую каждая тарная единица занимает в грузопотоке по каждому типу груза. Например, 8—12% объема химреагентов доставляются в 6-футовых контейнерах, 68—74% — в 10-футовых, 14—25% — в 20-футовых.

Затем прогнозные грузопотоки МЛСП были «расфасованы» в определенную ранее тару, при этом учтено, что вывозимые с МЛСП грузы перевозятся с использованием той же тары, что и завозимые грузы. Для уравнивания численности завезенных за годовой период и вывезенных за это же время тарных единиц всех типов был использован поисковый алгоритм математического программирования. В качестве ограничений использовалась матрица, определяющая соотношение типов грузов в завезенной и вывозимой тарной единице.

Далее было выполнено упрощение описаний тарных грузопотоков, чтобы обеспечить удобство их дальнейшего использования в планировании и имитационном моделировании без значимого снижения точности модели. Для этого все тарные грузы (кроме шламовых контейнеров, которые напрямую связаны

с объемами вывозимого шлама, и трубной продукции, объемы поставок которой зависят от интенсивности бурения и ремонта скважин) были представлены как условные контейнеры «на МЛСП» и «с МЛСП». Численность условных контейнеров принята равной численности реальных грузовых единиц, а их площадь, масса и объем — некие усредненные величины, которые косвенно отображают соотношение типов используемой тары и реальную структуру грузопотоков платформы. Моделирование работы системы с использованием описанных условных контейнеров вместо 10 натуральных тарных единиц позволило корректно моделировать загрузку судов и длительность грузообработки, значительно уменьшив при этом вычислительную сложность модели.

Определение прогнозной интенсивности добычи нефти на МЛСП в период до 2038 г. выполнено с использованием действующего графика бурения и расчетов планируемых годовых показателей добычи нефти, жидкости и газа на каждой скважине. В результате получены детерминированные плановые ежесуточные показатели добычи нефти с учетом ремонтов отдельных скважин, в ходе которых прекращается добыча на ремонтируемой скважине, и технических обслуживаний МЛСП, когда добыча останавливается полностью (рис. 8).

Полученные прогнозы грузопотоков наряду с текущей конфигурацией флота МТТС являются основными исходными данными для дальнейшего планирования перевозок.

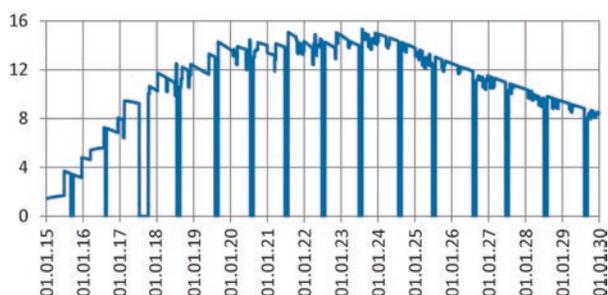


Рис. 8. Расчетная интенсивность добычи нефти на МЛСП, тыс. т/сут

### Алгоритм тактического планирования перевозок

Задача тактического планирования заключается в получении расписания рейсов всех судов (танкеров и судов снабжения) на период моделируемого цикла работы системы. План должен содержать загрузку судов в каждом рейсе и рационально удовлетворять ограничениям, в роли которых выступают требования обеспечения интегральных объемов перевозок и доставки грузов к срокам, обусловленным технологическими процессами на платформе. Тактический план рейсов используется в качестве входных данных для имитационной модели. С методической

точки зрения планирование рейсов судов снабжения является более общим случаем, чем планирование челночных танкеров, поскольку последние работают только с одним типом груза и не имеют обратной загрузки.

Методы планирования работы судов снабжения в настоящее время разрабатываются главным образом норвежскими специалистами [2—4]. Создаваемые ими методы нацелены на получение строгого решения задачи снабжения большого количества платформ (точек снабжения), включая наилучшую последовательность обхода. Расписание рейсов и необходимое количество судов определяются для каждого сезона года на основе так называемой базовой недели — временной ячейки организационной структуры системы снабжения. Сильной стороной таких методов является использование формальных математических алгоритмов и получение оптимального решения задачи маршрутизации. Однако из-за высокой вычислительной сложности используемых алгоритмов модель транспортной системы имеет низкую степень детализации. В частности, отсутствует планирование загрузки судов в рейсах, грузы снабжения не разделяются по типам, принимается допущение о равномерности грузопотоков и неизменности природных условий в течение сезона. В настоящей работе такой подход оказывается неприменим, так как существенное значение имеют именно указанные организационно-технические детали работы МТТС. При этом точка снабжения (МЛСП) всего одна, что позволяет обойтись без решения задачи оптимального обхода. Поэтому был разработан специальный эвристический алгоритм тактического планирования, который более подробно описан в [5].

Основная идея примененного подхода состоит в удовлетворении критических потребностей снабжения «от начала к концу» и выборе лучшего судна-исполнителя с учетом ограничений на объемы

стационарных и судовых хранилищ, характерных времен рейсов и длительности грузовых операций. Алгоритм планирования воспроизводит динамику наполнения грузовых хранилищ и площадок МЛСП, однако в отличие от имитационной модели в нем отсутствуют стохастические факторы, а сам план создается «оптимистичным», что позволяет раскрыть все возможности транспортной системы при его исполнении. Работа модуля планирования организована таким образом, чтобы максимально отдалить момент переполнения или опустошения (в зависимости от направления грузопотока) хранилищ на платформе. В качестве входных данных для создания плана выступают:

- полное описание параметров объектов, входящих в МТТС, в том числе конфигурации грузовых пространств судов и платформы;
- расположение платформы, порта отгрузки нефти и базы снабжения;
- характеристики перевозимых грузов: объем, масса, плотность и занимаемая площадь, а также матрица, определяющая возможность совместной перевозки грузов;
- расчетные грузопотоки по всем типам грузов;
- природные условия на маршрутах следования судов, позволяющие определять расчетное время рейса для любого дня года;
- среднестатистические длительности грузовых операций на платформе и базе снабжения для каждого типа судов по месяцам года.

Фрагмент итогового плана операций судов приведен на рис. 9.

### Дискретно-событийная модель операций судов у МЛСП

Специализированной составляющей разработанной динамической имитационной модели, расширяющей возможности описанных в [1] базовых подходов,

Судно	ID	Имя	Тип	Начало	Продолжительность	Контекст
Кирилл Лавров	1292606658	Портозаход: Порт Мурманска	Портозаход	16.06.2020 5:47:22	00:22:04	Порт Мурманска
Кирилл Лавров	2984136093		Перемещение	17.06.2020 3:52:10	02:05:47	МТС
Кирилл Лавров	2943894766	Портозаход: МЛСП Приразломная	Портозаход	19.06.2020 9:39:32	04:14:20	МЛСП Приразломная
Алеут	2967322087	Портозаход: Порт Мурманска	Портозаход	20.06.2020 15:14:40	03:01:46	Порт Мурманска
	ID	Тип	Начало	Продолжительность	Контекст	
	808178848	Грузообработка	20.06.2020 15:14:40	03:01:46		
	ID	Тип	Начало	Продолжительность	Контекст	Количество
	3529348316	Погрузка	20.06.2020 15:14:40	03:01:46	Унифиц. контейнер на МЛСП	17.00
	1642215481	Погрузка	20.06.2020 15:14:40	03:01:46	Шламовый контейнер пустой	28.00
	341883378	Погрузка	20.06.2020 15:14:40	03:01:46	Трубы на МЛСП	24.00
	1249232298	Погрузка	20.06.2020 15:14:40	03:01:46	Вода питьевая	349.04
	2132471918	Погрузка	20.06.2020 15:14:40	03:01:46	Порошковый груз на МЛСП	10.53
	4236894351	Погрузка	20.06.2020 15:14:40	03:01:46	Топливо (ФО)	65.89
Юрий Топчев	3699425109		Перемещение	21.06.2020 4:10:20	02:17:51	МТС
Владислав Стриков	1922857914	Портозаход: МЛСП Приразломная	Портозаход	21.06.2020 4:10:20	05:00:00	МЛСП Приразломная
Михаил Ульянов	2071717160	Портозаход: Порт Мурманска	Портозаход	21.06.2020 5:11:07	00:22:04	Порт Мурманска

Рис. 9. Фрагмент интерфейса отображения тактического плана операций. Дискретно-событийная модель операций судов у МЛСП

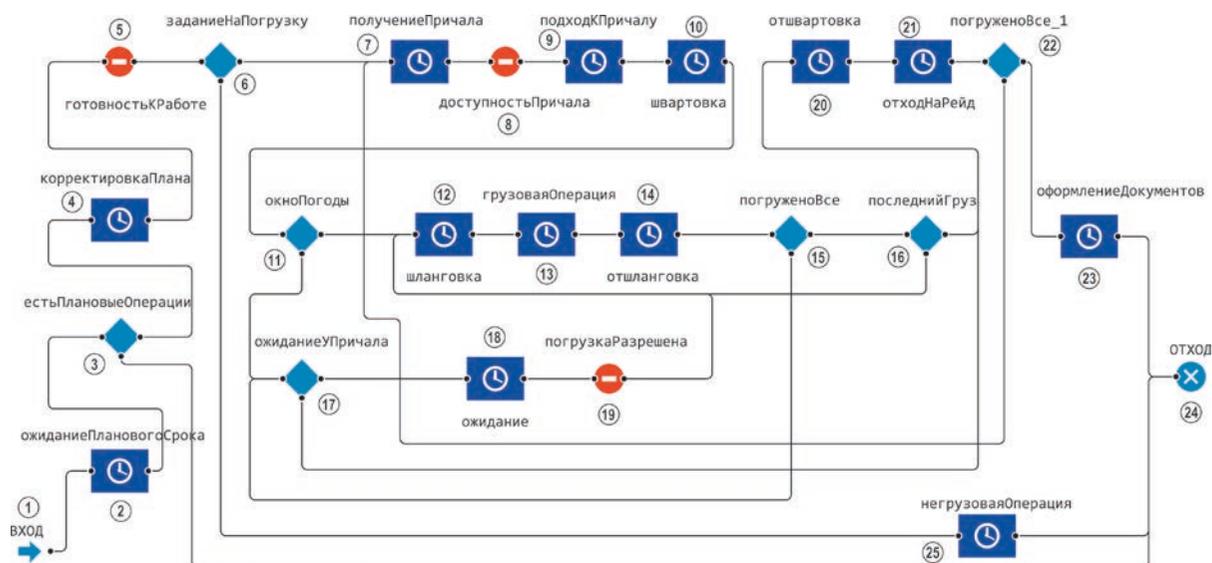


Рис. 10. Потокная диаграмма прохождения заявок на погрузку/выгрузку судна для МЛСП

является подмодель работы судов (танкеров и судов снабжения) у терминалов МЛСП. В нее заложена возможность проведения последовательных операций с грузами различных типов, заблаговременного прерывания операции при ожидаемом прекращении «окна погоды» с пережиданием неблагоприятного периода у терминала, переходом к альтернативному терминалу или отходом судна за пределы трехмильной зоны МЛСП. Полный вид соответствующей дискретно-событийной потоковой диаграммы в нотации AnyLogic® приведен на рис. 10.

Рождение новой заявки происходит в элементе «Вход» 1 в момент подхода очередного судна к границе трехмильной зоны МЛСП. Заявка однозначно связана с экземпляром судна-исполнителя. Задержка судна на рейде МЛСП 2 срабатывает в случае опережения судном планового графика движения, если возможность опережения плана (настраиваемый параметр) отключена. Далее производится проверка 3, позволяющая установить, имеется ли среди плановых операций судна хотя бы одна операция у МЛСП. Полагается, что операции могут быть грузовыми или вспомогательными (дежурство, ледокольное обеспечение), однако последний тип операций в настоящей работе не моделировался, так как он не оказывает влияния на движение грузов, а лишь требует наличия дополнительных судов для выполнения нетранспортных функций. В следующем элементе 4 производится оперативное перепланирование последовательности грузовых операций — ранжирование нескольких грузов снабжения по приоритету на основании фактического уровня наполнения хранилищ. Для танкеров, осуществляющих перевозку только одного груза, элемент 4 имеет формальный характер. Далее в барьере 5 осуществляется проверка наличия минимальной партии груза, которая позволяет начать грузообработку. Объем минимальной

партии для грузов снабжения составляет 17% планового размера, а для нефти — 13 000 м<sup>3</sup>. Барьер 5 проходит без задержек, если текущая операция вспомогательная, моделируемая как задержка 25 с некой плановой длительностью. Проверка типа операции производится в элементе 6.

Грузовые операции судна начинаются с получения причала (конкретного терминала на МЛСП), что происходит в «накопительном» элементе 7. Этот элемент имеет нулевую базовую длительность, и с его помощью формируется очередь заявок, ждущих освобождения причала. Фактическая же длительность определяется сроком ожидания свободного терминала в ходе работы модели. Заявка не может покинуть задержку 7 до тех пор, пока не откроется барьер 8, представляющий собой проверку доступности причала. Она, в свою очередь, представляет собой нетривиальный алгоритм ситуационного тактического планирования, позволяющий выполнять анализ всех терминалов МЛСП на предмет их соответствия как текущему состоянию конкретной заявки, так и общей картине всех выполняемых на данный момент заявок. Критерии возможности «выделения» терминала текущей заявке таковы: пригодность терминала по размерениям судна и типам обрабатываемых грузов; отсутствие других судов у данного терминала или у сопряженного терминала, совместная работа на которых запрещена; наличие на терминале «окна погоды», прогнозируемая длительность которого больше минимальной; отсутствие в очереди других, более приоритетных заявок, «претендующих» на данный терминал (например, начиная с определенного уровня наполнения хранилища танкеры имеют приоритет над судами снабжения).

При положительном результате проверки 8 подходящий терминал выделяется заявке как текущий ресурс, судно осуществляет подход к терминалу (временная задержка 9) и швартуется (задержка 10).

Если в данный момент есть «окно погоды» 11, то осуществляется шланговка 12, длительность которой зависит от типа судна и вида груза, и затем начинается погрузка. Элемент 13 — это временная задержка, отвечающая процессу непрерывного последовательного исполнения тактов погрузочно-разгрузочной операции (длительность такта — 1 ч), причем интенсивность погрузки — это случайная величина, подчиняющаяся заданному закону распределения для конкретного сочетания факторов груз/судно/терминал. Фактическое время погрузки определяется как временной промежуток до наступления любого из следующих событий: окончание погрузки/разгрузки планового объема, исчерпание текущего груза или отсутствие свободного места в хранилище, ожидание скорого окончания «окна погоды» выделенного терминала, прибытие вертолета. Когда фиксируется одно из этих событий, в задержке 14 моделируется отшланговка судна, а затем выполняется проверка условия 15, определяющего, выполнен ли полностью план погрузки/отгрузки текущего груза. Если план еще не выполнен, то заявка следует к элементу 17, где производится проверка условия возможности пережидания «окна непогоды» судном без отшвартовки и отхода от терминала. Если последнее условие не выполняется или если проверка 16 установила, что судно полностью выполнило план грузовых операций по всем грузам, то судно отходит от терминала за границы трехмильной зоны. Если ожидание у причала разрешено, заявка переходит в «накопительный» элемент 18 — задержку с нулевой базовой длительностью, фактическое значение которой определяется моментом открытия барьера 19. Проверка условия доступности выделенного терминала в 19 производится по тем же критериям, что и для барьера 8, но с дополнительным учетом факта готовности товарной партии.

Операции отхода судна за пределы трехмильной зоны моделируются временными задержками на отшвартовку 20 и сам отход 21. После этого в элементе 22 производится проверка исполнения плана грузообработки по всем грузам, и в случае положительного результата в задержке 23 моделируется выполнение заключительных организационных формальностей, связанных с документальным оформлением. В элементе 24 происходит завершение жизненного цикла заявки, и производится запись сведений о параметрах выполненных операций.

Вероятностные характеристики длительности операций 9, 10, 12, 13, 14, 20, 21, 23 получены путем анализа и статистической обработки данных записей судовых операционных журналов за период фактической эксплуатации «Приразломной». В общей сложности была проанализирована статистика по 11 тыс. операций танкеров («Кирилл Лавров», «Михаил Ульянов»), судов обеспечения («Владислав Стрижов», «Юрий Топчев», «Алеут», «Кигориак», «Венгери», «Мурман», «Dina Star», «Bourbon Rainbow», «Fivel», «Bourbon Viking», «Navila Crusader», «Sayan Princess») и прочих судов, которые

привлекались для выполнения специализированных операций на короткие сроки («Хатанга», «Варзуга», «Neptune», «Poseidon»), а также вертолетов. Помимо использования при определении длительности операций в имитационной модели эти данные были востребованы в качестве исходной информации для анализа натурной логики работы судов и вертолетов в ходе создания модели, а также при подготовке натуральных данных для верификации имитационной модели МЛСП.

### Модель управления интенсивностью добычи

Добычное оборудование МЛСП позволяет осуществлять ситуативное снижение интенсивности добычи нефти по сравнению с плановыми номинальными показателями, показанными на рис. 8. Это значительно повышает гибкость системы хранения и перевозки нефти, позволяя компенсировать длительные неблагоприятные погодные явления и различные отклонения от логистического плана. Для учета этой технологической особенности в имитационной модели была реализована подмодель управления добычей, которая схематически описывает реальные технологические процессы МЛСП. Модель реализована с помощью простого конечного автомата с пятью возможными состояниями: плановая добыча, снижение, сниженная добыча, останов, восстановление добычи.

Вводится условная расчетная величина — срок до полного наполнения хранилища, который принят равным трем дням в соответствии с временем, требуемым для штатного останова добычных насосов. Если свободного места в хранилище осталось меньше, чем на три дня добычи, то производится плавное линейное снижение производительности добычных насосов со скоростью 0,55% в час до достижения нижней планки, которая составляет 63% плановой интенсивности. Если даже при сниженной интенсивности добычи хранилище МЛСП полностью наполнится, производится останов. После того, как в результате отгрузки нефти на танкеры свободный объем хранилища нефти окажется достаточным для обеспечения трех дней добычи (в соответствии с плановой интенсивностью), производится плавное повышение производительности насосов со скоростью 0,28% номинальной интенсивности в час. Пример динамики добычи и уровня наполнения хранилища для случая постоянной плановой интенсивности 12 тыс. м<sup>3</sup>/сут показан на рис. 11, где в качестве «порогового наполнения» отмечен уровень хранилища, соответствующий принятому сроку до полного наполнения.

### Верификация имитационной модели

Важным этапом создания имитационной модели являлась ее комплексная верификация на основе натуральных данных. Для этого использовались интегральные модельные параметры, являющиеся продуктом сложного взаимовлияния ряда имитируемых процессов, таких как изменение параметров

природных условий, планирование рейсов и загрузки судов, взаимодействие судов танкерного флота и судов обеспечения при работе у МЛСП. В качестве таких параметров для танкерного флота могут быть выбраны, например, число подходов танкера к КУПОН до полной загрузки и длительность одной непрерывной погрузки танкера у КУПОН. Сопоставление натуральных и модельных значений этих параметров для существующей конфигурации МТТС показано на рис. 12.

Модельные параметры оказываются статистически неотличимыми от натуральных. Помимо этого верификация модели выполнялась по данным о длительности перехода судов между МЛСП и Мурманском, длительности нахождения танкеров и судов снабжения у МЛСП и по другим характерным параметрам. Это позволило доказать, что созданная имитационная модель статистически адекватно описывает работу реальной системы.

### Результаты моделирования

На основе созданного программного инструмента была смоделирована работа более 30 различных вариантов конфигурации транспортной системы МЛСП «Приразломная». Программа исследований включала анализ влияния на эффективность системы 11 улучшающих мероприятий организационно-технического характера, имеющих различные масштаб и стоимость реализации. Степень влияния этих факторов на МТТС оценивалась относительно «базового» референсного варианта системы, который соответствует существующей конфигурации с некоторыми уже реализуемыми в данное время улучшениями. Достижимый уровень улучшения показателей МТТС при реализации мероприятий, условно названных «организационными» (мероприятия № 1—6), обосновывался не только на основе натуральных данных и оценок судоводителей, но и с помощью навигационного моделирования операций судов в исследовательском тренажере

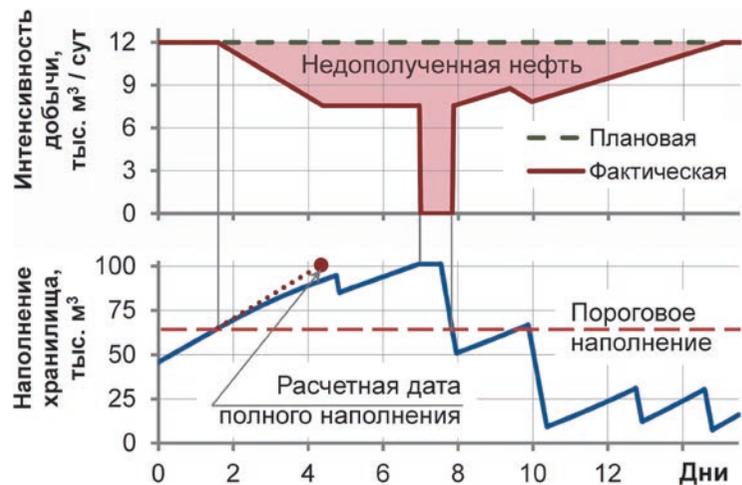


Рис. 11. Иллюстрация алгоритма ситуативного управления уровнем добычи

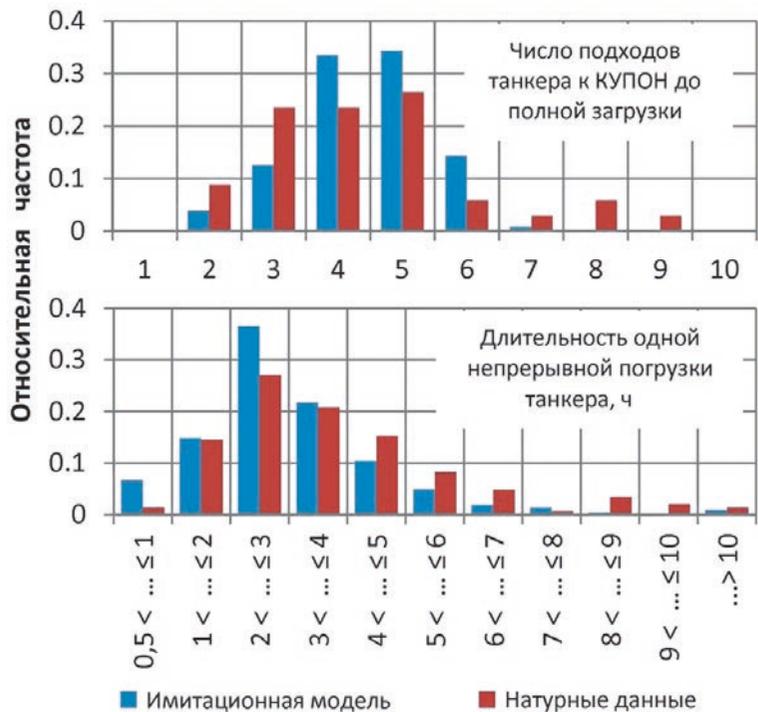


Рис. 12. Сопоставление натуральных и модельных параметров работы танкеров

комплексе КГНЦ. Для оценки параметров мероприятий № 10—11, подразумевающих капитальное строительство, были выполнены специальные проектные проработки.

Цель исследования заключалась в поиске оптимального сочетания улучшающих мероприятий с позиций соотношения затрат и достигаемого снижения объемов недополученной нефти за весь период работы МТТС. В соответствии с этим был создан план расчетного эксперимента: вначале было исследовано изолированное влияние каждого мероприятия на эффективность МТТС в ледовых условиях различного типа, а затем на основе полученных результатов и по согласованию с ГНШ были исследованы конфигурации с комплексными улучшениями. Сводные результаты исследования показаны в табл. 1, где для случая изолированного влияния показан средний процент снижения объемов недополученной нефти, а для случая совместного использования

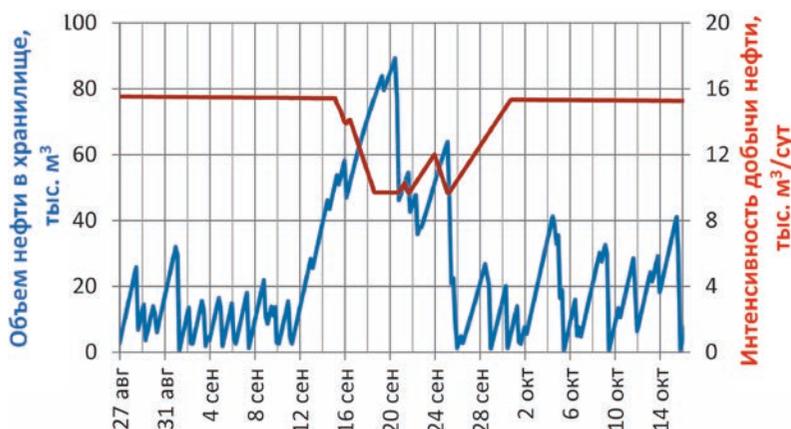


Рис. 13. Изменение модельной интенсивности добычи нефти в соответствии с алгоритмом ситуативного снижения

Таблица 1. Исследуемые мероприятия, повышающие эффективность МТТС

№ п/п	Мероприятие	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 ч	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 ч	25	
5	Повышение средней производительности отгрузки нефти на 60%	38	
6	Снижение минимальной длительности используемых танкерами «окон погоды» с 6 до 4 ч	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	—

приведен интегральный эффект от применения мероприятий № 1—5 и указано, какое дополнительное снижение потерь можно получить, если вдобавок к улучшениям № 1—5 применять одно из мероприятий № 6—9. Как видно, вследствие сложного нелинейного характера всей системы положительные эффекты от различных мероприятий не обладают свойствами аддитивности, однако степень их влияния при совместной реализации в целом не изменяется.

Варианты капитального строительства терминала или дополнительного хранилища показали абсолютный эффект — отсутствие недополученной нефти. Однако их практическая реализация оказалась настолько дорогостоящей и технологически сложной, что они были исключены из дальнейшего рассмотрения. Согласно модельным оценкам объем гипотетического дополнительного хранилища нефти гравитационного типа составил 60 тыс. м³.

Сопоставление вариантов МТТС производилось не только по показателям объема недополученной нефти, но и по характеристикам случаев принудительного снижения добычи (пример реализации такого случая показан на рис. 13).

Для получения статистических оценок этих показателей с высоким уровнем обеспеченности производился многократный запуск имитационной модели. Всего в ходе работы было выполнено более 12 000 имитационных «прогонов» работы системы до 2038 г., что потребовало более 3000 ч машинного времени. Для всех рассмотренных вариантов МТТС величина суммарного объема недополученной нефти хорошо описывается гамма-распределением, суммарное число случаев снижения — законом Пуассона, а длительность события снижения добычи — гамма-распределением, близким по форме к экспоненциальному. Пример этих распределений для конфигурации МТТС с комплексными организационными улучшениями



Рис. 14. Основные параметры одного из улучшенных вариантов конфигурации МТТС

(№ 1—6) в ледовых условиях легкого типа приведен на рис. 14. На рисунке, в частности, видно, что средний прогнозный объем недополученной нефти равен 150 тыс. т, что составляет всего 0,2% от 70 млн т извлекаемых запасов, т. е. близко к погрешности оценки последних. Необходимость внепланового останова может возникнуть только в период снижения добычи, что гарантирует применение штатных технологических процедур для его осуществления. Для всех конфигураций число внеплановых остановов составляет 0,3—1,2% суммарного числа случаев снижения, причем меньшие значения соответствуют улучшенным конфигурациям.

Распределения объемов недополученной нефти и случаев снижения добычи по годам оказываются пропорциональными грузопотоку, а зависимость этих параметров от месяца года имеет выраженные пики в осенний и зимне-весенний периоды. Соотношение этих пиков зависит от степени тяжести ледовых условий (рис. 15).

В целом из всех мероприятий № 1—9 наибольшее воздействие на повышение эффективности системы оказывает расширение доступности КУПОН за счет использования коротких «окон погоды» длительностью 4 ч и более. При этом отличие суммарной длительности шестичасовых «окон погоды» от четырехчасовых достаточно невелико: первые занимают 51% времени года, а вторые — 60%. Однако решающее значение для рассматриваемой МТТС имеет не суммарная длительность «окон погоды», а наличие возможности подхода танкера к платформе в «нужный» момент работы системы, причем на регулярной основе, что для четырехчасовых окон наблюдается гораздо чаще, чем для шестичасовых.

Эти же причины обуславливают неожиданный эффект, когда введение в систему дополнительного танкера, резко повышающего провозоспособность морской линии, очень слабо сказывается на показателях рассматриваемой МТТС, в которой добыча перевозимого сырья осуществляется по графику при ограниченном объеме хранения и наличии природных ограничений системы отгрузки. На рис. 16 показано распределение годового бюджета времени МЛСП в период максимальной добычи при наличии в составе МТТС двух и трех танкеров, а также при различной длительности используемых «окон погоды».

Как видно, время, необходимое для выполнения грузовых операций танкеров, занимает всего около



Рис. 15. Распределение случаев снижения добычи нефти по месяцам года при работе в ледовых условиях различного типа

18% длительности года, тогда как суммарное время, когда хотя бы один танкер присутствует у МЛСП, составляет 82% для МТТС с двумя танкерами и 100% с тремя. Для случая трех танкеров МЛСП находится либо в состоянии грузообработки (18%), либо в состоянии ожидания «окна погоды» при наличии танкера (40%), либо в состоянии ожидания танкером накопления нефти в момент, когда есть «окно погоды» (42%). Если в составе МТТС имеется два танкера, то время отсутствия танкера у МЛСП разделяется на: время, когда нет «окна погоды» (6—8%); время, когда «окно погоды» есть, но еще не накоплено достаточного количества нефти для отгрузки на танкер (8—11%); а также время, когда имеются и требуемая партия нефти, и «окно погоды» терминала (1—3%). Последняя составляющая может быть названа временем «упущенных возможностей», которое при наличии в системе двух танкеров оказывается, как видно, очень невелико. При этом среднее время нахождения танкера у МЛСП в системе с двумя судами составляет 4,5 сут, что определяется временем накопления товарной партии нефти, а в системе с тремя танкерами — 9,6 сут, что связано с простоями танкеров у МЛСП в течение трети их эксплуатационного времени. Эти нетривиальные результаты обусловлены сложным взаимодействием динамики добычи нефти и изменения доступности грузового терминала по погодным условиям, которое может быть проанализировано только с помощью модели динамического типа.

Таким образом, основной результат описываемой работы заключается в том, что варианты, связанные с капитальным строительством и значительными

## Кораблестроение для Арктики



Рис. 16. Усредненные данные по использованию времени года в период максимальной добычи (в процентах от длительности года)

операционными затратами, были доказательно отвергнуты, а достижимые показатели МТТС при реализации комплекса организационных улучшений, стоимость которых невелика, были детально исследованы, и показана достаточность их применения для исследуемой МТТС.

Необходимо также отметить несколько специальных выводов, которые были получены при рассмотрении «гипотетических» вариантов МТТС, но, однако, имеют практическую ценность и могут быть учтены при проектировании будущих объектов шельфовой техники.

Исследование системы, в которой суда снабжения никак не мешают грузообработке танкеров, показало, что это позволяет значительно повысить эффективность системы, снизив объемы недополученной нефти и число случаев снижения добычи на 30—50%. Другими словами, если имеется техническая возможность расположить терминалы снабжения и отгрузки добытой продукции таким образом, чтобы они не создавали взаимных ограничений, этой возможностью следует воспользоваться.

Комплекс численных исследований был выполнен для различных конфигураций МТТС с отключенным алгоритмом управления интенсивностью добычи нефти. В ходе этих исследований для каждого варианта МТТС итеративно определялось значение интенсивности добычи нефти, которое сводит к минимуму вероятность критического инцидента — условного «перелива» хранилища. Эти эксперименты убедительно показали, что достижимые грузопотоки нефти в такой системе оказываются в разы ниже, чем в случае, когда имеется возможность ситуативного снижения уровня добычи. Причина состоит в том, что возможные пиковые значения наполнения хранилища, возникающие в результате редкого неблагоприятного стечения природных и логистических факторов, могут достигать значений, которые в 7—10 раз выше типовых эксплуатационных уровней наполнения. Поэтому для того, чтобы гарантировать безопасность системы, гораздо рациональнее предусмотреть штатную возможность снижения уровня добычи в неблагоприятные периоды и недополучать за счет этого небольшое количество сырья,

чем строить хранилище, ориентированное на максимальное пиковое наполнение.

Ряд конфигураций МТТС с двумя и тремя танкерами был исследован на предмет определения «номинальной» провозоспособности морской линии. Для этого было введено условие: в хранилище МЛСП всегда есть нефть, т. е. танкеры могут брать нефти «столько, сколько смогут». При этом продолжали учитываться природные условия, ограничения системы отгрузки и работа судов снабжения. В результате годовой грузопоток в системе с двумя танкерами составил 6,5—6,7 млн т, а с тремя — 9,4—9,7 млн т, что значительно выше реального исследованного грузопотока, достигающего 5 млн т. Это позволяет говорить о том, что динамика добычи и ограничения, связанные с хранилищем, оказывают значительное влияние на провозоспособность всей системы и поэтому должны обязательно учитываться при анализе МТТС.

### Заключение

Результаты настоящей работы, инициированной компанией «Газпром нефть шельф», послужили основой для принятия управленческих решений на верхнем уровне организации, а полученные рекомендации внедряются в практику работы МЛСП «Приразломная» и реализуются в виде руководящих документов. Экономический эффект от данной работы представляется весьма значительным.

Не будет преувеличением декларировать, что использованный подход — мультипарадигменное имитационное моделирование — это единственный на сегодня реальный инструмент, позволяющий адекватно ответить на те вызовы, которые предъявляет необходимость комплексного анализа столь сложных объектов, как системы освоения шельфовых месторождений. Работам в этом направлении в последнее время посвящается значительное количество зарубежных научно-технических публикаций. Однако столь масштабное и детальное исследование работы реального объекта арктической шельфовой техники на основе дискретно-событийного и агентного имитационного моделирования было выполнено впервые в мировой практике.

## Литература

1. Таровик О. В., Топаж А. Г., Крестьянцев А. Б., Кондратенко А. А. Моделирование систем арктического морского транспорта: основы междисциплинарного подхода и опыт практических работ // Арктика: экология и экономика. — 2017. — № 1 (25). — С. 86—101.
2. Aas B., Gribkovskaia I., Halskau O., Shlopak A. Routing of supply vessels to petroleum installations // Intern. J. of Physical Distribution & Logistics Management. — 2007. — Vol. 37. № 2. — P. 164—179.
3. Gribkovskaia I., Norlund E., Maisiuk Y. Routing and fleet sizing for offshore supply vessels // Presentation at ROUTE-2014 International Workshop on Vehicle Routing, Intermodal Transport and Related Areas, Technical University of Denmark, June 1—4, 2014.
4. Maisiuk I., Gribkovskaia I. Fleet Sizing for Offshore Supply Vessels with Stochastic Sailing and Service Times / 2nd International Conference on Information Technology and Quantitative Management, ITQM-2014 // Procedia Computer Science. — 2014. — № 31. — P. 939—948.
5. Кондратенко А. А. Планирование работы флота на континентальном шельфе // Морские интеллект. технологии. — 2017. — Т. 1, № 1 (35). — С. 29—38.

---

## Информация об авторах

**Зайкин Дмитрий Аркадьевич**, заместитель начальника управления — начальник отдела эксплуатации флота, ООО «Газпром нефть шельф» (197198, Санкт-Петербург, Зоологический пер., 2-4, лит. Б, пом. 11Н), e-mail: zaykin.da@gazprom-neft.ru.

**Кондратенко Александр Алексеевич**, инженер первой категории, ФГУП «Крыловский государственный научный центр» (196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское ш., 44), e-mail: aleksandrkondratenko@live.com.

**Крестьянцев Андрей Борисович**, начальник сектора, ФГУП «Крыловский государственный научный центр» (196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское ш., 44), e-mail: a\_krestyantsev@ksrc.ru.

**Таровик Олег Владимирович**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, ФГУП «Крыловский государственный научный центр» (196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское ш., 44), e-mail: tarovik\_oleg@mail.ru.

**Топаж Александр Григорьевич**, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, ФГУП «Крыловский государственный научный центр» (196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское ш., 44), e-mail: alex.topaj@gmail.com.

## Библиографическое описание данной статьи

Таровик О. В., Топаж А. Г., Крестьянцев А. Б. и др. Комплексная имитационная модель морской транспортно-технологической системы платформы «Приразломная» // Арктика: экология и экономика. — 2017. — № 3 (27). — С. 86—102. DOI 10.25283/2223-4594-2017-3-86-102.

---

## COMPREHENSIVE SIMULATION MODEL OF MARINE TRANSPORT AND SUPPORT SYSTEM FOR “PRIRAZLOMNAYA” PLATFORM

Tarovik O. V., Topaj A. G., Krestyantsev A. B., Kondratenko A. A.

Krylov State Research Centre (St. Petersburg, Russian Federation)

Zaykin D. A.

Gazprom Neft Shelf (St. Petersburg, Russian Federation)

### Abstract

Modern information technologies make it possible to realize the proactive management of large offshore projects and find the best technical solutions during their design and operation. Therefore the LLC “Gazprom Neft Shelf” initiated the study on predictive analysis and risks prevention for “Prirazlomnoye” oil field. Project target was to increase the efficiency of transport system in front of plans to increase oil production from current 2.1 mln. t. per year up to 5 mln. t. in the year 2023.

The article describes in detail the multidisciplinary simulation model of marine transport and support system for “Prirazlomnaya” oil production platform. The simulation model, developed in Krylov State Research Centre, includes the methods and tools from different scientific fields and allows capturing such features of investigated system as:

- environmental conditions dynamics at the platform allocation and at the vessel routes;
- dynamics of oil production;
- consumption of supplies at the platform and production of waste (back cargoes);
- operation of tankers and supply vessels.

Model simulates the possibility of local reduction of oil production (in comparison with the planned values) due to

unfavorable weather conditions and logistical difficulties. The original generator of marine weather parameters was created in this study. It permits to model the dynamics of 15 ambient factors like winds, currents and waves force and direction, ice concentration and drift, visibility conditions, etc. At each step of model time the possibility of cargo operations at four platform terminals is determined by means of special algorithm considering weather restrictions, individual features of each terminal and ship operational parameters.

The description of vessels operating in the system was made with a high level of detail. Ship's description includes the information about main design parameters, cargo spaces, propellers, loading conditions and equipment for cargo handling. Two projects of support vessels and one project of shuttle tanker were considered.

Modeled platform needs are: transportation of oil, delivery of supplies and removal of waste. The estimated values of cargo flow cover the period up to the year 2038 and include: bulk materials, petroleum products, fresh water, oil recovery water, chemicals, equipment, products, solid domestic waste, industrial waste, pipe products and sludge.

A special pseudo-optimal voyage planning algorithm was developed to generate ship schedule and determine vessel loading at each voyage in accordance with specified cargo flow. This schedule forms a basis to run the simulation model. Voyage planning algorithm takes into account a number of specific features of "Prirazlomnaya" platform and allows planning the joint operation of supply vessels and tankers.

The results of model verification by means of the number of full-scale integral operational parameters are shown in the article.

A number of alternative solutions to increase the transportation system efficiency are analyzed using the developed simulation model. Obtained results are relevant not only for "Prirazlomnaya" platform, but also for arctic offshore industry in general. The results of simulation are used as the basis for making the managerial decisions in LLC "Gazprom Neft Shelf" and modifying of platform technological documents.

**Keywords:** marine transport system, production platform, weather generator, vessel voyage planning, supply vessels, arctic tankers, discrete event simulation, simulation of platforms.

### References

1. Tarovik O. V., Topazh A. G., Krestyantsev A. B., Kondratenko A. A. Modelirovaniye sistem arkticheskogo morskogo transporta: osnovy mezhdistsiplinarnogo podkhoda i opyt prakticheskikh работ. [Arctic Marine Transport System Simulation: Multidisciplinary Approach Fundamentals and Practical Experience]. *Arktika: ekologiya i ekonomika*, 2017, no. 1 (25), pp. 86—101. (In Russian).
2. Aas B., Gribkovskaia I., Halskau O., Shlopak A. Routing of supply vessels to petroleum installations. *Intern. J. of Physical Distribution & Logistics Management*, 2007, vol. 37, no. 2, pp. 164—179.
3. Gribkovskaia I., Norlund E., Maisiuk Y. Routing and fleet sizing for offshore supply vessels. Presentation at ROUTE-2014 International Workshop on Vehicle Routing. Intermodal Transport and Related Areas. Technical University of Denmark. June 1—4. 2014.
4. Maisiuk I., Gribkovskaia I. Fleet Sizing for Offshore Supply Vessels with Stochastic Sailing and Service Times. 2nd International Conference on Information Technology and Quantitative Management. ITQM-2014. *Procedia Computer Science*, 2014, no. 31, pp. 939—948.
5. Kondratenko A. A. Planirovaniye raboty flota na kontinentalnom shelfe. [Planning of Offshore Fleet Operation]. *Morskiye intellekt. tekhnologii*, 2017, vol. 1, no. 1 (35), pp. 29—38. (In Russian).

### Information about the authors

**Zaykin Dmitry Arcadieovich**, deputy head of directorate — chief of fleet operation department, Gazprom Neft Shelf (11H, letter B, 2-4, Zoologicheskij lane, St. Petersburg, 197198, Russia), e-mail: zaykin.da@gazprom-neft.ru.

**Kondratenko Aleksandr Alekseevich**, 1st rank engineer, Krylov State Research Centre (44, Moskovskoe shosse, St. Petersburg, 196158, Russia), e-mail: aleksandrcondratenko@live.com.

**Krestyantsev Andrey Borisovich**, head of sector, Krylov State Research Centre (44, Moskovskoe shosse, St. Petersburg, 196158, Russia), e-mail: a\_krestyantsev@ksrc.ru.

**Tarovik Oleg Vladimirovich**, PhD, senior research engineer, Krylov State Research Centre (44, Moskovskoe shosse, St. Petersburg, 196158, Russia), e-mail: tarovik\_oleg@mail.ru.

**Topaj Aleksandr Grigor'evich**, Dr. Sci. Tech., leading research engineer, Krylov State Research Centre (44, Moskovskoe shosse, St. Petersburg, 196158, Russia), e-mail: alex.topaj@gmail.com.

### Bibliographic description

Tarovik O. V., Topaj A. G., Krestyantsev A. B. et al. Comprehensive Simulation Model of Marine Transport and Support System for "Prirazlomnaya" Platform. *The Arctic: ecology and economy*, 2017, no. 3 (27), pp. 86—102. (In Russian). DOI 10.25283/2223-4594-2017-3-86-102.