

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ МОРСКОЙ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПЛАТФОРМЫ «ПРИРАЗЛОМНАЯ»

Д.А. Зайкин (ООО «Газпром нефть шельф»),
А.Б. Крестьянцев, О.В. Таровик, к.т.н., А.Г. Топаж, д.т.н.
(ФГУП «Крыловский государственный научный центр»)

Адрес для связи: shelf.pr@gazprom-neft.ru

Ключевые слова: буровая платформа, арктический шельф, имитационное моделирование, транспортировка нефти, платформа «Приразломная», флот обеспечения, арктические танкеры

Simulation model of sea transportation system for Prirazlomnaya platform

D.A. Zaykin (Gazprom Neft Shelf LLC, RF, Saint-Petersburg),
A.B. Krestyantsev, O.V. Tarovik, A.G. Topaj (Krylov State Research Centre, RF, Saint-Petersburg)

Article contains the description of simulation model of the marine transport and technology system (MTTS) of the Prirazlomnaya platform. Model allowed studying alternative solutions to increase the efficiency and functional stability of MTTS under the influence of a large number of full-size factors. Results of the simulation formed the basis for taking managerial solutions and amending process control documents.

Keywords: offshore platform, arctic shelf, simulation, crude oil transportation, Prirazlomnaya platform, support fleet, arctic tankers

Введение

Имитационное моделирование представляет собой детальное воспроизведение на компьютере течения изучаемых процессов в режиме модельного времени. В отличие от качественных и аналитических моделей имитационные модели в последнее время становятся одним из основных инструментов анализа, изучения и оптимизации сложных природных и технических систем, к которым относятся объекты освоения арктических шельфовых месторождений. Особенности эксплуатации шельфовых объектов затрудняют, а часто не позволяют использовать традиционных упрощенных аналитических подходов и «бумаги и ручки» для анализа их работы, особенно в сфере морской логистики.

Уникальным по сложности шельфовым объектом является работающая под управлением компании «Газпром нефть шельф» морская ледостойкая стационарная платформа (МЛСП) «Приразломная», единственная в мире осуществляющая добычу нефти на арктическом шельфе в условиях тяжелого льда и сложной гидрометеорологической обстановки. На МЛСП применяются самые современные и оригинальные

организационно-технические решения, проводится постоянная работа по повышению безопасности, эффективности, а также качества управления экологическими и технологическими рисками. За период, прошедший с момента введения платформы в эксплуатацию в 2014 г., всеми службами компании «Газпром нефть шельф» накоплен бесценный опыт по работе МЛСП и флота в сложных и постоянно изменяющихся условиях Арктики. Этот опыт является основой для уточнения плановых решений, заложенных в прошлом. На данном этапе ставится задача обеспечения проактивного управления работой МЛСП и флота на стратегическом уровне, т.е. перспективного анализа и предупреждения рисков, которые могут возникнуть в будущем.

Так, исходя из запланированных темпов роста интенсивности добычи нефти от текущих 2,3 млн т/год до приблизительно 5 млн т к 2022 г., возникла необходимость анализа работы морской транспортно-технологической системы (МТТС) вывоза нефти с платформы и доставки грузов снабжения с учетом практики работы флота. В состав комплексной МТТС входят собственно МЛСП, челночные танкеры и суда снабжения. При ана-

лизе работы МТТС важнейшим является определение комплекса мер, направленных на повышение устойчивости системы и снижение уровня прогнозной неопределенности. Для исследования работы МТТС платформы «Приразломная» применена технология имитационного моделирования и использован опыт Крыловского государственного научного центра в сфере исследования арктических транспортных систем [1].

Постановка задачи

Логистическая схема МЛСП включает два направления грузопотоков: ввоз грузов снабжения и вывоз нефти и технологических отходов. Стратегический план перевозок в первом приближении может быть составлен на основании простейших методов балансирования встречных грузопотоков, учета провозоспособности имеющегося состава флота и усредненных показателей времени рейсов и технологических операций. Однако полноценное исследование и адекватный прогноз выполнимости плана с оценкой вероятностных показателей и анализом рисков возможны только с использованием методик принципиально иного уровня точности и детальности, а именно: методов многоподходного имитационного моделирования. Ниже перечислены факторы, которые влияют на выполнение плана перевозок и должны учитываться при построении модели логистических процессов.

1. Вариабельность и неопределенность условий внешней среды – метеорологической и ледовой обстановки как у самой платформы, так и на всем протяжении следования судов от платформы к местам нахождения баз снабжения или нефтяных терминалов. Необходимость адекватного учета экстремальных ситуаций и «окон непогоды» критической длительности.

2. Динамичность и сложная взаимозависимость объемов грузопотоков нефти и грузов снабжения, обусловленная причинно-следственными связями между процессами бурения, добычи и обеспечения. Дополнительными важными вопросами, которые необходимо принимать во внимание при построении адекватной модели грузопотоков, являются вопросы совместимости и использования единой тары (контейнеров и др.) для грузов различного типа.

3. Наличие нескольких альтернативных терминалов и причальных устройств со специфическими и строго сформулированными ограничениями возможности осуществления грузовых операций в зависимости от складывающейся погодной обстановки. На рис. 1 приведена схема расположения восточного и западного грузовых

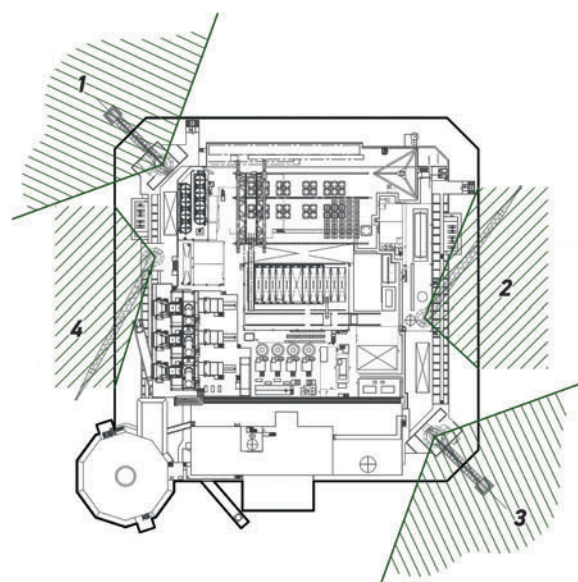


Рис. 1. Схема доступности грузовых терминалов МЛСП по направлению интегрального воздействия ветра, волнения, течения и дрейфа льда:

- 1, 3 – сектора доступности КУПОН соответственно на северо-западе и юго-востоке МЛСП;
- 2, 4 – сектора доступности соответственно западного и восточного грузового крана МЛСП

кранов для обработки судов снабжения, а также двух комплексных устройств погрузки-отгрузки нефти (КУПОН) на северо-западной и юго-восточной оконечностях платформы «Приразломная».

4. Наличие ограничений возможности одновременного осуществления грузовых операций у МЛСП танкерами и судами снабжения, что приводит к «конкуренции» танкеров и судов снабжения за «окна погоды» у погрузочно-разгрузочных терминалов.

5. Ограниченность объема хранилища нефти и площадей складирования на самой платформе, что обуславливает невозможность создания «мертвых» запасов груза и строгую необходимость организации процессов снабжения и вывоза нефти по принципу «точно вовремя». При этом как достижение существенного уровня наполнения хранилища нефти, так и близость к исчерпанию хранилищ грузов снабжения различного типа должны рассматриваться как нежелательные факторы, для их недопущения необходимо заблаговременно принять специальные адаптивные меры. Например, при наличии риска полного наполнения хранилища проводится плавное ситуационное снижение интенсивности добычи по отношению к плановому уровню. Это также должно находить отражение в имитационной модели.

6. Сложная и вариативная логика описания операций грузообработки транспортных судов у платформы, включающая возможность нескольких последовательных отходов и подходов судна, вызванных пережиданием периодов непогоды. Каждый подход в свою очередь состоит из множества технологических и организационных подопераций (швартовка, шланговка, оформление документов и др.) со случайными временами исполнения, подчиняющимися разнообразным законам вероятностного распределения.

Одновременный учет всех перечисленных факторов с приемлемой точностью возможен только в рамках комплексной динамической имитационной модели, содержащей элементы дискретно-событийного и агентного подходов. Учет в модели множества технических деталей, физических и логистических процессов максимально приближает ее к реальным условиям.

Комплексная имитационная модель

Созданное ранее в Крыловском государственном научном центре программное решение для исследования МТТС [1] в рамках настоящей работы было адаптировано к моделированию инфраструктуры МЛСП. В состав имитационной модели, реализованной в среде AnyLogic®, были дополнительно интегрированы следующие блоки (рис. 2).

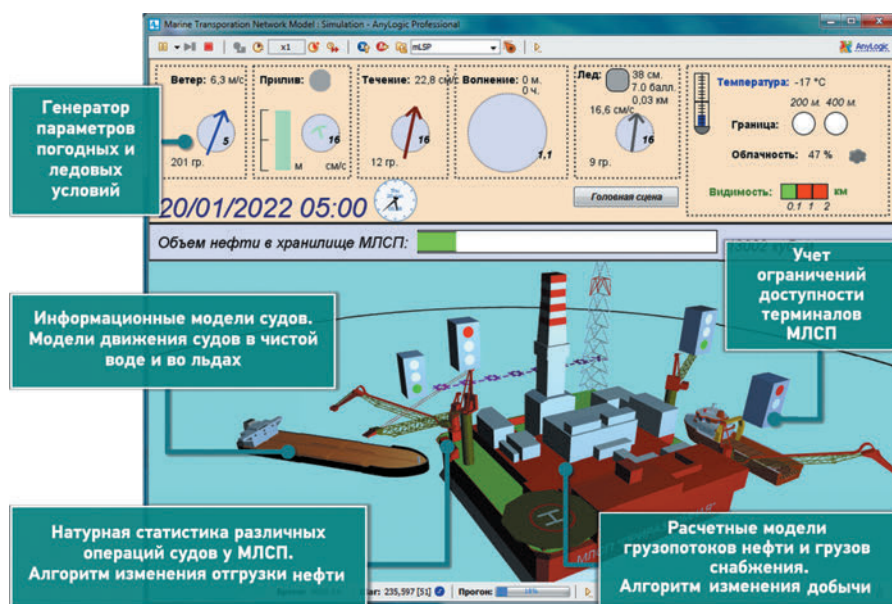


Рис. 2. Компоненты комплексной динамической имитационной модели

Стохастический генератор параметров погодных и ледовых условий в районе МЛСП. Необходимость разработки подобного алгоритма моделирования внешних условий (температуры, скорости и направления ветра, волнения, толщины и дрейфа льда, видимости и др.) для рассматриваемой задачи определяется следующими соображениями. Моделируемый транспортный узел имеет сложную структуру, состоящую из нескольких грузовых терминалов разного типа (КУПОН, грузовые причалы судов снабжения, вертолетная площадка) с разнообразным грузовым оборудованием. Регламенты работы каждого терминала в зависимости от складывающейся внешней обстановки также различны и могут быть прописаны отдельно для каждого типа обслуживающего или обслуживаемого транспортного средства (судна снабжения, танкера, вертолета). При этом использованный в работе [1] упрощенный подход, связанный с представлением доступности порта/терминала в виде единственной переменной логического типа («окна погоды»), оказывается неприменимым. Он 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 комплексного имитационного алгоритма приходится задействовать аб-

солютно «честный» метод описания внешних условий – реальное моделирование или прогнозирование всех интересующих элементов окружающей среды в явном виде. Созданный в рамках описываемой работы оригинальный генератор погодных морских условий позволяет получать в режиме модельного времени ряды имитируемых погодных параметров (17 различных показателей метеорологической, ветро-волновой и ледовой обстановки) с настраиваемым временным разрешением (от 1 до 24 ч). Более того, запуск генератора погоды в режиме «моделирования в будущем

времени» позволяет эмулировать в имитационной модели наличие гипотетических краткосрочных прогнозов погоды и их учет в оперативном планировании грузовых операций. Внутренняя логика алгоритма погодного генератора содержит как элементы формального статистического моделирования (получение реализаций погоды как многомерного дискретного случайного процесса с заданными авто- и кросс-корреляционными 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, обуславливающие стохастические свойства генератора (годовой и суточный ход моментов используемых вероятностных распределений, корреляционные коэффициенты, вероятности переходов марковских цепей и др.), идентифицировались путем статистической обработки реальных данных о погоде, полученных из нескольких альтернативных источников: результаты наблюдений за погодной и ледовой обстановками на МЛСП за четыре года; многолетние архивы срочных наблюдений на нескольких ближайших метеостанциях сети WMO; данные обработки маринограмм с открытых метеорологических сервисов; справочники и др. Интеграция разработанного погодного генератора со специальными расчетными модулями, в которых строго формализованы

существующие эксплуатационные ограничения каждого терминала МЛСП, позволяет наиболее корректно описывать совместную работу всех терминалов платформы. В процессе работы имитационной модели на каждом терминале платформы загорается условный «светофор», показывающий доступность для грузообработки в конкретный момент времени. Если терминал доступен, то также отображается прогнозируемое время его доступности.

Детальная дискретно-событийная модель погрузочно-разгрузочных операций судов у терминалов МЛСП. В рамках представленной на рис. 3 схемы процесса грузообработки заложена возможность проведения последовательных операций с грузами различного типа, заблаговременного прерывания операции при ожидаемом закрытии «окна погоды» с пережиданием неблагоприятного периода у терминала, переходом к альтернативному терминалу или отходом судна за пределы трехмильной зоны МЛСП. Временные и вероятностные характеристики длительности всех составляющих элементарных операций, представленных на схеме процесса, были получены путем анализа и статистической обработки записей судовых операционных журналов за период фактической эксплуатации МЛСП «Приразломная». Кроме того, в рамках анализа мероприятий по улучшению эффективности работы МТТС рассматривались варианты с измененными значениями соответствующих величин, которые могут быть достигнуты с внедрением тех или иных технологических или организа-

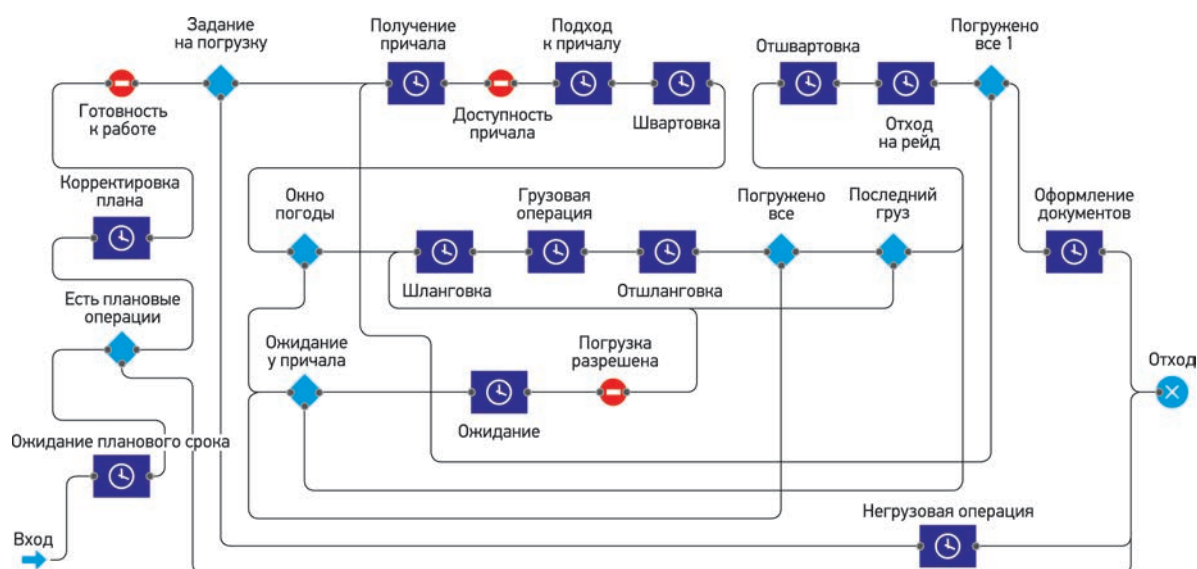


Рис. 3. Потокная диаграмма прохождения заявок на погрузку/разгрузку судна для МЛСП

ционных улучшений. Некоторые показатели длительности характерных операций судов у платформы определялись не только на основе натурных данных, но и с учетом результатов навигационного моделирования, выполненного на специализированном научно-исследовательском тренажерном комплексе Крыловского государственного научного центра.

Алгоритм стратегического планирования перевозок. Задача стратегического планирования заключается в получении графика рейсов, используемого в качестве входных данных для имитационной модели [2]. Для решения задачи сначала были созданы расчетные модели определения грузопотоков снабжения и товарной нефти на весь рассматриваемый период работы МЛСП (до 2038 г.). При этом для определения потоков грузов снабжения была разработана статистическая модель, которая, с одной стороны, базировалась на фактических данных по грузообороту тары за 2015–2016 гг., с другой – на интерполяционных значениях грузопотоков МЛСП на период до 2038 г. Отдельно была построена прогнозная подмодель, описывающая интенсивность добычи нефти на МЛСП с 2015 по 2038 г. В качестве входных данных для нее использовались прогнозный график бурения и расчетные планируемые годовые показатели добычи нефти, жидкости и газа по каждой скважине. Полученные прогнозы грузопотоков наряду с текущей конфигурацией МТТС (состав флота

и береговой инфраструктуры) служили основными исходными данными для специализированного модуля – стратегического плана перевозок. Он предназначен для составления расписаний рейсов всех судов и определения объемов грузов, перевозимых судами в каждом рейсе, что позволяет обеспечить заданный интегральный грузопоток при рациональном использовании флота (рис. 4). Для этого в рамках описанной работы авторами был разработан оригинальный алгоритм подобного стратегического планирования с длительным временным горизонтом, основанный на использовании эвристического подхода с элементами ситуативной оптимизации. Основная идея, заложенная в алгоритме, состоит в удовлетворении наиболее критических потребностей «от начала к концу» с учетом ограничений объемов стационарных и судовых хранилищ, характерных времен рейсов и грузовых операций.

Информационные модели танкеров и судов снабжения содержат сведения обо всех необходимых параметрах и характеристиках судов, таких как ходовые параметры (сопротивление в различных состояниях загрузки, кривые действия винтов и др.), характеристики грузовых пространств и средств грузообработки (рис. 5). С помощью созданных расчетных моделей движения судов определялись текущая скорость хода и расход топлива [1]. Работа судов на ли-

Операционный план

Создать операцию

Для группирования по колонне перетащите ее сюда.

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		Портозаход	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
129233398	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 (FO)	65.89

Юрий Топчев	3699425109		Перемещение	21.06.2020 4:10:20	02:17:51	МТС
Владислав Стрижов	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

Планировать Применить

Рис. 4. Фрагмент стратегического плана работы флота обеспечения МЛСП

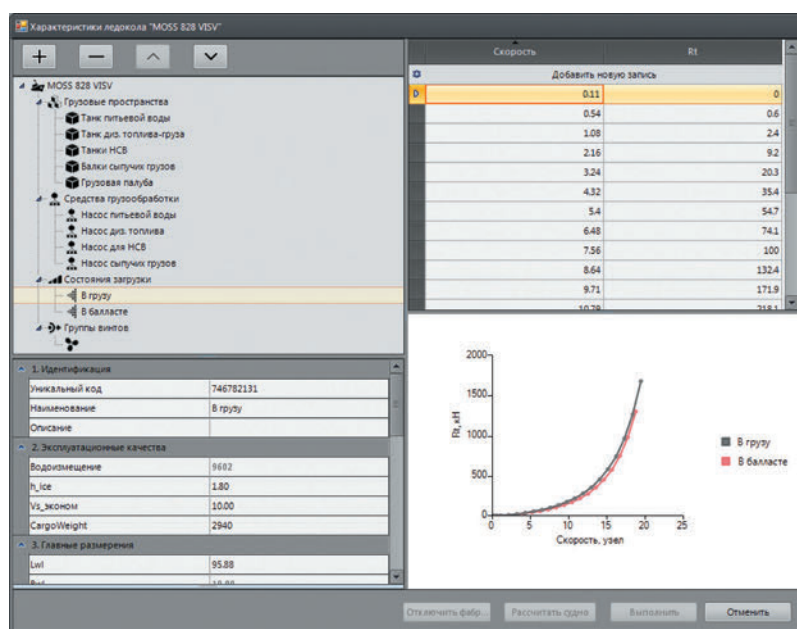


Рис. 5. Описание параметров судна в информационной модели

нии МЛСП – Мурманск в описываемом исследовании имитировалась в соответствии с базовыми принципами агентного моделирования. Все суда представлялись в виде отдельных динамических элементов (агентов), функционирующих и взаимодействующих в геоинформационной среде (ГИС) с учетом природных и навигационных условий на маршруте движения (рис. 6). В качестве стационарных объектов с геоинформационной привязкой описывались также порты, маршруты следования, рейды, а в качестве атрибутивной информации использовались навигационные условия, глубины моря и сведения о динамике погодных условий в ре-

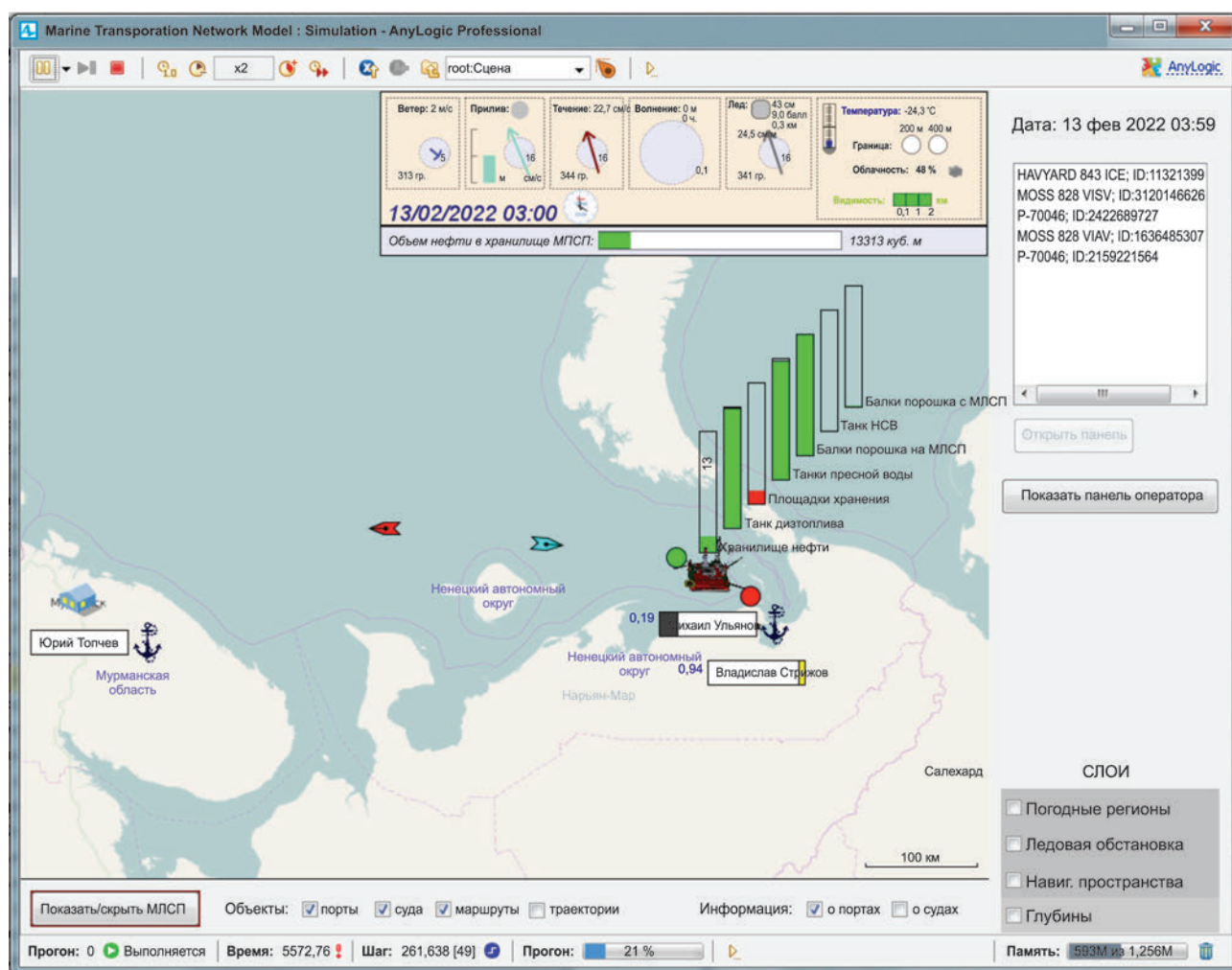


Рис. 6. Имитационная модель работы МЛСП в геоинформационной среде

гионах возможного плавания судов. Кроме того, в программно-имитационном комплексе была реализована логика оптимальной маршрутизации (ледового роутинга), согласно которой суда в ГИС-пространстве движутся по индивидуальным оптимизированным маршрутам с учетом изменяющихся ледовых условий [2].

Важным этапом создания имитационной модели являлась ее комплексная верификация на основе фактических параметров. Для проверки точности работы имитационной модели использовались параметры, которые являются продуктом сложного взаимовлияния ряда моделируемых процессов, таких как изменение параметров природных условий, планирование рейсов и загрузки судов, взаимодействие судов танкерного флота и судов обеспечения при работе у МЛСП и др. К таким параметрам относятся число подходов танкера к КУПОН до полной загрузки, длительность одной непрерывной погрузки танкера у КУПОН и др. (рис. 7).

В ходе верификации модели было показано, что она математически адекватно описывает реальную систему, модельные параметры статистически не отличаются от фактических.

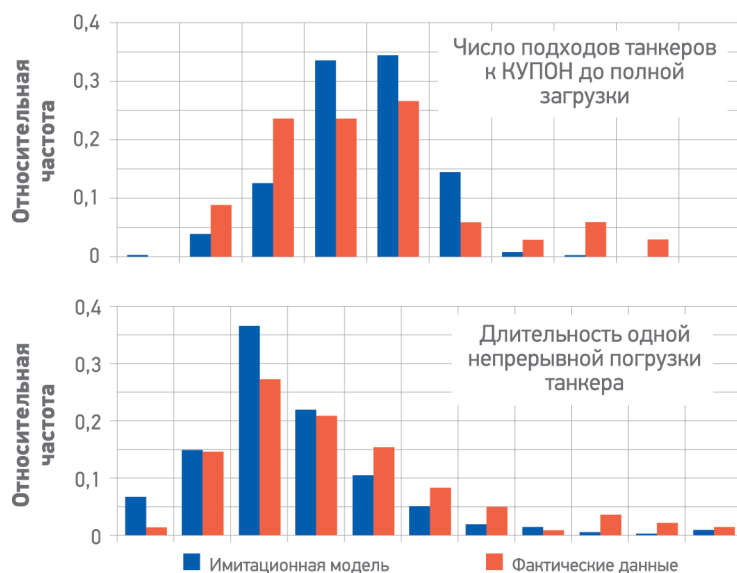


Рис. 7. Сопоставление фактических и модельных параметров работы флота

Результаты

На основе созданного программного инструмента была смоделирована работа более 30 вариантов транспортной системы МЛСП «Приразломная» различной конфигурации. Программа исследований включала анализ раздельного и совместного влия-

ния на эффективность работы системы 12 улучшающих мероприятий, таких как: уменьшение длительности швартовно-шланговых операций; повышение производительности отгрузки нефти; ускорение оформления документов; совместное выполнение операций танкерами и судами снабжения; привлечение дополнительного ледокола; строительство выносного терминала отгрузки нефти; введение в эксплуатацию дополнительного ледового танкера и др. Результаты моделирования жизненного цикла транспортной системы для всех прогонов модели архивировались в электронном журнале операций. По завершении эксперимента полученные записи позволили выполнить детальный анализ операций судов. Так, была получена представительная статистика и проанализировано использование имеющихся «окон погоды» КУПОН челночными танкерами. Для всех хранилищ МЛСП прослеживалась динамика уровня наполнения и вычислялись характерное время и вероятность ситуаций повышенного риска, отвечающих пороговым уровням наполнения.

Поскольку поведение исследуемой МТТС в значительной степени определяется влиянием случайных факторов, имеющих большую неопределенность, для получения статистических оценок высокого уровня обеспеченности необходимо осуществлять многократный запуск имитационной модели. В связи с этим выполнено более 12000 имитационных прогонов жизненного цикла системы, что потребовало более 3000 ч машинного времени. В результате для каждого варианта МТТС были определены все необходимые технические и эксплуатационные показатели, а также статистические законы их распределения.

Результаты имитационных экспериментов позволяли рекомендовать мероприятия по усовершенствованию конфигурации МТТС. При этом было показано, что существующий состав флота обеспечивает достаточную провозоспособность МТТС по нефти и грузам снабжения, а наибольшие сложности связаны с погодными ограничениями системы отгрузки нефти с платформы на танкер. В качестве основного решения было предложено выполнить комплекс организационно-технических мероприятий, позволяющих улучшить интегральные показатели эффективности всей системы как в терминах средних значений, так и с точки зрения уменьшения вероятности

стей ситуаций, требующих оперативного вмешательства в согласованный график добычи и снабжения, и связанных с этим экономических и технологических рисков.

Заключение

Таким образом, результаты выполненной исследовательской работы позволили не только проанализировать самые сложные технические и организационные составляющие процессов взаимодействия судов с платформой, но и предложить комплекс мер по их оптимизации. Результаты моделирования являются основой для принятия управленческих решений на высшем уровне компании «Газпром нефть шельф», а пред-

ложенные решения внедряются в практику работы МЛСП и реализуются в виде руководящих документов.

Использованный подход – мультипарадигменное имитационное моделирование – это единственный на сегодняшний день реально существующий подход, позволяющий решить актуальные задачи освоения шельфовых месторождений. Обоснованию данного тезиса посвящено значительное число отечественных и зарубежных работ [3–6]. Представляется, однако, что описанное в данной статье настолько масштабное и детальное исследование работы арктической шельфовой техники на основе дискретно-событийного и агентного имитационного моделирования выполнено впервые в мировой практике.

Список литературы

1. Повышение эффективности работы систем водного транспорта с помощью динамического имитационного моделирования / А.А. Бахареv, А.В. Косоротов, А.Б. Крестьянцев [и др.] // Транспорт Российской Федерации. – 2015. – № 4 (59). – С. 33–36.
2. Иерархия уровней принятия решений в имитационном моделировании морских перевозок // А.А. Бахареv, А.В. Косоротов, А.Б. Крестьянцев [и др.] // Труды VII всероссийской научно-практической конференции «Имитационное моделирование. Теория и практика» ИММОД-2015. – Т. 1. – М.: ИПУ РАН, 2015. – С. 34–39.
3. *Routing of supply vessels to petroleum installations* / B. Aas, I. Gribkovskaia, O. Halskau, A. Shlopak // International Journal of Physical Distribution & Logistics Management. – 2007. – V. 37. – N 2. – P. 164–179.
4. Мalykhanov A.A., Черненко В.Е. Имитационное моделирование логистики снабжения арктических буровых платформ // Труды VII всероссийской научно-практической конференции «Имитационное моделирование. Теория и практика» ИММОД-2015. – Т. 2. – М.: ИПУ РАН, 2015. – С. 210–221.
5. Shyshou A., Gribkovskaia I., Barcelo J. A simulation study of the fleet sizing problem arising in offshore anchor handling operations // European Journal of Operational Research 2010. – N 203. – V. 1. – P. 230–240.
6. Bergström M., Erikstad S.O., Ehlers S. A simulation-based probabilistic design method for arctic sea transport systems // Journal of Marine Science and Application. – 2016. – V. 15. – P. 349–369.

Reference

1. Bakharev A.A., Kosorotov A.V., Krest'yantsev A.B. et al., *Increasing operational efficiency of operation of waterborne transport systems through dynamic simulation modelling* (In Russ.), Transport Rossiyskoy Federatsii, 2015, no. 4 (59), pp. 33–36.
2. Bakharev A.A., Kosorotov A.V., Krest'yantsev A.B. et al., *Ierarkhiya urovney prinyatiya resheniy v imitatsionnom modelirovanii morskikh perevozok* (The hierarchy of decision-making levels in the simulation of maritime transport), Proceedings of VII All-Russian Scientific and Practical Conference "Imitatsionnoe modelirovanie. Teoriya i praktika – 2015" (Simulation modeling. Theory and practice - 2015), Part 1, Moscow: Publ. of Institute of Control Sciences V.A. Trapeznikov Academy of Sciences, 2015, pp. 34–39.
3. Aas B., Gribkovskaia I., Halskau O., Shlopak A., *Routing of supply vessels to petroleum installations*, International Journal of Physical Distribution & Logistics Management, 2007, V. 37, no. 2, pp. 164–179.
4. Malykhanov A.A., Chernenko V.E., *Imitatsionnoe modelirovanie logistiki snabzheniya arkticheskikh burovyykh platform* (Simulation modeling of supply logistics for Arctic drilling platforms), Proceedings of VII All-Russian Scientific and Practical Conference "Imitatsionnoe modelirovanie. Teoriya i praktika – 2015" (Simulation modeling. Theory and practice - 2015), Part 2, Moscow: Publ. of Institute of Control Sciences V.A. Trapeznikov Academy of Sciences, 2015, pp. 210–221.
5. Shyshou A., Gribkovskaia I., Barcelo J., *A simulation study of the fleet sizing problem arising in offshore anchor handling operations*, European Journal of Operational Research, 2010, no. 203, V. 1, pp. 230–240.
6. Bergström M., Erikstad S.O., Ehlers S., *A simulation-based probabilistic design method for arctic sea transport systems*, Journal of Marine Science and Application, 2016, V. 15, pp. 349–369.