

# Использование имитационного моделирования для анализа морской транспортно-технологической системы платформы «Приразломная»



**Д.А. Зайкин,**  
заместитель начальника  
управления - начальник  
отдела эксплуатации  
флота – ООО «Газпром  
нефть шельф»,

Детализированная имитационная модель морской транспортно-технологической системы платформы «Приразломная» позволила исследовать 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.



**А.Б. Крестьянцев,**  
начальник  
самостоятельного сектора  
проектирования морских  
систем освоения шельфа  
ФГУП «Крыловский  
государственный научный  
центр»,

Имитационное моделирование представляет собой детальное воспроизведение на компьютере течения изучаемых процессов в режиме модельного времени. В отличие от качественных и аналитических моделей, подобный тип моделирования в последнее время становится одним из основных инструментов анализа, изучения и оптимизации сложных природных и технических систем, к которым, безусловно, относятся проекты освоения арктических шельфовых месторождений. Особенности эксплуатации шельфовых объектов делают затруднительной (а зачастую и невозможной) адекватную оценку показателей эффективности и устойчивости их работы упрощенными аналитическими методами, т.е. с помощью "бумаги и ручки", в особенности – в сфере морской логистики.

Имитационное моделирование представляет собой детальное воспроизведение на компьютере течения изучаемых процессов в режиме модельного времени. В отличие от качественных и аналитических моделей, подобный тип моделирования в последнее время становится одним из основных инструментов анализа, изучения и оптимизации сложных природных и технических систем, к которым, безусловно, относятся проекты освоения арктических шельфовых месторождений. Особенности эксплуатации шельфовых объектов делают затруднительной (а зачастую и невозможной) адекватную оценку показателей эффективности и устойчивости их работы упрощенными аналитическими методами, т.е. с помощью "бумаги и ручки", в особенности – в сфере морской логистики.

Так, исходя из запланированных темпов роста интенсивности добычи нефти с текущих 2,3 млн т. в год до приблизительно 5 млн т. к 2022 году, возникла необходимость анализа работы морской транспортно-технологической системы (МТТС) вывоза нефти с платформы и доставки грузов снабжения с учетом реальной практики работы флота. В состав комплексной МТТС входят собственно МЛСП, челночные танкеры и суда снабжения. Вопросом первостепенной важности при анализе работы МТТС выступает нахождение комплекса мер, направленных на повышение устойчивости системы и снижение уровня прогнозной неопределенности. Для выполнения исследований работы МТТС платформы «Приразломная» была применена технология имитационного мо-



**О.В. Таровик,**  
к.т.н., старший  
научный сотрудник  
ФГУП «Крыловский  
государственный научный  
центр»,



**А.Г. Топаж,**  
д.т.н., ведущий  
научный сотрудник  
ФГУП «Крыловский  
государственный научный  
центр»

Уникальным по своей сложности шельфовым объектом является работающая под управлением компании «Газпром нефть шельф» морская ледостойкая стационарная платформа (МЛСП) «Приразломная». Эта платформа единственная в мире ведет добычу нефти на арктическом шельфе в условиях тяжелого льда и сложной гидрометеорологической обстановки. Здесь применены самые современные и оригинальные организационно-технические решения, ведется постоянная работа по повышению безопасности, эффективности, а также качества управления экологи-

делирования и опыт Крыловского государственного научного центра (КГНЦ) в сфере исследования арктических транспортных систем [1].

### Постановка задачи

Логистическая схема МЛСП включает два принципиальных направления грузопотоков: завоз 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. Но полноценное исследование и адекватный прогноз выполнимости плана с оценкой вероятностных показателей и выходом на анализ рисков возможны только с использованием методик принципиально иного уровня точности и детальности, а именно – методов многоподходного имитационного моделирования. Ниже кратко перечислены факторы, которые оказывают влияние на исполнение плана перевозок и поэтому 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 взаимная зависимость объемов грузопотоков нефти и грузов снабжения, обусловленная причинно-следственными связями между процессами бурения, добычи и обеспечения. Дополнительным важным обстоятельством, которое необходимо принимать во внимание при построении адекватной модели грузопотоков, являются вопросы совместимости и использования единой тары (контейнеры и т.д.) для грузов различного типа.

3. Наличие нескольких альтернативных терминалов и причальных устройств со специфическими и строго сформулированными ограничениями на возможность осуществления грузовых операций в зависимости от складывающейся погодной обстановки. Так, на *рис. 1* приведена схема расположения

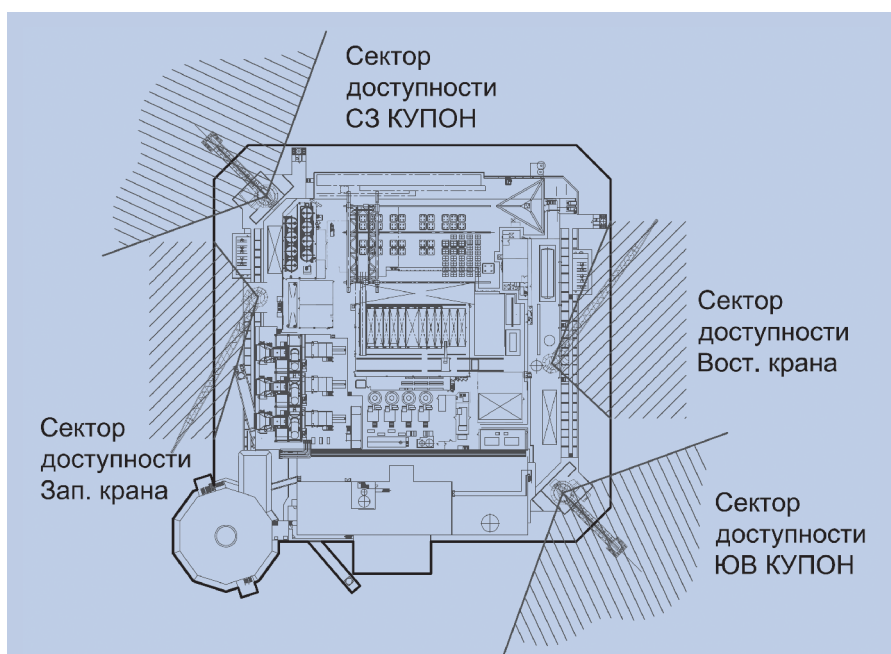


Рис.1 Схема доступности грузовых терминалов МЛСП по направлению интегрального воздействия от ветра, волнения, течения и дрейфа льда.

восточного и западного грузовых кранов для обработки судов снабжения, а также двух комплексных устройств погрузки-отгрузки нефти (КУПОН) на северо-западной и юго-восточной оконечностях платформы «Приразломная». На рисунке схематически показаны сектора доступности терминалов по направлению интегрального воздействия от ветра, волнения, течения и дрейфа льда.

4. Наличие ограничений на возможность 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 в качестве нежелательных событий, а для их разрешения должны быть заблаговременно приняты специальные адаптивные меры. Например, при наличии риска полного наполнения хранилища производится плавное ситуационное снижение интенсивности добычи по

отношению к плановому уровню. Такие особенности также должны находить отражение в имитационной модели.

6. Сложная и вариативная логика описания операций грузообработки транспортных судов у платформы, включающая в себя возможность нескольких последовательных отходов и подходов судна, вызванных пережиданием периодов непогоды. В свою очередь каждый подход включает в себя множества технологических и организационных подопераций (швартовка, шланговка, оформление документов и т.д.) со случайными временами исполнения, починающимися разнообразным законам вероятностного распределения.

Одновременный учет всех перечисленных факторов с приемлемой степенью точности возможен только в рамках комплексной динамической имитационной модели, включающей в себя элементы дискретно-событийного и агентного подходов. Такая модель позволяет учитывать множество технических деталей, физических и логистических процессов, максимально приближая модель к реальным условиям.

### Комплексная имитационная модель

Созданное ранее в КГНЦ программное решение для исследования МТТС [1] в рамках настоящей работы было адаптировано к моделированию инфраструктуры МЛСП. В состав имитационной модели, реализованной в среде

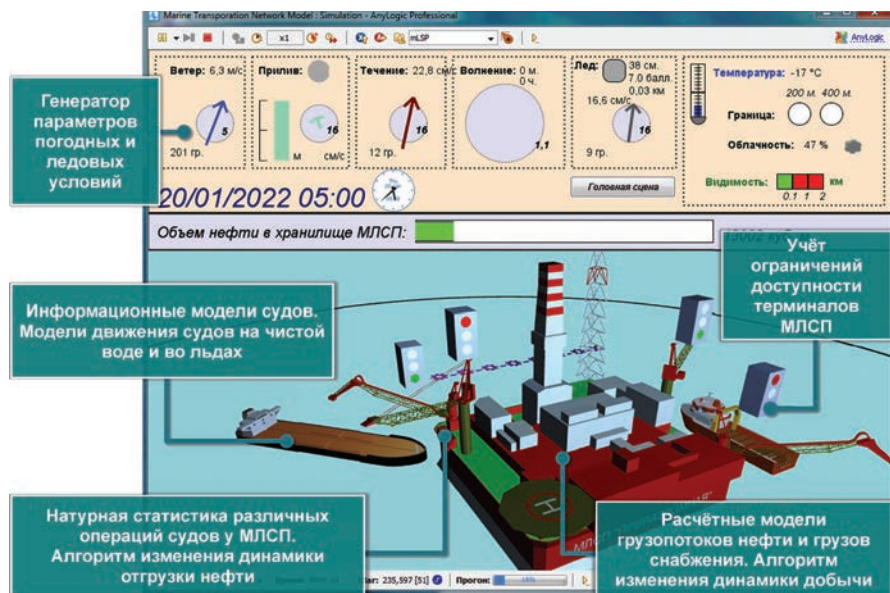


Рис. 2 Компоненты комплексной динамической имитационной модели

AnyLogic®, были дополнительно интегрированы следующие блоки (рис. 2).

**Стохастический генератор параметров погодных и ледовых условий окружающей среды в районе МЛСП.** Необходимость разработки подобного алгоритма моделирования внешних условий (температура, скорость и направление ветра, волнение, толщина и дрейф льда, видимость и т.д.) 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), снабженных 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 (суда снабжения, танкера, вертолета).

При этом использованный в [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. Поэтому для построения непротиворечивого комплексного имитационного алгоритма приходится задействовать

абсолютно «честный» метод описания внешних условий – реального моделирования или прогнозирования всех интересующих элементов окружающей среды в явном виде. Созданный в рамках описываемой работы оригинальный генератор погодных условий морской погоды позволяет получать в режиме модельного времени ряды имитируемых погодных параметров (17 различных показателей метеорологической, ветро-волновой и ледовой обстановки) с настраиваемым временным разрешением (от одного часа до 24 часов).

Более того, запуск генератора погоды в режиме «моделирования в будущем времени» позволяет эмулировать в имитационной модели наличие гипотетических краткосрочных прогнозов погоды и их использование в оперативном планировании грузовых операций. 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 мо-

ментов 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 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 ходе работы имитационной модели на каждом терминале платформы зажигается условный «светофор» (рис. 2), 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** показана на рис. 3. В рамках представленной схемы процесса грузообработки заложена возможность проведения последовательных операций с грузами различного типа, 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.

Временные и вероятностные характеристики длительности всех составляющих элементарных операций, представленных на схеме процесса, были получены путем анализа и статистической обработки данных записей судовых операционных журналов за период фактической эксплуатации «Приразломной». Кроме того, в рамках исследований по анализу мероприятий по улучшению эффективности работы МТТС рассматривались варианты с измененными значениями соответствующих величин, которые могут быть достигнуты с внедрением тех или иных технологических или организационных улучшений.



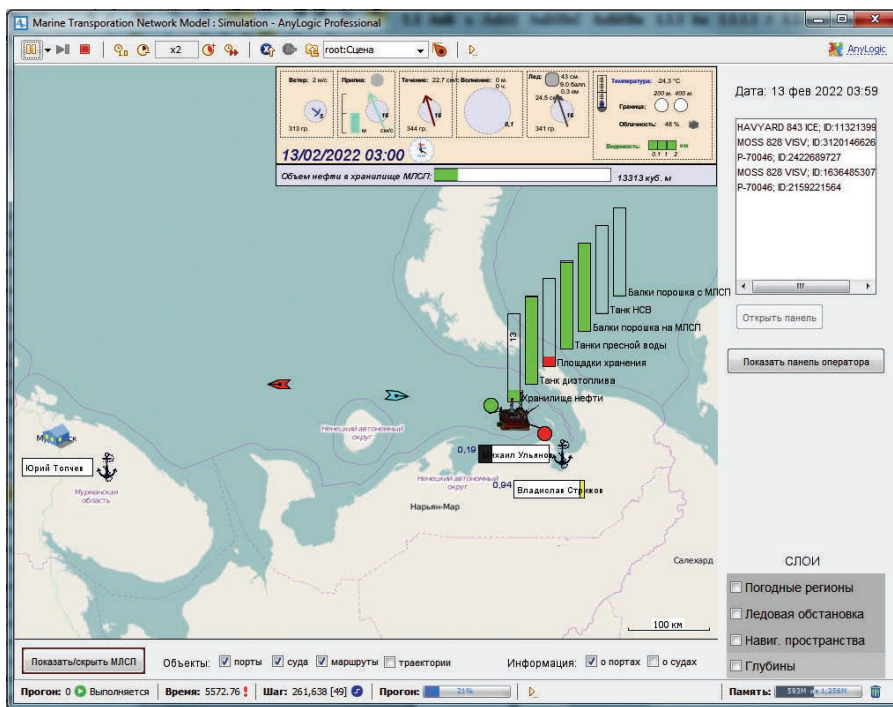


Рис. 6 Имитационная модель работы МТТС в геоинформационной среде

онной модели являлась ее комплексная верификация на основе натурных параметров. Для проверки точности работы имитационной модели использовались те модельные параметры, которые являются продуктом сложного взаимодействия 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 другие. В качестве таких параметров выступают, например, число подходов танкера к КУПОН до полной загрузки, длительность одной непрерывной погрузки танкера у КУПОН (рис. 7) и т.п.

В ходе верификации модели было показано, что она математически-адекватно описывает реальную систему, модельные параметры оказываются статистически неотличимы от натуральных.

## Результаты

На основе созданного программного инструмента была смоделирована работа более 30 различных вариантов конфигурации транспортной системы МЛСП «Приразломная». Программа исследований включала анализ отдельного и совместного влияния на эффективность работы системы 12 улучшающих мероприятий, таких как: сокращение времени швартовно-шланговых операций; повышение производительности отгрузки нефти; сокращение времени

оформления документов; совместное выполнение операций танкерами и судами снабжения; привлечение дополнительного ледокола; строительство выносного терминала отгрузки нефти; введение в эксплуатацию дополнительного ледового танкера и другие.

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, например, была получена представительная статистика и проанализировано использование имеющихся окон погоды КУПОН челночными танкерами. Для всех хранилищ МЛСП отслеживалась динамика уровня наполнения и вычи-

слились характерные времена и вероятности ситуаций повышенного риска, отвечающих пороговым уровням на-полнения.

Поскольку логика поведения исследуемой транспортно-технологической системы существенно определяется влиянием случайных факторов, имеющих большую степень неопределенности, для получения статистических оценок высокого уровня обеспеченности было необходимо осуществлять многократный запуск имитационной модели. В ходе выполнения работы было выполнено более 12000 имитационных «прогонов» жизненного цикла системы, что потребовало более 3000 часов машинного времени. В результате для каждого варианта транспортной системы были определены все необходимые технические и эксплуатационные показатели, а также статистические законы их распределения.

По результатам выполнения имитационных экспериментов были даны рекомендации по усовершенствованию существующей конфигурации МТТС. При этом было показано, что существующий состав флота обеспечивает достаточную провозоспособность МТТС по нефти и грузам снабжения, а наиболее чувствительным местом являются погодные ограничения системы отгрузки нефти с платформы на танкер. В качестве основного решения было предложено выполнить комплекс конкретных организационно-технических мероприятий, которые, согласно модельным расчетам, должны позволить существенно улучшить интегральные показатели эффективности всей системы как в терминах средних значений, так и с точки зрения уменьшения вероятностей ситуаций, требующих оперативного вмешательства в согласованный график

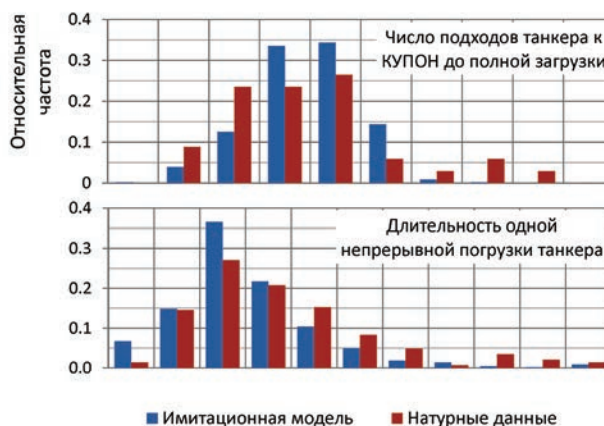


Рис. 7 Сопоставление натуральных и модельных параметров работы флота

добычи и снабжения. Последнее, в свою очередь, ведет к значительному снижению экономических и технологических рисков.

Резюмируя, следует отметить, что результаты выполненной исследовательской работы позволили не только проанализировать самые сложные технические и организационные аспекты процессов взаимодействия судов с платформой, но также предложить и доказательно обосновать комплекс мер по их оптимизации. Результаты моделирования являются основой для принятия управленческих решений на верхнем уровне компании «Газпром нефть шельф», а предложенные решения внедряются в практику работы МЛСП и реализуются в виде руководящих документов.

Не будет преувеличением декларировать, что использованный подход – мультипарадигменное имитационное моделирование – это единственный на сегодняшний день реальный инструмент, позволяющий адекватно ответить на те вызовы, которые предъявляет необходимость комплексного анализа столь сложных объектов, как

системы освоения шельфовых месторождений. Обоснованию данного тезиса на уровне теоретических соображений и частных примеров в последнее время посвящается значительное количество отечественных и зарубежных печатных работ [3-6]. Представляется, однако, что настолько масштабное и детальное исследование работы реального объекта арктической шельфовой техники на основе дискретно-событийного и агентного имитационного моделирования выполнено впервые в мировой практике. ■

#### Литература

1. Бахарев А. А., Косоротов А. В., Крестьянцев А. Б. и др. Повышение эффективности работы систем водного транспорта с помощью динамического имитационного моделирования // Транспорт Рос. Федерации. – 2015. – № 4 (59). – С. 33–36.
2. Бахарев А. А., Косоротов А. В., Крестьянцев А. Б. и др. Иерархия уровней принятия решений в имитационном моделировании морских перевозок // Седьмая всероссийская научно-практическая конференция «Имитаци-

онное моделирование. Теория и практика» ИММОД-2015: Труды конф. – Т. 1. – М.: ИПУ РАН, 2015. – С. 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. Vol. 37 No 2. pp. 164-179.
4. Мальханов А. А., Черненко В. Е. Имитационное моделирование логистики снабжения арктических буровых платформ // Седьмая всероссийская научно-практическая конференция «Имитационное моделирование. Теория и практика» ИММОД-2015: Труды конф. – 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, No 203, vol 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, Vol. 15, pp. 349-369.