

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ТРАНСПОРТНО-ЛОГИСТИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ месторождений Обской и Тазовской губ

Буянов Александр Сергеевич

заместитель генерального директора АО «ЦНИИМФ», к.э.н.

Таровик Олег Владимирович

технический директор ООО «Бюро Гиперборья», к.т.н.

Крестьянцев Андрей Борисович

генеральный директор ООО «Бюро Гиперборья»

Топаж Александр Григорьевич

заместитель генерального директора по научной работе ООО «Бюро Гиперборья», д.т.н.

Егоров Сергей Владимирович

разработчик программного обеспечения ООО «Бюро Гиперборья»

Корниенко Ольга Александровна

заместитель начальника Управления по НИР и разработке газонефтяных месторождений ООО «Красноярскгазпром нефтегазпроект», к.т.н.

Маричев Андрей Владимирович

начальник Управления по НИР и разработке газонефтяных месторождений, ООО «Красноярскгазпром нефтегазпроект», к.т.н.

Оганов Гарри Сергеевич

первый заместитель генерального директора ООО «Красноярскгазпром нефтегазпроект», д.т.н., профессор

Лобанов Алексей Валерьевич

начальник отдела обеспечения морской деятельности судостроения и эксплуатации морской техники ПАО «Газпром»

В СООТВЕТСТВИИ С ПЛАНАМИ ПАО «ГАЗПРОМ»

В БЛИЖАЙШЕЕ ДЕСЯТИЛЕТИЕ НАЧНЕТСЯ КОМПЛЕКСНОЕ ОСВОЕНИЕ УГЛЕВОДОРОДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ, РАСПОЛОЖЕННЫХ В АКВАТОРИИ ОБСКОЙ И ТАЗОВСКОЙ ГУБ, А ТАКЖЕ НА МАТЕРИКОВОЙ ЧАСТИ. УЧИТЫВАЯ ТЯЖЕЛЫЕ КЛИМАТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ РЕГИОНА И БОЛЬШОЕ КОЛИЧЕСТВО ОБЪЕКТОВ, РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ТРАНСПОРТНО-ЛОГИСТИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДОБЫЧИ ГАЗА НЕВОЗМОЖНА БЕЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ИМИТАЦИОННОГО И ФИНАНСОВО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

IN THE NEXT DECADE, IN ACCORDANCE WITH THE PLANS OF GAZPROM, THE INTEGRATED DEVELOPMENT OF HYDROCARBON FIELDS LOCATED IN THE WATERS OF THE OB AND TAZ BAYS, AS WELL AS ON THE MAINLAND, WILL BEGIN. TAKING INTO ACCOUNT THE SEVERE CLIMATIC CONDITIONS OF THE REGION AND A LARGE NUMBER OF FACILITIES, THE DEVELOPMENT OF A SYSTEM FOR TRANSPORT AND LOGISTICS SUPPORT FOR GAS PRODUCTION IS IMPOSSIBLE WITHOUT THE USE OF MODERN METHODS AND TOOLS FOR SIMULATION AND ECONOMIC ANALYSIS

Ключевые слова: морская транспортная система, имитационное моделирование, оперативное планирование, технико-экономическое обоснование.

Введение

Освоение газовых месторождений Обской и Тазовской губ и прилегающих прибрежных территорий является амбициозной и сложной с технической точки зрения задачей. В данном регионе ряд месторождений (Каменномысское-море, Северо-Каменномысское, Семаковское, Тота-Яхинское, Антипаютинское, Чугорьяхинское, Обское, Парусовое, Северо-Парусовое) будут разрабатываться взаимосвязанным технологическим комплексом с транзитом газа через

существующую Ямбургскую газотранспортную систему. Специфика освоения месторождений в сложных природных условиях региона требует серьезных вложений и потому – внимательного подхода к принимаемым техническим и организационным решениям. Тем более что вследствие уникальности проекта многие из этих решений принимаются впервые.

Добыча газа будет производиться с помощью нескольких кустов скважин: основных, устья которых располагаются на ледостойких стационарных платформах

(ЛСП), и спутниковых – с устьями, находящимися на автономно работающих ледостойких блок кондукторах (ЛБК). На морских участках предполагается достаточно интенсивное бурение, в том числе круглогодичное. Поэтому отдельное внимание должно быть уделено вопросам организации круглогодичной устойчивой и экономически эффективной системы снабжения ЛСП и ЛБК как в период бурения, так и в ходе эксплуатации скважин.

Система обеспечения ЛСП и ЛБК имеет достаточно сложную структуру. В ее состав входят базы обеспечения (береговые или плавучие), средства снабжения (способные работать на чистой воде и в ледовых условиях), а также базы обслуживания и бункеровки технических средств. Помимо этого, система также имеет ряд особенностей.

Ограниченные глубины в акватории Обской и Тазовской губ приводят к тому, что для отдельных ЛБК и ЛСП, расположенных на глубинах менее 6–7 метров, в летний период возможно использование водоизмещающих судов с осадками не более 4 м.

Сложная ледовая обстановка, характеризующаяся толщинами льда до 1,5–2,0 м, не позволяет круглогодично использовать

водоизмещающие суда с малой осадкой, поскольку их ледопробиваемость не превышает 1,0 м. Поэтому для работы в ледовый период в системе должны быть предусмотрены альтернативные транспортные средства, в том числе никогда ранее не использовавшиеся для систематического снабжения в подобных условиях суда на воздушной подушке (СВП) и гусеничные двухзвенные вездеходы.

Для проекта характерна сложная структура грузопотоков, которая на протяжении всего срока работы системы значительно изменяется как по составу, так и по количеству грузов, а в ряде случаев также и по способу доставки. Система обеспечения должна обеспечивать как завоз грузов на буровые установки, так и вывоз отработанных материалов и отходов.

Ограниченность объемов и площадей хранилищ грузов снабжения на ЛСП и ЛБК не позволяет формировать буферные запасы грузов. Поэтому система снабжения должна обеспечивать своевременную доставку грузов, а логистические процессы должны быть организованы по принципу «точно вовремя», что влечет за собой необходимость оптимизационного планирования работы транспортных средств (ТС).

Исследование такой системы выполнялось с использованием комплексной динамической имитационной модели (ИМ), учитывающей особенности транспортных, технологических и природных процессов. В состав ИМ был интегрирован инструмент оперативного планирования работы ТС, позволяющий адекватно описывать логику их диспетчеризации. Для оценки технико-эксплуатационных показателей различных вариантов системы применялись методы финансово-экономического анализа.

При исследовании системы с использованием ИМ-технологии применялся сценарный подход, в рамках которого были сформированы 6 основных сценариев расположения и конфигурации баз обеспечения:

- два береговых сценария, в которых варьировалось размещение основной береговой базы обеспечения (ББО) и причалов (одна ББО располагается в пос. Ямбург или в районе мыса Парусный, а вторая – в районе Тота-Яхинского месторождения). В качестве примера на рис. 1 показана схема снабжения месторождений с ББО на мысе Парусный;

РИС. 1. Схема расположения месторождений и расстановки буровых установок с одним из вариантов схемы транспортно-логистического обеспечения

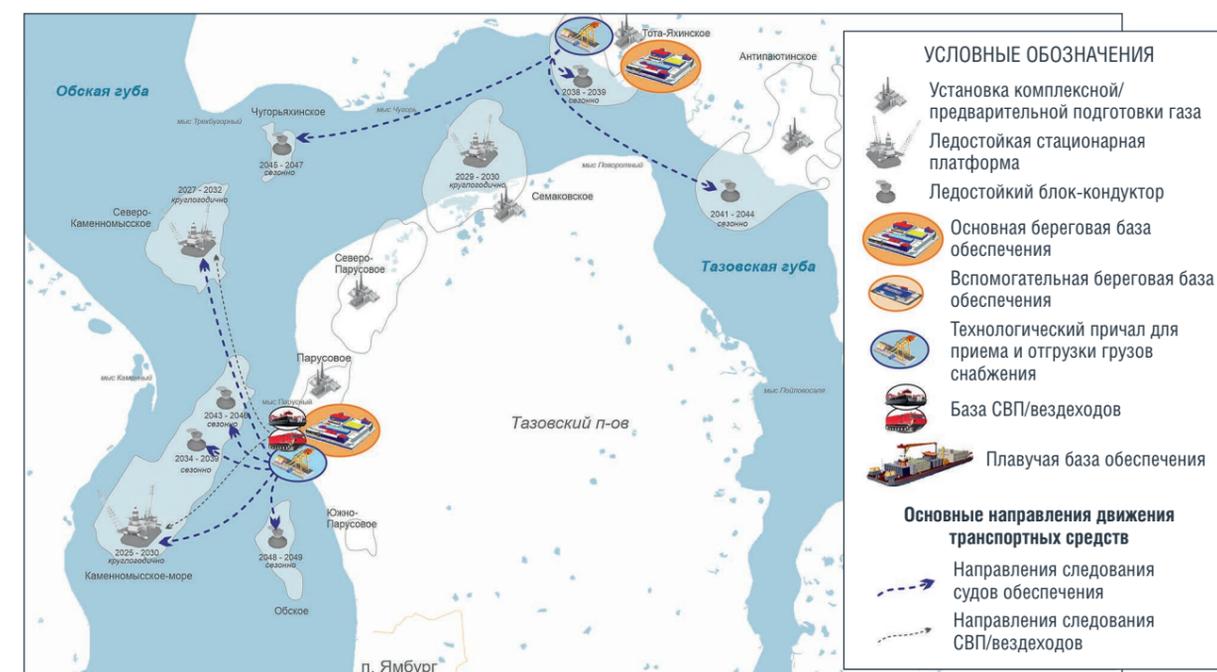


ТАБЛИЦА 1. Основные характеристики рассмотренных ТС

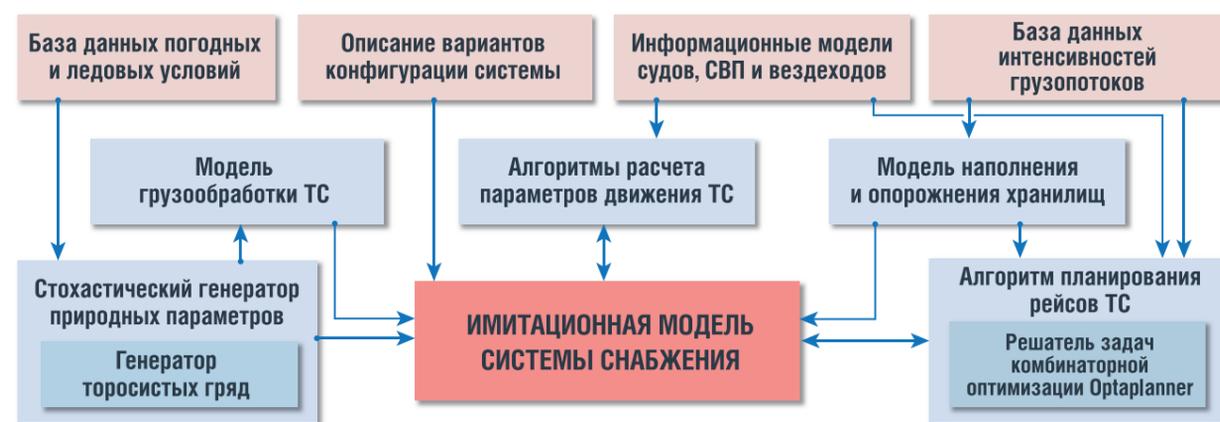
Параметр	Водоизмещающие суда				СВП			Вездеход «Витязь»
	Мангыстау	Арктикаборг	Буми	Судно пр. 22430	СВП 60 т	СВП 30 т	СВП 10 т «Хаска»	
Длина максимальная, м	66,3	65,1	81,1	77,9	35	25,9	23,7	15,9
Ширина максимальная, м	16,4	16,6	16,5	16,8	13,5	10	13,6	3,1
Ледопроемкость на переднем ходу, м	0,6	0,65	0,7	0,77	-	-	-	-
Ледопроемкость на заднем ходу, м	-	0,75	0,8	0,83	-	-	-	-
Скорость хода эксплуатационная, км/ч	18	22	22	22	65	62	60	25
Вместимость по грузу жидкого топлива, т	540	360	590	370	0	0	0	0
Вместимость по грузу сточных вод, т	110	115	500	575	0	0	0	0
Полезная площадь грузовой палубы, м ²	330	350	725	600	108	54	27	27
Дедвейт (грузоподъемность), т	740	675	1195	1230	60	30	10	30

- два морских сценария в вариантах с двумя (ледовый класс Arc7) или четырьмя (класс Arc7 и Arc4) плавучими базами обеспечения (ПБО) при условии снабжения второй очереди Семаковского месторождения;
- два морских сценария в вариантах с двумя или четырьмя ПБО без учета снабжения Семаковского месторождения.

В рамках сценарного подхода были рассмотрены следующие варианты ТС. Водоизмещающие суда представлены снабженцами типа «Мангыстау», «Арктикаборг»,

«Буми», а также перспективным судном снабжения проекта 22430. Суда имеют разную ледопроемкость и вместимость, что позволяет проанализировать влияние этих факторов на параметры системы снабжения. Характеристики СВП были определены в ходе предпроектных проработок на основе специально созданной параметрической модели. Рассматривались СВП грузоподъемностью 60, 30 и 10 т. В качестве СВП грузоподъемностью 10 т рассматривалось судно типа «Хаска-10», а в роли вездеходов рассмотрены гусеничные

РИС. 2. Схема баз данных и вычислительных процессов имитационной модели



двухзвенные машины типа «Витязь», способные брать до 30 т груза. Полагалось, что вездеходы оборудованы универсальным прицепом, способным перевозить все тарные грузы (контейнеры, связки труб и другие). Основные характеристики всех указанных ТС представлены в табл. 1.

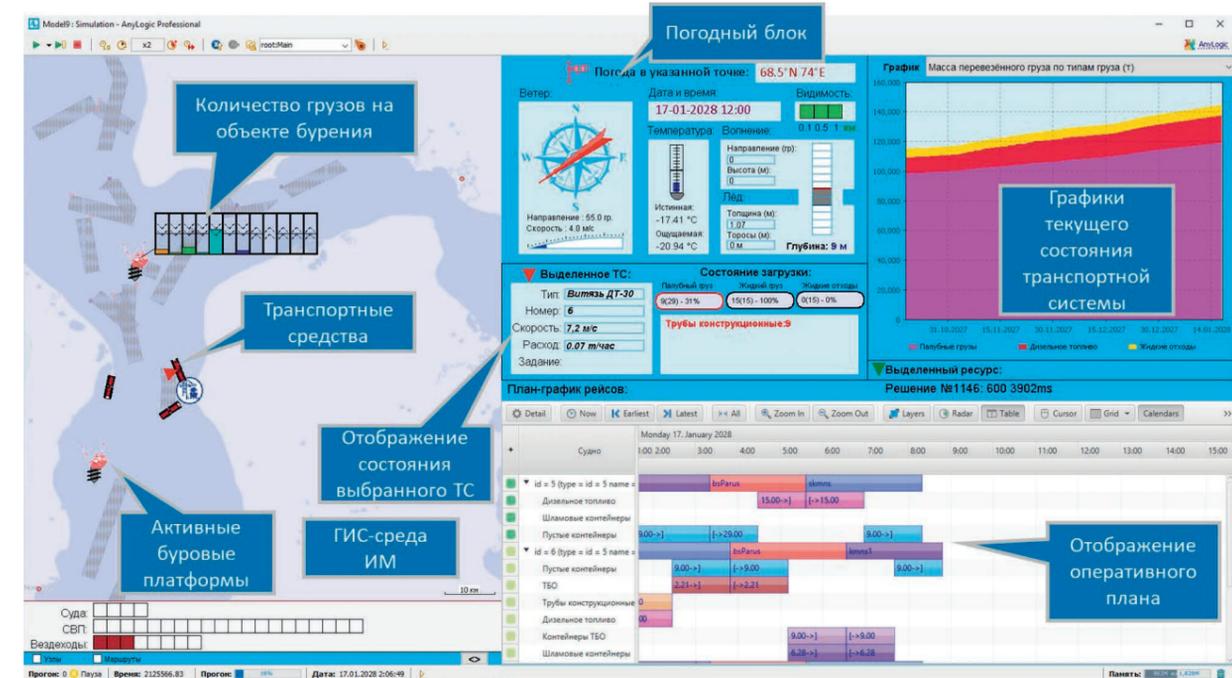
Для сокращения количества вариантов конфигурирования транспортных средств были рассмотрены два принципиальных варианта: «суда + СВП» и «суда + вездеходы + СВП». Вариант «суда + вездеходы» не рассматривался из-за высокого риска нарушения поставок в период межсезонья, когда суда обеспечения уже не могут работать, а выход вездеходов на лед еще не разрешен.

Варианты тяжести ледовых условий были приняты на основе исторических данных в соответствии с традиционной разбивкой на легкие, средние и тяжелые условия. Пиковое значение толщины припайного льда, приходящееся на май – июнь, в тяжелых ледовых условиях составляет порядка 1,85 м, в средних – 1,65 м, а в легких – 1,40 м.

Основные особенности реализации имитационной модели

Базовая логика построения имитационной модели соответствует принципам междисциплинарного подхода [1], при котором транспортные средства представляются как отдельные динамические элементы (агенты), функционирующие в геоинформационной среде

РИС. 3. Головное окно имитационной модели системы снабжения



под управлением блоков планирования. Транспортные средства перемещаются по predetermined графу, в узлах которого располагаются буровые установки, базы обеспечения или береговые объекты.

Имитационная модель объединяет несколько параллельных и взаимодействующих между собой вычислительных процессов, основными среди которых являются:

- генерация параметров погодных условий в регионе и определение возможности работы ТС,
- выполнение операций грузообработки ТС,
- моделирование движения ТС в изменяющихся природных условиях,
- моделирование динамики наполнения/опустошения хранилищ на ЛСП и ЛБК в соответствии с заданными грузопотоками,
- формирование плана перевозок.

Контур информационного обеспечения имитационной модели, который объединяет подмодели указанных процессов и различные базы данных, представлен на рис. 2. Головное окно имитационного эксперимента с обозначением основных элементов интерфейса показано на рис. 3.

Стохастический генератор погодных условий рассматриваемого региона (рис. 3) создан на основе подходов, изложенных в [2], и позволяет учитывать как авто-, так и кросскорреляционные свойства природных параметров, что обеспечивает реалистичность получаемой динамики природных показателей. Идентификация параметров генератора была выполнена на основе временных рядов изменения интересующих величин, собранных в базе данных погодных и ледовых условий.

В стохастическом генераторе моделируются: температура воздуха; вектор скорости ветра; дальность горизонтальной видимости; толщина припайного льда; высота снежного покрова; даты наступления ледостава и ледохода; расположение торосистых образований. Пространственная изменчивость этих параметров моделируется путем линейной интерполяции между точками, расположенными в разных концах региона интереса, причем учитывается корреляция значений в различных точках. На основе генерируемых природных параметров определяются временные периоды допустимости («окна погоды») осуществления погрузочно-разгрузочных операций в узловых точках логистической сети. Кроме того, текущие

природные параметры определяют принципиальную возможность движения ТС разного типа и их скорости хода.

Текущие скорости движения ТС различных типов и их расходы топлива определяются на каждом шаге работы ИМ (по умолчанию 1 час) с помощью специальных расчетных моделей. Алгоритмы расчета параметров движения были реализованы отдельно для водоизмещающих судов, СВП и вездеходов. При определении принципиальной возможности движения ТС в заданных условиях были приняты следующие допущения. Полагалось, что водоизмещающие суда могут работать в безледовый период, частично захватывая межсезонье, пока толщина ровного льда не превышает 80% от их номинальной ледопроемкости, что обеспечивает скорость хода не менее 4 узлов. СВП различной грузоподъемности способны работать круглогодично в соответствии с эксплуатационными ограничениями, т.е. за исключением случаев сильного ветра и предельно низкой видимости. Возможность работы вездеходов при различной толщине льда и температуре воздуха определяется в соответствии с существующей нормативной базой.

РИС. 4. График бурения месторождений с указанием длин и числа скважин

	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044	2045	2046	2047	2048	2049	Число скважин	Суммарная длина скважин, км			
1. Каменномысское море																														
ЛСП А	бурение				добыча, снабжение																				34	91				
ЛБК С											бурение										добыча								8	16
ЛБК D											бурение										добыча		6	17						
2. Северо-Каменномысское – ЛСП																														
3. Семаковское – ЛСП	бурение				добыча																				8	33				
4. Обское – ЛБК																														
5. Тота-Яхинское – ЛБК											бурение										добыча								4	11
6. Антипаютинское – ЛБК																														
7. Чугорьяхинское – ЛБК											бурение										добыча								8	21
7. Чугорьяхинское – ЛБК																														
Число скважин	2	7	8	17	17	14	7	7	0	2	2	1	1	3	3	0	2	2	4	4	3	3	2	2	1	114				
Суммарная длина скважин, км	2	12	20	37	52	46	32	4	0	3	3	2	2	8	8	0	5	5	8	9	9	12	8	5	4	297				

Для каждого типа ТС было создано специальное информационное описание, которое используется как при моделировании движения, так и в ходе планирования рейсов.

В состав информационной модели ТС входят:

- основные проектные характеристики;
- грузовые пространства;
- состояния загрузки (для судов);
- группы винтов (для судов и СВП).

Грузовые пространства водоизмещающих судов (танки, балки и грузовые палубы) позволяют перевозить наливные, порошковые и палубные грузы, а СВП и вездеходы имеют только грузовую палубу (табл. 1). Каждое грузовое пространство ТС описывается по отдельности.

Еще одним составляющим элементом имитационной модели является описание грузопотоков. Модельная реализация процесса наполнения и опорожнения хранилищ выполнена в отдельном модуле. Расчетные значения грузопотоков снабжения ЛСП и ЛБК были получены для всего периода работы системы на основе утвержденного графика бурения и проектной документации по скважинам. На рис. 5 показан принципиальный график выполнения буровых работ и суммарная длина пробуриваемых скважин. Как видно, процесс бурения характеризуется

значительной неравномерностью во времени, что накладывает существенный отпечаток на систему снабжения.

Типы грузов снабжения и их количество по каждой скважине были определены на основе проектных документов. Всего было выделено 12 типов грузов, из которых 7 имеют направление «на платформы», а оставшиеся 5 – «с платформ». На буровые установки завозятся: конструкционные трубы (включают обсадные и насосно-компрессорные трубы, дополнительные долота и элементы нижней части буровой колонны); буровые трубы; химические реагенты (включая порошковые грузы и различные реагенты для строительства скважин и других операций); пустые шламовые контейнеры; дизельное топливо; продукты питания; пустые контейнеры для твердых бытовых отходов (ТБО). В обратном направлении вывозятся: пустая тара (тара из-под химреагентов и продуктов питания); сточные воды; буровой шлам (заполненные шламовые контейнеры); контейнеры ТБО; отработавшие буровые трубы.

Принималось, что дизельное топливо завозится на каждую ЛСП только в период бурения на ней первых двух скважин, а на ЛБК – при выполнении всех буровых работ. ЛСП необходимо также снабжать, когда бурение уже окончено (количество грузов,

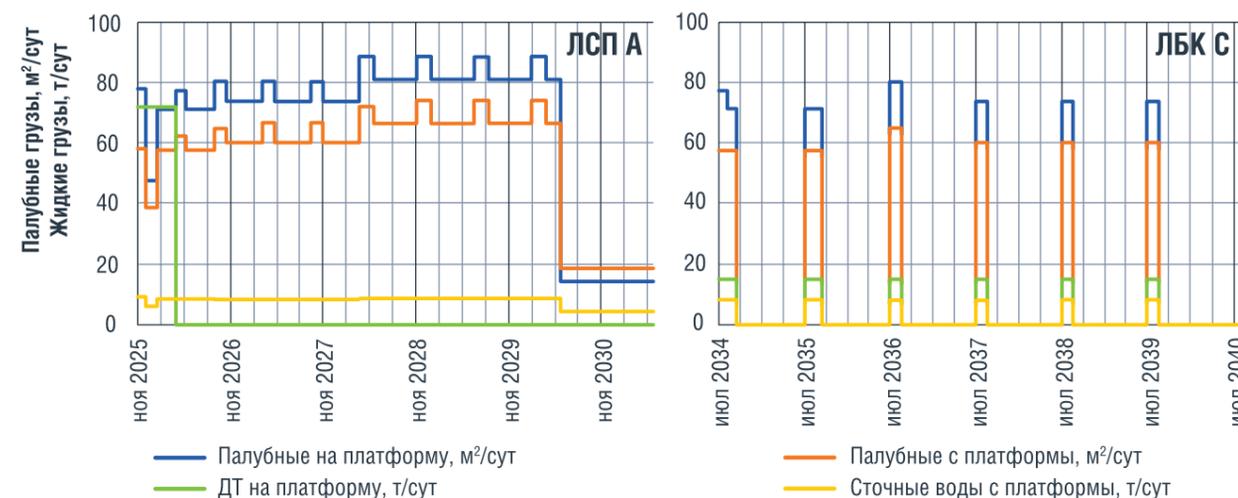
однако, при этом существенно снижается), а грузопотоки ЛБК после завершения бурения принимаются равными нулю. Отметим также, что количество обратной тары существенно зависит от способа доставки дизельного топлива на платформу и при использовании вездеходов и СВП может значительно возрастать.

Для удобства последующего анализа и представления результатов все моделируемые грузы отображались по четырем группам:

- 1) Палубные грузы на платформу (трубы конструкционные и буровые, химреагенты, шламовые контейнеры, продукты, контейнеры ТБО);
- 2) Палубные грузы с платформы (пустые контейнеры, сточные воды в таре, буровой шлам, ТБО, буровые трубы);
- 3) Дизельное топливо на платформу;
- 4) Сточные воды с платформ.

По умолчанию дизельное топливо и сточные воды являются жидкими грузами, однако при перевозке на СВП и вездеходах они относятся к палубным. Полученные таким образом статические данные о суточных объемах потребления и производства различных грузов на каждой буровой установке были записаны в базу данных интенсивностей грузопотоков.

РИС. 5. Расчетные укрупненные интенсивности грузопотоков снабжения для ЛСП А (слева) и ЛБК С (справа) на месторождении Каменномысское-море



В качестве характерного примера на рис. 5 приведены расчетные укрупненные интенсивности грузопотоков снабжения для ЛСП А и ЛБК С на месторождении Каменномысское-море.

Основным процессом ИМ является исполнение оперативного плана транспортными средствами. Задача оперативного планирования состоит в получении расписания рейсов всех ТС снабжения на период моделируемого цикла работы (например, сутки). План должен содержать загрузку ТС 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 [3]. Сформированный оперативный план рейсов выступает в качестве входных данных для ИМ. При планировании загрузки ТС снабжения учитывается как прямой поток грузов на ЛСП и ЛБК, так и обратный, включая, в том числе, и грузопоток порожней тары.

Составление расписаний работы ТС производилось путем обращения к внешнему движку комбинаторной оптимизации – библиотеке OptaPlanner, которая требует большой набор встроенных инструментов как для формирования корректного исходного приближения («первый подходящий» и «сильнейший подходящий»), так и алгоритмы локального поиска («поиск с запретами», «имитация

отжига», «поиск восхождением к вершине» и др.). В ходе процедуры направленного поиска лучшего решения модуль оптимизации перебирает возможные комбинации узлов транспортной сети, транспортных средств и перевозимых грузов. Результатом работы модуля планирования является формальное описание заданий на перевозку грузов транспортными средствами.

Полученный план директивно исполняется в ИМ до момента следующего вызова процедуры перепланирования, после чего все незавершившиеся и вновь поступившие заявки на рейсы осуществляются в соответствии с актуализированным планом. Фрагмент оперативного плана перевозок показан на рис. 3.

Выполнение численных экспериментов

В рамках исследования рассматриваемой системы должно производиться варьирование вариантов расположения баз снабжения, типов судов и СВП, а также тяжести ледовых условий. Очевидно, что полный перебор в данном случае практически неосуществим, поэтому был создан специальный план численных экспериментов. Он состоял из нескольких этапов. В начале на основе базовой конфигурации ТС (суда пр. 22430, СВП 10 т и вездеходы «Витязь») сопоставлялись все шесть сценариев работы системы. Далее каждый из сценариев был

рассмотрен при использовании других вариантов судов снабжения, при этом тип СВП и вездеходов не изменялся. На следующем этапе для наиболее рациональных конфигураций системы были проанализированы случаи, когда в составе флота имеются только водоизмещающие суда и СВП различных типов. На последней стадии расчетов выбранные предпочтительные конфигурации системы анализировались при различном типе тяжести ледовых условий. В общей сложности было проанализировано 44 конфигурации системы снабжения на горизонте до 2049 года.

В ходе каждого имитационного эксперимента производилась запись основных параметров рейсов всех ТС. Полный лог рейсов, получаемый после каждого прогона имитационной модели на горизонте до сентября 2049 года, содержит порядка 50–90 тысяч записей. Дальнейшее агрегирование этих данных позволяет получать практически любые обобщенные показатели и сводные результаты по заданным временным интервалам.

В частности, на месячной основе для ТС каждого типа определялось: число активных ТС; суммарные длительности переходов, грузовых операций и ожиданий; общая дистанция и число переходов; расходы топлива; количество перевезенных грузов каждого типа. Эти данные, сформированные для каждой конфигурации системы, далее передавались в блок экономических расчетов.

Модель для расчета экономических показателей

Для выбора наилучшей схемы транспортно-логистического обеспечения была разработана аналитическая модель, позволяющая оценить сводные экономические показатели работы транспортной системы для каждого из принятых сценариев. Модель была реализована в виде отдельного программного модуля. Финансово-экономический анализ каждого сценария включает в себя расчет капитальных и эксплуатационных расходов по всем основным объектам системы [4, 5] (табл. 2).

Интегральным показателем оценки экономической эффективности варианта системы снабжения являются суммарные затраты на содержание объектов за весь период реализации проекта. В обобщенном виде экономически обоснованные затраты на содержание объектов ЗТ могут быть представлены следующим образом:

$$Z_T = \sum_{t=1}^T Z_t^z + \sum_{t=1}^T Z_t^u \quad (1)$$

где T – продолжительность расчетного периода, лет, $t = \overline{1, T}$, Z_t^z – эксплуатационные затраты на содержание объектов системы (без учета амортизационных отчислений) в t -ом году расчетного периода, руб., Z_t^u – годовые эквивалентные инвестиционные затраты на строительство объектов системы, отнесенные на t -ый год расчетного периода, руб.

Объем инвестиций в расчетном периоде определяется дифференцировано по всем объектам. Для прогнозирования годовых эквивалентных инвестиционных затрат использовалось следующее аналитическое выражение:

$$Z_t^u = \frac{K_{cmp}}{S_{N,E}} \quad (2)$$

где K_{cmp} – затраты на строительство объекта, руб., $S_{N,E}$ – коэффициент наращивания аннуитета, определяемый на основе зависимостей (3).

$$S_{N,E} = \frac{(1+E)^N - 1}{E}, \quad N = t_{cmp} - t_0, \quad (3)$$

где E – процентная ставка, N – период аннуитета, t_{cmp} – ожидаемый год строительства объекта, t_0 – начальный год расчетного периода.

В целом расходы на содержание объектов системы представляют собой общую сумму годовых эксплуатационных расходов и капитальных вложений по всем объектам за весь период реализации проекта. В качестве капитальных вложений рассматривались инвестиции в строительство транспортных средств и баз обеспечения. Полагалось, что финансирование капитальных вложений на строительство объектов в полном объеме осуществляется за счет привлеченных кредитных средств.

Основные результаты

Основными параметрами рассматриваемой системы, которые определялись в ходе имитационного моделирования, являются: необходимая численность ТС; периоды работы (навигации) ТС; суммарный расход топлива различными типами ТС.

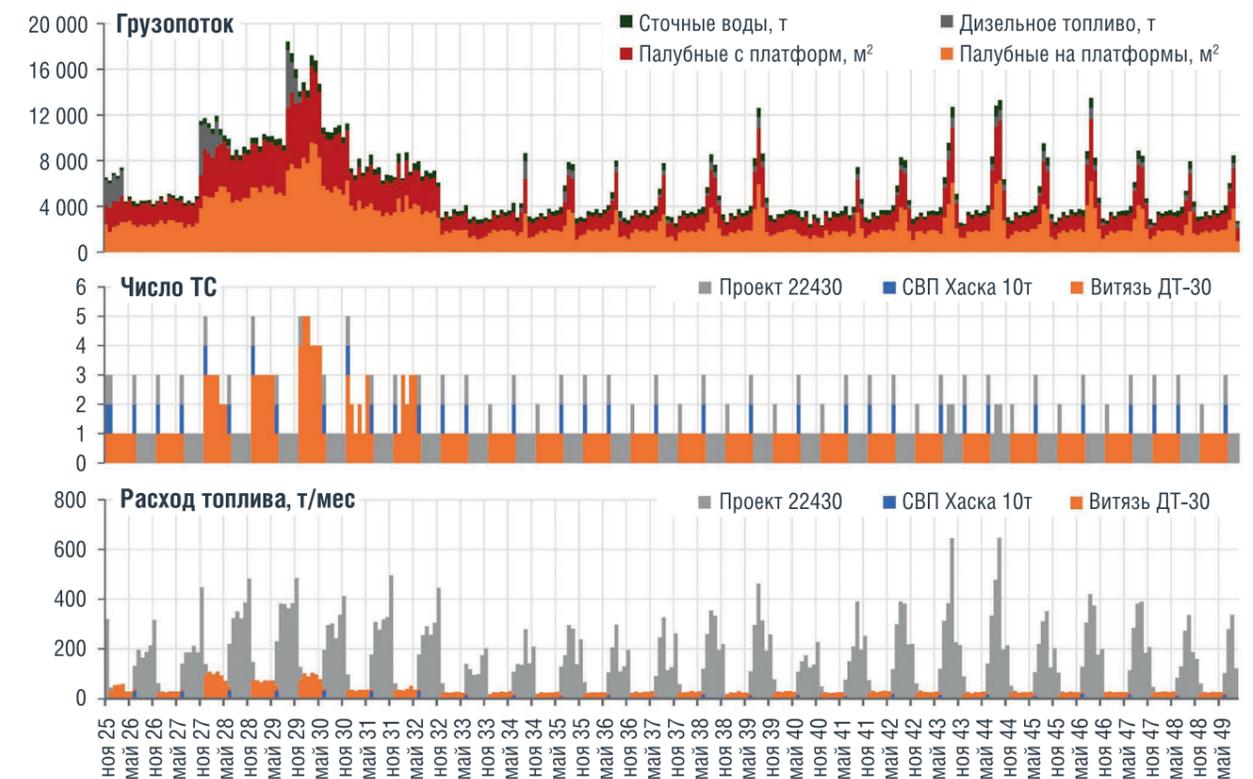
Поскольку график бурения и грузопоток системы являются очень неравномерными, необходимая численность ТС также сильно изменяется во времени, что показано на рис. 6. Наибольшая интенсивность перевозок характерна для 2027–2032 годов. Затем грузопоток в целом снижается, но возникают пики, обусловленные сезонным бурением, причем высота этих пиков соизмерима со значениями грузопотока

начального периода. Максимальное количество ТС зимне-весеннего периода (СВП и вездеходы) ожидается приходится на 2027–2032 годы и для разных вариантов конфигурации системы составляет от 4 до 8 вездеходов и от 1 до 4 СВП различного типа. После 2032 года для зимнего снабжения обычно оказывается достаточно одного-двух вездеходов и одной СВП. Если рассматривать конфигурации системы без вездеходов, то в этом случае требуется либо четыре СВП 10 т, либо одна-две СВП 30 т, либо одна СВП 60 т.

Необходимая численность судов снабжения, работающих летом и осенью, изменяется несколько иначе. Грузопотоки пикового периода 2027–2032 годов обеспечиваются одним водоизмещающим судном, что обусловлено высокой провозной способностью морских судов и компактностью региона перевозок (в этот период происходит снабжение нескольких близко расположенных ЛСП). Во время активного сезонного бурения в 2043–2046 годах в течение одного-двух месяцев года требуется наличие двух судов, что обусловлено более широкой географией доставки грузов.

Помимо длительных пиковых периодов, в течение года встречаются краткосрочные пики, которые в значительной степени определяют потребность в ТС. Наибольшему влиянию подвержена потребность в вездеходах. Увеличение численности вездеходов за счет кратковременных

РИС. 6. Характерное изменение грузопотоков (сверху), число используемых транспортных средств (посередине) и их расходы топлива (снизу) по месяцам



пиковых нагрузок приводит к увеличению капитальных затрат на строительство объектов системы. Поэтому в рамках экономического моделирования для исключения нерационального использования вездеходов, потребность в них в пиковые периоды компенсировалась за счет использования резервных СВП.

Периоды начала и окончания навигации водоизмещающих судов в значительной степени оказывают влияние как на численность всех ТС, так и на их состав. Начало навигации судов приходится в среднем на середину июня, когда акватория полностью очищается ото льда. Длительность навигации составляет 150–165 суток в средних ледовых условиях, около 180–195 в легких, и 135–150 в тяжелых. Большие значения длительности навигации соответствуют судам с более высокой ледопробиваемостью. Работа вездеходов начинается, когда толщина льда достигает 0,8–0,9 м. Это происходит в среднем с конца ноября до последней декады декабря. Окончание работы вездеходов происходит в начале июня,

когда среднесуточные температуры воздуха становятся положительными. Закономерно, что чем тяжелее ледовые условия, тем более продолжителен период работы вездеходов. Привлечение СВП в период межсезонья производится в среднем на 8–12 суток в июне и на 3–18 суток в конце ноября – начале декабря. Длительность зимнего периода использования СВП зависит от ледопробиваемости судна, и чем она выше, тем меньше промежутков между окончанием работы судна и началом работы вездеходов. В частности, по этой причине в данном проекте целесообразно использовать суда снабжения с ледопробиваемостью не менее 0,8 м. В тяжелых ледовых условиях из-за короткого периода межсезонья потребность в СВП может отсутствовать, но в легких условиях она существенно возрастает. Поэтому полный отказ от использования СВП в рассматриваемой системе невозможен.

В ходе анализа результатов моделирования был обнаружен интересный эффект, согласно которому увеличение

ледопробиваемости судна снабжения положительно сказывается на необходимой численности ТС зимнего периода. Это обусловлено тем, что чем больше времени работает судно снабжения, тем в более благоприятных условиях начинают свою работу СВП и вездеходы. Другими словами, имеется некий динамический эффект, который наблюдается при смене типа работающих ТС.

Расходы на топливо ТС являются одной из основных статей эксплуатационных расходов. В конфигурациях транспортной системы, в которых присутствуют все типы ТС (водоизмещающие суда, вездеходы и СВП), основное потребление топлива (порядка 80–85% от общего количества) приходится именно на суда снабжения (см. рис. 7). Если в системе используются только суда и СВП, то месячное потребление топлива при смене типа ТС отличается не столь существенно из-за высокого потребления топлива СВП, которые расходуют значительную часть энергии на поддержание давления в подушке.

ТАБЛИЦА 2. Объекты экономической модели системы снабжения

Объекты	Структура расходов
Транспортные средства, в т.ч.: <ul style="list-style-type: none"> суда-снабженцы СВП вездеходы вертолеты 	Капитальные затраты
Базы обеспечения, в т.ч.: <ul style="list-style-type: none"> ПБО с ледовым классом Arc7 и Arc4 основные ББО вспомогательные ББО 	Эксплуатационные расходы, в т.ч.: <ul style="list-style-type: none"> постоянные расходы переменные расходы
Ледовая дорога	

Определенные выводы также могут быть сделаны в отношении вместимости используемых ТС. Распределение количества палубных грузов практически не зависит от типа судна, пиковые значения загрузки в рейсе не превышают 300–350 м², а среднее значение загрузки грузовой палубы для судов всех типов составляет порядка 85–90 м². При этом у судов типа «Буми» и 22430 максимальная площадь палубы составляет 725 и 600 м² соответственно. Неполное заполнение грузовой палубы судов снабжения обусловлено ограниченной вместимостью грузовых площадок буровых установок и маленьким (по меркам оффшорных систем снабжения) расстоянием между точками снабжения и базой обеспечения. В результате судам просто нет необходимости возить большие партии грузов. Таким образом, использование в рассматриваемой системе судов с площадью грузовой палубы более 300–350 м² является избыточным.

Загрузка грузовой площадки вездеходов и СВП характеризуется определенной дискретностью, что связано с особенностями грузовых пространств этих ТС и типами перевозимых грузов. СВП «Хаска», имеющая грузоподъемность 10 т, ориентировочно в 50% случаев работает с полной загрузкой палубы (большинство палубных грузов являются относительно легкими, и загрузка всей грузовой площадки происходит без превышения грузоподъемности СВП), около 25% рейсов проходят порожнем, а остальные 17% – с промежуточной загрузкой. Анализ загрузки СВП «Хаска» показывает, что у этого судна наблюдается некоторый дисбаланс между площадью грузовой палубы и грузоподъемностью. Например, масса 40-футового контейнера с дизельным топливом составляет не менее 27–33 тонн. Формально этот контейнер может быть размещен на грузовой площадке СВП, но ограничение по грузоподъемности не позволяет этого сделать. Танк-контейнер длиной 20 футов, загруженный топливом, весит порядка 15 т и также не может быть размещен на палубе. Таким образом, одной из рекомендаций настоящей работы является повышение грузоподъемности СВП «Хаска» не менее чем до 15 тонн.

Сопоставительный анализ альтернативных вариантов расположения баз обеспечения показал, что наиболее перспективным является расположение основной базы обеспечения на мысе Парусный или использование двух ПБО класса Arc7, сменяющих одна другую в Обской губе. Благоприятные показатели работы ТС в этих случаях обеспечиваются за счет близкого расположения баз снабжения к буровым установкам.

Выбор между береговым и морским вариантами реализации базы обеспечения производился на основе экономического анализа, который позволил сделать вывод о том, что строительство береговых баз обеспечения является более эффективным вариантом по сравнению с использованием плавучих баз. Это связано как с высокой стоимостью ПБО ледового класса Arc7, так и с необходимостью в любом случае содержать береговую базу обслуживания техники (вездеходов и СВП). Помимо этого, в ходе экономического анализа было установлено, что конфигурация ТС по схеме «суда + СВП» является менее эффективной, чем вариант «суда + СВП + вездеходы». Это связано с высокой стоимостью строительства и обслуживания СВП, которая в первом случае оказывается на порядок выше, чем во втором. Дополнительным результатом, полученным в ходе экономического анализа, является то, что изменение типа ледовых условий практически не влияет на величину суммарных расходов. Это вызвано относительно небольшими вариациями сводных технико-эксплуатационных показателей в зависимости от тяжести ледовых условий.

Заключение

Рассматриваемая система логистического обеспечения месторождений Обско-Тазовского региона является во многом уникальной, а множество прикладных аспектов ее реализации в настоящий момент не апробировано на практике. Главным образом это относится к использованию грузовых СВП и гусеничных вездеходов.

В частности, не в полной мере изучены вопросы обеспечения необходимого ресурса гибкого ограждения грузовых СВП, регулярно работающих в условиях ледяных торосов. В отношении вездеходов неясными остаются вопросы, связанные с достижимыми скоростями хода, возможностью преодоления полыней, необходимостью подготовки ледовых трасс, готовностью нормативной базы и другими аспектами. Соответствующие ответы могут быть получены только в ходе опытной эксплуатации СВП и вездеходов на следующих этапах развития проекта. В настоящем же исследовании были приняты определенные допущения, на основе которых был сформирован принципиальный облик системы и рекомендованы наиболее эффективные с технико-экономической точки зрения решения. Получить соответствующие результаты оказалось возможно только благодаря междисциплинарному подходу, в рамках которого была выполнена интеграция имитационной модели, методов оптимизационного логистического планирования и экономических моделей для оценки эффективности работы транспортной системы. ●

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. Май Р.И., Таровик О.В., Топаж А.Г. Моделирование морской погоды как входного сигнала имитационных моделей транспортных и экологических систем в арктическом регионе // Проблемы экологического мониторинга и моделирование экосистем, т. 29, № 3, 2018. С. 20–38.
3. Топаж А.Г., Таровик О.В., Реуцкий А.С., Киселёв В.А. Оперативное планирование и комбинаторная оптимизация в имитационных моделях транспортной логистики проектного уровня // Сборник трудов научно-практической конференции ИММОД-2019. С. 235–241.
4. Буянов А.С. Методы оценки стоимости перевозки грузов морским транспортом в условиях ограниченного информационного обеспечения // Транспорт Российской Федерации. № 3 (94) 2021. С. 22–27.
5. Буянов А.С., Гончарова А.Н. Особенности формирования морских транспортно-логистических систем в условиях Арктики // Сборник научных трудов АО «ЦНИИМФ». 2020. С. 58–67.

KEYWORDS: *marine transport system, simulation modeling, operational planning, feasibility study.*