

ДРУГИЕ ВОПРОСЫ МОРСКОЙ ТЕХНИКИ

УДК 629.563.8.003.13

А.А. КОНДРАТЕНКО, О.В. ТАРОВИК

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО И КОЛИЧЕСТВЕННОГО СОСТАВА ФЛОТА СУДОВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Рассмотрены существующие методы и решения, предназначенные для поиска оптимальной конфигурации флота судов обеспечения по функциональному и количественному составу. Предложена оригинальная классификация этих методов на основе используемых в них математических моделей и степени детализации транспортной системы. Выделено четыре основных подхода: экспертно-аналитический, комбинаторная оптимизация, теория массового обслуживания, имитационное моделирование. Рассмотрены отечественные и зарубежные работы по каждой группе методов, отмечены их сильные и слабые стороны. Приведены рекомендации по применению методов различных групп при решении конкретных видов задач. Описан опыт разработки авторами (в составе исследовательского коллектива) программного комплекса агентного имитационного моделирования морских транспортных систем и отмечена перспективность использования подобных решений при создании систем обеспечения арктических месторождений.

Ключевые слова: суда обеспечения, определение состава флота, суда снабжения, морские месторождения, проектирования судов, имитационное моделирование систем, планирование морских перевозок.

ВВЕДЕНИЕ

При освоении морских месторождений нефти и газа используется большое количество сложных технических средств, выполняющих работы по бурению и обустройству скважин, а также по добыче и переработке сырья. Важную роль в поддержании работоспособности этих средств играет флот обеспечения и снабжения, проектированию которого в мировой практике уделяется достаточно много внимания. В последние годы на фоне планов по освоению труднодоступных месторождений Арктики создание судов обеспечения становится чрезвычайно актуальным и для России. Это обусловлено

тем, что стабильность и эффективность работы системы обеспечения напрямую влияет на экономическую эффективность и надежность шельфовых проектов. Вместе с тем, для отечественной практики задача создания систем обеспечения буровых и добычных платформ является достаточно новой и мало изученной. Авторам не удалось найти ни одного варианта классификации методов проектирования флота судов обеспечения как в отечественных, так и в зарубежных изданиях. Поэтому была разработана собственная оригинальная классификация таких методов, а также выполнен анализ их применимости к решению различных практических задач. В основу классификации положены применяемые методические подходы, различающиеся как по степени детализированности описания различных процессов, происходящих в системе обеспечения, так и по используемому математическому аппарату. Предлагаемая классификация может послужить основой для систематического изучения и дальнейшего развития методов проектирования флота судов обеспечения в отечественной практике.

КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ

На данный момент за рубежом и в России применяется множество методов для определения различных показателей систем обеспечения шельфовых работ и сравнения технико-экономической эффективности их конфигураций.

Состав и характеристики флота судов обеспечения должны позволять в полном объеме и в необходимый срок выполнять следующие задачи:

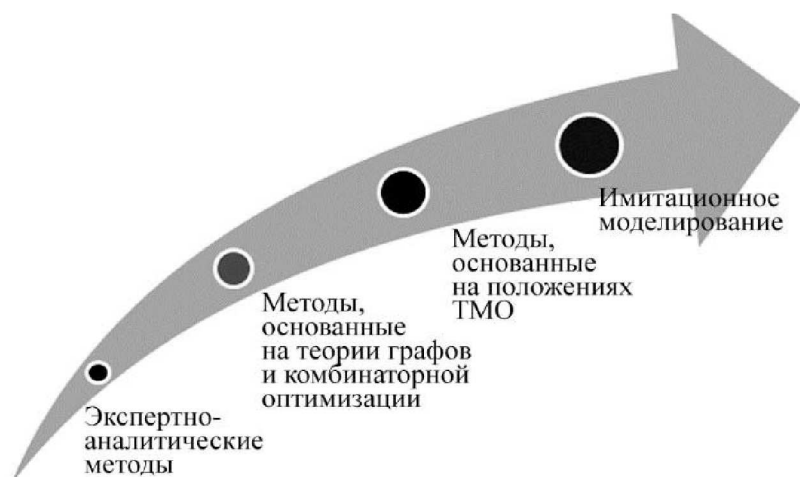
- снабжение шельфовых буровых средств и платформ необходимыми грузами с учетом их номенклатуры и динамики расходования, а также вывоз технологических и бытовых отходов (суда-снабженцы);
- буксировка буровых установок и их постановка на якоря (суда-завозчики якорей).

Сопутствующими функциями, которые могут быть возложены на различные суда обеспечения, являются:

- пожаротушение;
- ликвидация аварийных разливов нефти;
- дежурно-спасательные операции;
- транспортировка экипажа;
- водолазные подводные работы;
- подводные роботизированные работы;
- крановые работы;
- ледокольные операции.

Оценка состава флота судов обеспечения в рамках конкретного проекта включает два этапа. Во-первых, конкретизируются необходимые функции, которые должны быть выполнены судами обеспечения. Во-вторых, производится оптимизация функционального и количественного состава судов обеспечения с учетом распределения необходимых функций между ними.

Рис. 1. Классификация методов определения состава флота обеспечения по степени детализации различных процессов в транспортной системе



На рис. 1 представлен разработанный авторами вариант классификации таких методов по степени детализации рассматриваемой системы и количеству учитываемых факторов. Стрелкой показано направление увеличения потенциальных возможностей и, одновременно, сложности методов. Ниже рассмотрены особенности различных подходов.

ЭКСПЕРТНО-АНАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

Группа экспертно-аналитических методов основывается на упрощенном описании процессов, происходящих внутри системы. Отличительной особенностью данной группы методов является особая роль, которую играет эксперт – специалист высокого класса в рассматриваемой области, который на основе своего опыта, имеющихся статистик и ограниченного объема исходных данных может назначать основные эксплуатационные параметры каждого элемента системы.

В рассматриваемой группе методов можно выделить две подгруппы:

- методы для определения функционального состава флота;
- методы для определения качественного и количественного состава флота.

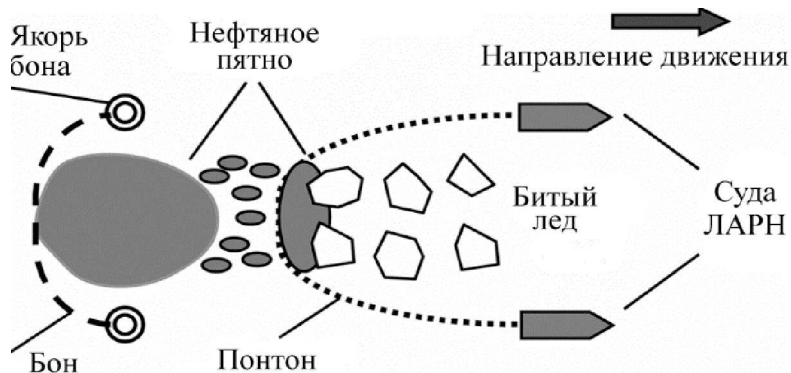
Экспертно-аналитические методы определения функционального состава флота служат отправной точкой в любом исследовании, связанном с проектированием системы обеспечения, т.е. используются всегда, вне зависимости от дальнейшего применения методов других групп. С их помощью определяется минимально необходимый набор функций, которые должны быть распределены между судами. Эти функции выбираются исходя из общих представлений о проектируемой системе, конструктивных и эксплуатационных особенностей обслуживаемых объектов, а также требований специализированных регламентов и правил. Важную роль на данном этапе играет анализ опыта эксплуатации аналогичных систем и отдельных их элементов с целью поиска наиболее благоприятных решений для повышения качества проектирования, эффективности и безопасности. Большинство нормативных документов отрасли основано на существующем

международном опыте выполнения операций обеспечения в соответствии с «лучшей практикой». В данном случае под этим термином подразумеваются наиболее эффективные процедуры, мероприятия и приемы, которые приобрели свой окончательный облик в результате длительного практического совершенствования. Важную роль играет поддержание нормативных документов в актуальном состоянии, поэтому различными компетентными организациями регулярно проводится работа по их обновлению и совершенствованию. В настоящий момент существует множество нормативных документов, регулирующих те или иные аспекты создания, планирования и функционирования флота обеспечения, среди которых особый практический интерес представляют документы и руководства [5–9, 11–13, 20, 28–30]. В состав авторских коллективов при создании подобных руководств включают ведущих специалистов различного профиля – представителей крупных судоходных и нефтегазодобывающих компаний, сотрудников классификационных обществ и других профессионалов. Наиболее комплексным источником, включающим в себя рекомендации по широкому кругу вопросов, связанных с созданием и функционированием флота обеспечения, является международное руководство *Guidelines For Offshore Marine Operations* [7]. Важно отметить, что большинство указанных документов носят рекомендательный характер.

Вторая подгруппа экспертно-аналитических методов предназначена для определения необходимого количественного и качественного состава флота, которое производится после составления набора рассматриваемых функций. Такие методы позволяют разработать возможные варианты распределения функций между конкретными судами (качественный состав флота) с определением их потребного количества, а также оценить преимущества и недостатки различных конфигураций флота. Обычно в процессе подобного анализа учитывается возможность использования как специализированных, так и многофункциональных судов. Такой анализ проводится отдельно для каждой функции путем рассмотрения «критических ситуаций» – наиболее сложных сценариев обслуживания, которые могут возникнуть в процессе эксплуатации. Затем анализируется потребное количество судов для удовлетворения конкретного сценария и составляется таблица соответствия функций и потребного количества судов. Исходя из особенностей рассматриваемой ситуации, определяются возможные варианты компоновки специального оборудования. Примером такой критической ситуации может служить ликвидация аварийного разлива нефти (ЛАРН) в ледовых условиях, где в качестве экспертного решения предлагается использовать два судна обеспечения (рис. 2).

Помимо анализа критических ситуаций, в составе экспертно-аналитических методов имеется большая группа методов, предназначенных для определения характеристик и количества судов, осуществляющих доставку грузов снабжения. При этом предполагается использование простых расчетных формул, которые лишь схематично описывают реальные

Рис. 2. Пример экспертного решения по локализации разлива нефти в ледовых условиях с использованием двух судов



эксплуатационные схемы, когда основным требованием к системе снабжения считается обеспечение суммарного грузопотока, без детализации по типам грузов.

Характерным образцом данной группы может послужить метод, описанный в работе [27], где предполагается либо последовательный обход буровых установок судами (линейная схема), либо челночная работа судов снабжения на одной линии. В качестве наиболее тяжелого расчетного сценария принимается самый неблагоприятный с точки зрения погодных условий период года, которому соответствуют наименьшие значения среднемесячной скорости движения судов. В качестве требований к системе принята необходимость доставки 100 % груза в течение времени, равного автономности буровой установки. Возможны различные модификации экспертно-аналитических методов применительно к работе в ледовых условиях, когда время рейса существенно изменяется в течение года. Например, возможен учет средних скоростей по каждому месяцу в отдельности [23].

Необходимо отметить, что различные элементы экспертно-аналитических методов используются во всех других компьютеризированных методах оценки состава флота обеспечения, т.к. именно на основе экспертно-аналитического подхода могут быть получены первоначальные оценки конфигурации флота. Кроме того, большинство практических работ по проектированию флота снабжения, выполненных в России, относятся именно к экспертно-аналитической группе.

МЕТОДЫ ТЕОРИИ ГРАФОВ И КОМБИНАТОРНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

Существует множество работ, посвященных решению проблемы оценки состава флота на базе оптимизированных расписаний движения судов [1, 10, 17]. Эти методы учитывают, главным образом, операции снабжения платформ и оставляют за рамками рассмотрения необходимость выполнения технологических и аварийно-спасательных операций. Однако, в отличие от экспертно-аналитических методов, комбинаторная оптимизация позволяет учитывать потребности платформ в грузах различных типов, а также необходимость вывоза отходов. Данная группа методов использует



Weekly vessel plan

		MONDAY			TUESDAY		
		17:00	17:00	19:00	17:00	17:00	19:00
DEP. MONGSTAD	ARR.						
BARGE "BRGA"	Arr. Mo. 23:00	1					We. 09:30
	Dep. Tu. 01:30						We. 11:30
GRANE	Arr. Tu. 15:00	4			We. 05:00	1	
"HRMA"	Dep. Tu. 18:00				We. 07:00		
DEEP SEA	Arr. Tu. 09:30	3			We. 09:30	2	
DELTA	Dep. Tu. 12:30				We. 12:00		
T.O. WINNER	Arr.		Mo. 21:30	1			
	Dep. Tu. 00:00				Tu. 21:30	1	
HEIMDAL	Arr.				We. 00:00		
"HEDP"	Dep.						
B. DOLPHIN	Arr. Tu. 00:30				We. 00:30		
"BIDE"	Dep. Tu. 03:00	2			We. 03:00	2	
OSEBERG A&D	Arr.						We. 12:00
"OSUF"	Dep.						We. 15:00
OSEBERG B	Arr. Tu. 02:30				We. 18:30	4	
"OSUB"	Dep. Tu. 05:00	2			We. 20:30		

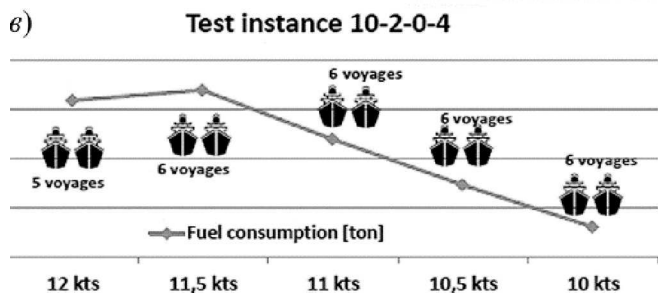


Рис. 3. Применение комбинаторной оптимизации для анализа системы снабжения: а) анализируемая система и ее представление в виде графа; б) оптимизированное расписание [2]; в) влияние скорости хода на число рейсов и расходы топлива [10]

представление пространственной структуры системы снабжения в виде графа с вершинами в точках расположения баз снабжения и буровых установок, а суда осуществляют движение вдоль ребер графа (рис. 3).

Отличительная особенность таких методов – не только учет логики движения судов снабжения, но и ее оптимизация, т.е. определение наиболее рациональной последовательности обхода буровых установок и скоростей движения судов на каждом ребре графа. В качестве ограничений при этом могут учитываться окна доступности буровых установок – например, дневное время работы, характерное для норвежской шельфовой инфраструктуры. Для практического решения задач комбинаторной оптимизации используется множество методов и программных решений, относящихся к технологии VRP (Vehicle Routing Problem) [1]. Результатом работы методов комбинаторной оптимизации является оптимальная маршрутизация судов (последовательность обхода буровых установок), а также наиболее рациональные скорости их движения.

Решение задачи оптимизации расписаний движения судов на весь период их работы затруднено высокой вычислительной сложностью, кроме того, в практике судоходных компаний-операторов судов снабжения чаще всего используются регулярные повторяющиеся расписания. Поэтому зачастую для оптимизации используется семидневный отрезок – «базовая неделя» – в рамках каждого сезона года [1, 2, 10]. Это позволяет сформировать посезонные недельные расписания, на основе которых определяются суммарные годовые технико-экономические показатели для каждой конфигурации системы. Наибольшее распространение данная группа методов получила среди норвежских специалистов. Следует также отметить, что задача комбинаторной оптимизации возникает, главным образом, при

достаточно большом числе платформ, снабжаемых рассматриваемым флотом. Так, для норвежских работ в этой области характерное число платформ включает около 20–30 единиц.

Во всех известных работах комбинаторная оптимизация используется только для составления оптимальных расписаний движения судов снабжения с указанием рекомендуемых скоростей, а оптимизация функционального и количественного состава флота обеспечения производится только в сочетании с другими методами – например, теорией массового обслуживания или имитационным моделированием [10, 16]. Необходимость такого совместного использования обусловлена также и тем, что при выполнении комбинаторной оптимизации исключается учет стохастических факторов, что не всегда приемлемо для практических задач.

МЕТОДЫ, ОСНОВАННЫЕ НА МАТЕМАТИЧЕСКОМ АППАРАТЕ ТЕОРИИ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ

Практическое использование положений теории массового обслуживания (ТМО) применительно к задаче оценки состава флота судов обеспечения позволяет учесть принципиальную структуру транспортной системы и различные стохастические процессы, протекающие в результате ее функционирования [16, 22, 25]. Важным отличием этой группы методов от описанных ранее является возможность учета технологических операций, выполняемых судами обеспечения.

В рамках ТМО система обеспечения представляется состоящей из заявок – запросов на доставку грузов или на выполнение каких-либо операций, и ресурсов (каналов обслуживания), которые осуществляют их обслуживание – судов снабжения, завожчиков якорей и т.п. (рис. 4).

Вероятностный характер могут носить такие характеристики, как время появления партии груза, возникновение простоя судна вследствие докования или неисправности, запрос на выполнение технологической операции и др. После составления принципиальной модели системы обеспечения возможно получение аналитических решений, основанных на положениях теории массового обслуживания.

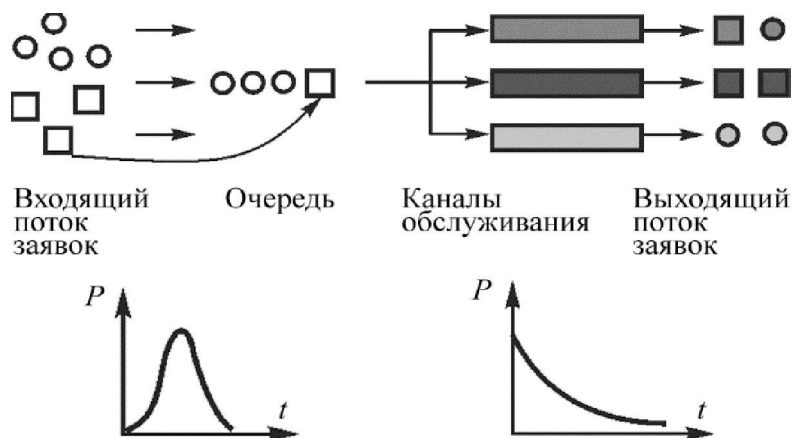


Рис. 4. Схема системы массового обслуживания и ее элементы [22]

Такие модели имеют более высокую степень детализации по сравнению с описанными ранее, что влечет за собой необходимость наличия большего количества входной информации для расчета. Это относится не только к законам распределения потоков случайных величин и событий, но и к необходимости ввода в явном виде последовательности обхода судами буровых установок. Последнее объясняет частое совмещение ТМО либо с экспертными оценками последовательности их обхода судами, либо с оценками расписаний движения, полученными с помощью теории графов и комбинаторной оптимизации. Однако и в этом случае может возникнуть ряд трудностей, обусловленных сложностью учета необходимых технологических операций.

Отличительной чертой моделей, основанных на положениях ТМО, является отсутствие наглядности восприятия. Кроме того, определенным ограничением является то, что ТМО применима только для установившейся работы системы, и только при определенных типах распределений случайных процессов, для которых получены аналитические решения. Чаще всего используется пуассоновский поток для входящих заявок и экспоненциальное распределение времени обработки.

Вместе с тем описание работы судов обеспечения с помощью ТМО часто используется для выполнения оптимизации функционального и количественного состава флота на базе формальных алгоритмов поиска экстремума [22]. Также есть примеры использования ТМО для решения ряда множества смежных задач – например, таких, как оценка оптимального объема склада грузов снабжения [16], моделирование систем морских контейнерных перевозок, моделирование морского обеспечения системы ветряных электростанций [3] и т.п.

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Характерной особенностью имитационных моделей, которой не обладают описанные выше методы, является прямое описание последовательного течения событий в имитируемой системе. Категория времени, т.е. нестационарность происходящих процессов, играет в них важную роль. Благодаря этому возникает потенциальная возможность создавать более детализованные модели с нестационарными во времени процессами.

Имитационные модели функционирования флота можно разделить на две группы:

- дискретно-событийные модели [2, 10];
- агентные модели [21, 26, 31].




Отличия заключаются в том, что основным элементом дискретно-событийного моделирования являются элементарные события, происходящие в единой системе, в то время как в агентных моделях используются независимые объекты с индивидуальным поведением, функционирующие в пространственно-временной среде.

Примерами дискретно-событийных моделей для оценки состава флота обеспечения являются работы [2, 10]. Такие модели предназначены, как правило, для проверки адекватности регулярных сезонных планов (расписаний), получаемых с использованием методов комбинаторной оптимизации (рис. 5). Если в процессе имитации выбранная ранее конфигурация флота обеспечения не может выполнить рассматриваемый план, производится его корректировка. При этом погодные условия моделируются на основании статистических данных по ветру и волнам с использованием вероятностных распределений для заданного региона в конкретный момент времени. Модели движения судов учитывают зависимости скорости движения от ветро-волновых и ледовых условий, окна погоды, длительность погрузочно-разгрузочных операций и другие факторы.

Для судов, которые функционируют по нелинейным эксплуатационным схемам, выполняют несколько функций или являются частью транспортной системы со сложными логическими связями между элементами, адекватную и непротиворечивую эксплуатационную модель можно получить с помощью агентного имитационного моделирования [21, 26, 31].



К данной группе относятся суда ледового плавания и ледоколы, суда обеспечения нефтегазодобывающей отрасли, суда технического флота и многие другие. Возможности агентного моделирования позволяют учесть особенности эксплуатации морской инфраструктуры с учетом взаимодействия различных составляющих транспортной системы между собой. Модель комплексной системы при данном подходе состоит из множества объектов, которые являются ее составными частями. Каждый объект обладает своим уникальным набором свойств –

Базовое расписание

-  операции погрузки на базе снабжения
-  операции доставки грузов и выгрузки их на платформы
-  операции выгрузки мусора на базе снабжения

Vessel schedules	Monday	Tuesday	Wednesday	Thursday	Friday	Saturday	Sunday
	8 16 24	32 40 48	56 64 72	80 88 96	104 112 120	128 136 144	152 160 168
1	(1,1)	I,L,K,S,O,B		(1,2)	I,L,K,S,O,B		
2	(2,1)	Q,R,V		(2,2)	Q,R,V		
3		(3,1)	U,N,J,M,H		(3,2)	U,N,J,M,H	
4		(4,1)	E,F,G;A,D,S,C,P		(4,2)	E,F,G;A,D,S,C,P	

Проверка базового расписания в имитационной модели

-  окно непогоды
-  невыполненное расписание
- A, B, обозначения платформ
- C, D... платформ

Vessel schedules	Monday	Tuesday	Wednesday	Thursday	Friday	Saturday	Sunday
	8 16 24	32 40 48	56 64 72	80 88 96	104 112 120	128 136 144	152 160 168
1	(1,1)	I,L,K,S,O,B		(1,2)	I,L,K,S,O,B		
2	(2,1)	Q,R,V		(2,2)	Q,R,V		
3		(3,1)	U,N,J,M,H		(3,2)	U,N,J,M,H	
4		(4,1)	E,F,G;A,D,S,C,P		(4,2)	E,F,G;A,D,S,C,P	

Рис. 5. Пример базового расписания движения 4-х судов снабжения, полученного на основе методов комбинаторной оптимизации, и его проверка на основе дискретно-событийного моделирования (показано влияние окна непогоды) [17]

фазовыми переменными, характеризующими состояние объекта. В случае построения сложных многоуровневых моделей объекты могут включать в себя другие составляющие более низкого уровня, которые обладают своими уникальными свойствами. Результатом прогона имитационной модели в течение конечного периода модельного времени являются конкретные интегральные параметры системы.

Коллективом сотрудников Крыловского государственного научного центра (КГНЦ), в число которых входят авторы статьи, был решен ряд научных и практических задач, связанных с моделированием морских транспортных систем с использованием агентных моделей, и создан специализированный программный комплекс, который позволяет моделировать эксплуатацию морских транспортных системы, работающих в условиях Арктики [31]. Имитационная модель создана в среде AnyLogic®. Основная имитационная модель транспортной системы (рис. 6) содержит блоки стратегического планирования перевозок (маршрутизации), которые позволяют решать логистическую задачу оптимального обхода портов, а также блоки оперативного управления движением судна, которые отвечают за выбор скорости в рейсе, разрешение возникающих инцидентов и другие локальные операции.

Движение судов происходит в вероятностных природных условиях, моделируются окна погоды работы портов, осуществляется моделирование зарастания ледового канала в припае. Наличие в расчетной модели явного описания логики работы морской транспортной системы (МТС) и целостного описания природной среды позволяет получить полный перечень экс-



Рис. 6. Пример имитационной модели морской транспортной системы и учитываемые в ней факторы

платационных показателей работы системы – таких, как динамика параметров движения, динамика изменения уровня хранилищ, простои судов по погодным условиям, длительность ожидания ледоколов и др. Все эти данные записываются в электронном журнале операций («логе») и могут дальше анализироваться. Для получения ряда статистических показателей, таких, например, как обеспеченность уровня наполнения хранилищ, используется многократный запуск имитационной модели.

В составе основной имитационной модели МТС содержатся также локальные «подмодели», которые описывают отдельные процессы. Типичным примером такой подмодели является, например, модель зарастания ледового канала в припае. Судно, проходя по каналу, влияет на его параметры, которые, в свою очередь, определяют скорость движения как этого, так и последующих судов, т.е. влияние ледового канала может быть достоверно оценено только в рамках вычислительного эксперимента со всей имитационной моделью. В зависимости от моделируемой задачи в программном комплексе могут быть реализованы другие имитационные подмодели (например, модель технологических процессов на буровой установке и т.п.).

Выполненная в КГНЦ разработка комплекса имитационного моделирования подтверждает потенциальные возможности для создания программного решения применительно к моделированию систем обеспечения шельфовой инфраструктуры. Агентное моделирование систем обеспечения позволяет исследовать аспекты работы таких систем, недоступные другим подходам, обеспечивая принципиальную возможность моделирования сложной логики работы системы. Увеличение технической сложности агентной модели на практике ограничивается только проблемами быстрогодействия и возникающими сложностями анализа больших массивов получаемых результатов. Отдельной проблемой также является интерпретируемость результатов моделирования: вследствие большого числа моделируемых факторов и процессов в некоторых случаях бывает достаточно сложно установить, какой конкретно фактор вызвал то или иное изменение интересующего интегрального параметра. Однако массовые численные эксперименты с имитационной моделью и определенный опыт позволяют после определенных аналитических усилий на практике установить все необходимые взаимосвязи факторов.

СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ ПО КЛЮЧЕВЫМ ПОКАЗАТЕЛЯМ

В таблице представлено сопоставление рассмотренных методов по ряду критериев, таких как трудоемкость разработки, учет проведения технологических операций, учет стохастических факторов и т.д. Как видно, наибольшие возможности предоставляют методы ТМО и имитационное моделирование, которые и необходимо рассматривать в качестве основных методов анализа и оптимизации количественного и качественного состава флота обеспечения на различных этапах освоения месторождения.

Таблица. Сравнительный анализ методов оценки состава флота

Параметр сопоставления	Экспертно-аналитические методы	Методы теории графов и комбинаторной оптимизации	Методы теории массового обслуживания	Имитационное моделирование
Трудоёмкость разработки и вычислительная сложность	низкая	средняя	средняя	высокая
Возможность учета технологических и аварийно-спасательных операций	да	нет	да	да
Учет различных типов грузов	нет	да	нет	да
Учет вывоза отходов с платформы	нет	да	нет	да
Учет стохастических факторов природного и техногенного характера	нет	нет	да	да
Учет окон погоды	нет	нет	да	да
Степень детализации пространственной логики движения судов	низкая	высокая	средняя	высокая
Возможность оптимизации пространственной логики движения судов	нет	да	возможно с использованием внешних решений	
Возможность оптимизации скорости хода в течение рейса	нет	да		
Возможная глубина детализации объектной модели	низкая	средняя	средняя	высокая

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Определение рациональной конфигурации флота судов обеспечения морских месторождений является нетривиальной задачей, которая может быть усложнена наличием суровых погодных условий и сложных эксплуатационных схем работы флота. Для ее решения существует несколько групп методов, основные преимущества и недостатки которых описаны в настоящей статье. Выбор конкретного метода зависит от стадии проектирования, количества имеющейся информации, квалификации исполнителей и их индивидуальных предпочтений. В отечественной практике проектирования флота судов снабжения для конкретных проектов принято использовать наиболее простые экспертно-аналитические методы, позволяющие лишь приблизительно учесть особенности работы системы. Однако более точные решения сложных задач, для которых характерно значительное влияние нестационарных факторов (например, работа флота обеспечения в условиях Арктики), можно решить только с помощью моделей, характеризующихся высокой степенью детализации описываемых процессов. Для сравнения различных вариантов флота и оптимизации его количественного и функционального состава наиболее рационально применение теории массового обслуживания совместно с методами комбинаторной

оптимизации, поскольку такой подход, позволяя решать указанные задачи, обладает средней вычислительной сложностью. Для получения наиболее точных количественных оценок параметров и наглядной визуализации процесса работы флота, состав и параметры которого фиксированы, следует использовать имитационное моделирование, которое обеспечивает наиболее полный учет комплекса различных натуральных факторов, обладая при этом высокой вычислительной сложностью.

Опыт разработки программного комплекса агентного имитационного моделирования в КГНЦ подтверждает практическую реализуемость, большие перспективы и широкие возможности имитационного подхода в области моделирования систем обеспечения шельфовой инфраструктуры арктических месторождений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *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. P. 164–179.
2. *Aneichyk T.* Simulation model for strategical fleet sizing and operational planning in offshore supply vessels operations. Molde: Molde University College, 2009.
3. *Besnard F., Fischer K., Tjernberg L.B.* A model for the optimization of the maintenance support organization for offshore wind farms // *IEEE Transactions On Sustainable Energy*. 2013. Vol. 4. No 2. P. 443–450.
4. *Fagerholt K., Lindstad H.* Optimal policies for maintaining a supply service in the Norwegian Sea // *OMEGA The International Journal of Management Science*. 2000. No 28. Iss. 3. P. 269–275.
5. Guidelines «Atlantic Canada Standby Vessel Guidelines». 05 June 2015.
6. Guidelines «Emergency Response and Rescue Vessel Management Guidelines». 01 May 2008. Iss. 4.
7. Guidelines «Guidelines for Offshore Marine Operations». 06 November 2013. № 0611-140.
8. Guidelines «NWEA guidelines for the safe management of offshore supply and rig move operations». 01 June 2009. № 2.
9. Guidelines «Operations manual for offshore service vessels Norwegian continental shelf». 15 October 2011. Revision 1.
10. *Gribkovskaia I., Norlund E., Maisiuk Y.* Routing and fleet sizing for offshore supply vessels // *Proceedings of ROUTE-2014 International Workshop on Vehicle Routing, Intermodal Transport and Related Areas*. Copenhagen, 2014.
11. International guidelines «The safe operation of dynamically positioned offshore supply vessels». 02 April 2015. Revision 2.
12. International Safety Management (ISM) Code. 01 June 2010. № 1.
13. International standard ISO 19906 «Petroleum and natural gas industries – Arctic offshore structures». 16 November 2010. N/A.
14. *Halvorsen-Weare E., Fagerholt K.* Robust supply vessel planning // *5th International Conference INOC 2011 Proceedings*. Hamburg, Germany. June 13–16, 2011. P. 559–573.

15. *Halvorsen-Weare E., Fagerholt K., Nonås L., Ashbjørnslett B.* Optimal fleet composition and periodic routing of offshore supply vessels // *European Journal of Operational Research*. 2012. Vol. 223. Iss. 2. P. 508–517.
16. *Hellum H.* Optimization of resource allocation using queueing theory. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology, 2015.
17. *Maisiuk I., Gribkovskaia I.* Fleet sizing for offshore supply vessels with stochastic sailing and service times // 2-nd International Conference on Information Technology and Quantitative Management ITQM-2014. No 31. P. 939–948.
18. *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. P. 230–240.
19. *Shyshou A., Gribkovskaia I., Laporte G. and Fagerholt K.* A large neighbourhood search heuristic for a periodic supply vessel planning problem arising in offshore oil and gas operations // *INFOR: Information Systems and Operational Research*. 2012. Vol. 50. No 4. P. 195–204.
20. Акт министерства морского флота СССР «Правила ведения работ по очистке загрязненных акваторий портов» от 31. 04. 1990. РД 31.04.01-90.
21. *Бахарев А.А., Косоротов А.В., Крестьянцев А.Б., Тонаж А.Г., Таровик О.В.* Повышение эффективности работы систем водного транспорта с помощью динамического имитационного моделирования // *Транспорт Российской Федерации*. 2015. № 4(59). С. 33–36.
22. *Гайкович А.И.* Основы теории проектирования сложных технических систем. СПб: НИЦ «МОРИНТЕХ», 2001.
23. *Зимин А.Д., Колосова Е.А., Луковников В.В., Хабарова И.В.* Математическая модель и программное обеспечение для определения технико-эксплуатационных показателей судов и ледоколов, работающих на арктической линии // *Вопросы судостроения*. 1985. № 44. С. 40–45.
24. *Кондратенко А.А.* Метод оптимизации характеристик судов обеспечения нефтегазодобывающей отрасли на ранних стадиях проектирования // *Труды RAO/CIS offshore 2015*. СПб.: Химиздат, 2015. С. 618–621.
25. *Макеев Г.А.* Разработка теоретических основ и практических методов оптимизации количественного и качественного состава флота судов обслуживания морских буровых установок: автореф. дис. канд. техн. наук. СПб., 2008.
26. *Малыханов А.А., Черненко В.Е.* Имитационное моделирование логистики снабжения арктических буровых платформ // *Труды конференции ИММОД-2015*. Т. 2. С. 210–213.
27. *Пичугин Д.А., Петров М.П., Лубенко В.Н.* Теоретическое обоснование организации работы и состава флота судов снабжения морских буровых установок на Северном Каспии // *Вестник Астраханского государственного технического университета*. 2010. №1. С. 25–29.
28. Постановление Правительства РФ «Об утверждении технического регламента о безопасности объектов морского транспорта» от 12. 08. 2010. № 620.
29. Постановление Правительства РФ «О неотложных мерах по предупреждению и ликвидации аварийных разливов нефти и нефтепродуктов» от 21 08. 2000.
30. Приказ министерства транспорта РФ «Положение об организации аварийно-спасательного обеспечения на морском транспорте» от 7. 06. 1999. № 32.
31. *Таровик О.В., Бахарев А.А., Тонаж А.Г., Косоротов А.В., Крестьянцев А.Б., Кондратенко А.А.* Имитационная модель работы флота как инструмент анализа эксплуатационных параметров судов и обоснования проектных решений // *Научно-технический сборник Российского Морского Регистра Судоходства*. 2015. № 38/39. С. 46–52.