

DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-46-56

SIMULATION OF THE WORK OF SHELF CONSTRUCTIONS WITH SHUTTLE TANKERS DURING SHIPPING OF OIL PRODUCTS IN THE FAR NORTH CONDITIONS

V. S. Kiselev

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

The algorithm and program for the model of operation of the hydrocarbon loading complex, which consists of an ice class shuttle tanker and offshore platform equipped with an oil shipping system, are considered in the paper. The model allows you to analyze the process of carrying out cargo operations, taking into account the time the vessels stood at loading, waiting for the start of cargo operations, the downtime of the platform equipment in anticipation of the tankers arrival. By means of modeling, a statistical analysis of the system operation at specified time intervals is carried out, simulation modeling is carried out with arbitrary distributions of the intervals between the arrival times of ships and their service time, with various disciplines and service parameters. It is noted that solving the practical problem of ensuring the smooth operation of ships on the line, estimating the time intervals of oil loading on the platform under conditions of unsteady traffic flow can be successfully performed by simulating the problems of planning ice pilotage of vessels in the Arctic regions. The operability of the model based on the use of tools of computing environments and digital technologies is determined by the high level of adequacy of the studied characteristics to the real process of organizing the movement of tankers according to the established schedule, taking into account the time of technological operations during oil shipment and changes in fleet composition. Modeling using object programming technologies allows you to study the various schemes of the tanker fleet composition by simulating variable and observable alternating states and make informed decisions based on quantitative estimates of the results of a machine experiment. The program and examples of evaluating the operating parameters on the model are given.

Keywords: simulation, single-line queuing system, shuttle tanker, determination of the vessel downtime, port station with one loading place, matlab.

For citation:

Kiselev, Vadim S. "Simulation of the work of shelf constructions with shuttle tankers during shipping of oil products in the far north conditions." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.1 (2020): 46–56. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-46-56.

УДК 656.073.2

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ШЕЛЬФОВЫХ СООРУЖЕНИЙ С ТАНКЕРАМИ-ЧЕЛНОКАМИ ПРИ ОТГРУЗКЕ НЕФТЕПРОДУКТОВ В УСЛОВИЯХ КРАЙНЕГО СЕВЕРА

В. С. Киселев

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

В статье рассмотрен алгоритм и приведена программа модели работы погрузочного комплекса углеводородов, состоящего из танкера-«челнока» ледового класса и морской ледостойкой платформы, оборудованной системой отгрузки нефти. Модель позволяет анализировать процесс выполнения грузовых операций с учетом времени стоянки судов под погрузкой в ожидании начала грузовых операций и времени простоя оборудования платформы в ожидании прибытия танкеров. Путем моделирования производится статистический анализ работы системы на заданных временных интервалах, осуществляется имитационное моделирование при произвольных распределениях интервалов между моментами прибытия судов и времени их обслуживания с различными дисциплинами и параметрами обслуживания. Отмечается, что решение практической задачи по обеспечению ритмичности работы судов на линии и оценке временных интервалов погрузки нефти на платформе в условиях нестационарного транспортного пото-

ка может успешно выполняться путем имитации на модели задач планирования ледовых проводок судов в арктических районах. Работоспособность модели, построенной на основе использования инструментов вычислительных сред и цифровых технологий, определяется высоким уровнем адекватности исследуемых характеристик реальному процессу организации движения танкеров по установленному графику с учетом времени выполнения технологических операций при отгрузке нефти и изменении состава флота. Моделирование с применением технологий объектного программирования позволяет исследовать различные схемы состава танкерного флота путем имитации варьируемых и наблюдаемых переменных состояния и принимать обоснованные решения на основе количественных оценок результатов машинного эксперимента. Приведены программа и примеры оценки рабочих параметров на модели.

Ключевые слова: имитационное моделирование, однолинейная система массового обслуживания, шаттл-танкер, определение времени простоя судна, портпункт с одним погрузочным местом, Matlab.

Для цитирования:

Киселев В. С. Имитационное моделирование работы шельфовых сооружений с танкерами-челноками при отгрузке нефтепродуктов в условиях Крайнего Севера / В. С. Киселев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 1. — С. 46–56. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-46-56.

Введение (Introduction)

Уникальные природные богатства Арктической зоны Российской Федерации, составляющие, по предварительным оценкам, более десятка миллиардов тонн углеводородов определили на долгие годы стратегический курс государства на социально-экономическое развитие регионов отечественной Арктики и освоение месторождений континентального шельфа.

Увеличение объемов добычи нефти, газоконденсата, природного газа, их поставка на мировой рынок играют существенную роль в обеспечении устойчивого роста экономики, создании запасов углеводородного сырья для развития всех отраслей народного хозяйства и роста благосостояния населения. Согласно «Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2020 года», важнейшей задачей освоения шельфовой зоны является развитие транспортной структуры регионов, создание условий для круглогодичного движения судов по Северному морскому пути как кратчайшему пути между портами Европы и Восточно-Азиатского региона. Специфика перевозок в Арктической зоне состоит в необходимости использования в основном судов ледового плавания с формированием составов и логистических схем, позволяющих обеспечить высокий уровень доходности работы флота. С этой целью в ближайшие годы для динамичного развития транспортной структуры и безаварийной проводки судов по Северному морскому пути планируется существенно пополнить действующий флот новыми судами арктического плавания, платформами и плавучими объектами обеспечения жизнедеятельности.

Обновление ледокольного флота, пополнение его атомными ледоколами большой мощности позволит осуществлять проводку иностранных судов с контейнерными и другими грузами по кратчайшему морскому пути из Европы в Азию, обеспечить высокую надежность и безаварийность работы с использованием развитых систем навигации, связи и управления судоходством. Решение комплексных задач развития транспортной инфраструктуры на качественно новом уровне должно основываться на глубоких научных исследованиях во всех областях хозяйственной деятельности, применении цифровых технологий и математических методов исследования операций при моделировании процессов организации перевозок, принятии научно обоснованных решений по управлению флотом и портами как единым транспортно-перегрузочным механизмом. Модельные решения с количественными оценками должны явиться надежным механизмом в выборе из рассмотренных «сценариев» наиболее приемлемого, исключить субъективные способы управления сложным транспортным процессом. Модели и алгоритмы, созданные на основе методов исследования операций, позволяют кардинально повысить аналитические возможности исследователя во всех сферах поиска оптимальных решений без существенных материальных затрат.

Управление флотом и портами при изменении ледовых и погодных условий существенно усложняется, что требует принятия адекватных мер на оперативном уровне по поддержанию

требуемых рабочих режимов комплекса. Поскольку внешние условия и информация о позиционировании судов на линии с течением времени изменяются, математическая модель становится простым и эффективным средством анализа последствий принятия оперативных решений. Потребность в моделях определяется тем, что конкретные задачи, вследствие их комбинаторной сложности и нестационарных транспортных потоков, плохо формализуются либо не поддаются аналитическому описанию в замкнутой форме. Применение количественных инструментов оптимизации с использованием моделей требуется для оценки и распределения ресурсов, формирования цепей поставок и финансовых потоков, анализа виртуальных организационных структур, а также диверсификации транспортных маршрутов поставки углеводородов на мировые рынки и др.

Важным для практики классом моделей, используемых для оценки загрузки оборудования портов и грузовых терминалов, с учетом свойств потоков прибывающих под обработку судов, являются модели массового обслуживания. Теория массового обслуживания востребована в моделях транспортной структуры регионов как средство раскрытия «феномена» ожидания, характеризующего транспортный процесс с позиций вероятности появления потребностей в сервисе при изменении характеристик обслуживаемых систем, каковыми являются продолжительность загрузки судов, время ожидания начала грузовых операций, условия образования очереди на обслуживание и др.

Специализированным портопунктом в Арктической зоне РФ может являться как грузовой район обособленной территории, имеющий оборудование для погрузочно-разгрузочных работ различной номенклатуры грузов, так и точечное шельфовое сооружение. Порожнее судно по прибытии в специализированный портопункт полностью загружается и по завершении погрузки отправляется в обратный рейс. Под портопунктом с одним погрузочным местом, к примеру, возможно принимать действующие арктические проекты, такие, например, как стационарный морской ледостойкий отгрузочный причал Варандейского месторождения. На сегодняшний день подавляющее большинство судов, используемых для перевозки экспортного грузопотока на этом месторождении, имеют тип «танкер-челнок» («шаттл-танкер») [1]–[3]. Танкер-челнок¹ был сконструирован для перевозки нефти с нефтяных платформ арктического шельфа (рис. 1).



Рис. 1. Танкер-челнок под погрузкой

Как правило, танкеры-челноки оснащены специализированной грузовой системой, которая располагается только в носовой части судна и позволяет закачивать нефть в танкеры с шельфовых объектов даже в тяжелых природных условиях и с экстремально низкими температурами [4]–[6]. Нефтяная платформа, осуществляющая добычу на шельфовых месторождениях с последующей погрузкой сырой нефти в танкеры-челноки, работающие на закрепленных линиях (такая, как морская ледостойкая стационарная платформа «Приразломная»), по сути, представляет собой «спе-

¹ Танкер «Михаил Ульянов» / «Росморречфлот».

циализированный портопункт» с ограниченным числом погрузочных мест [7], [8]. Танкер-челнок выполняет погрузку сырой нефти, образуя совместно с платформой погрузочный комплекс, в определенной мере аналогичный «портопункту с одним погрузочным местом» и группой судов, работающих на закрепленной линии [9], [10].

Целью исследования является обеспечение ритмичности работы порта и судов на линии, оценка непроизводительных потерь времени, приводящих к сокращению эксплуатационной пропускной способности системы в сравнении с режимами предельно организованного и полностью определенного транспортного процесса, при котором реальная пропускная способность близка к физически реализуемой. Реальная пропускная способность меньше физически реализуемой, которая характеризуется режимом полной организованности при отсутствии потерь. Имитационная модель позволяет исследовать механизм потерь пропускной способности конкретной транспортной системы и оценить уровень их проявления.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Имитационное моделирование является методом математического моделирования, с помощью которого решаются задачи управления плохо формализуемыми технологическими процессами в транспортных системах, в логистике, производятся оценки пропускной способности грузового фронта морских портов и др. [11]. Имитационные модели позволяют анализировать большое число альтернативных решений и экспериментировать с виртуальными системами в тех случаях, когда на реальном объекте эксперимент невозможен.

Создание виртуальной системы для имитационного моделирования, как и любой творческий процесс, требует от разработчика глубоких профессиональных знаний и умений, понимания целей моделирования, необходимости учета экзогенных переменных, наиболее чувствительных в реальной системе к параметрическим возмущениям [12]. Модель, как и объект, во всем рабочем диапазоне вариации элементов вектора входов должна обладать «фильтрующими» свойствами, обеспечивающими получение экзогенных переменных, адекватных объекту [13], [14]. Модель должна быть «прозрачной» для пользователя, иметь небольшую размерность и обладать свойствами адаптации и обучения. В моделях повышенной размерности адаптивные свойства просто реализовать с помощью систем нечеткого вывода с многомерными термами эндогенных переменных по правилам, обеспечивающим быструю сходимость решений к конечному результату.

Выбор способов отгрузки нефти на танкеры-челноки определяется технологическими возможностями и энерговооруженностью портов, портового оборудования и причалов. На практике отгрузка углеводородов производится непосредственно с платформ в открытом море. Каждый вид платформы (стационарные, плавучие нефтехранилища, добывающие и др.) снабжен соответствующими системами и устройствами для выполнения грузовых операций, что определяет специфику построения моделей функционирования комплекса, получения текущей информации и анализа с последующим принятием решения. Система с одним отгрузочным местом применена, в частности, на платформе «Приразломная», находящейся в Баренцевом море. Конструкция устройства для отгрузки нефти позволяет производить операции с учетом изменения погодных условий, течения, дрейфа льда, направления и силы ветра, приливов, отливов, температуры и др. Платформа, работающая в экстремальных климатических условиях севера, способна надежно функционировать при больших ледовых нагрузках. Транспортировка нефти с платформы осуществляется круглый год. В ледовой обстановке нефть транспортируется челночными танкерами ледового класса Л6 дедвейтом 70 тыс. т. Для отгрузки используется одно из двух имеющихся на платформе устройств. Танкеры класса «Михаил Ульянов» имеют длину 257 м, ширину 34 м и осадку 14 м.

Для погрузки нефти танкер должен безопасно приблизиться к платформе на расстояние 80 м. Затем выполняются операции швартовки и шланговки (регламентируемое время, соответственно, 35 и 30 мин) и начинается перекачка нефти в танкер, которая продолжается при каждом подходе к платформе не более 3 ч. Это объясняется изменением направления приливно-отливных течений, происходящим приблизительно через каждые 6 ч.

По приведенному описанию условий выполнения отгрузки нефти в системе, состоящей из платформы и танкер-челноков, работающих на закрепленной линии, видно, что система имеет много общего с моделью специализированного порта с одним причалом, каковым, например, является порт Важины, расположенный на реке Свирь и предназначенный для поставки гравия в Санкт-Петербург. Используя имеющийся опыт построения модели порта с одним причалом, предполагается модель, пригодная для имитации режимов работы систем «ледостойкие платформы» — танкеры-челноки в условиях Арктики.

В качестве экзогенных переменных модели принимаются два временных ряда, представленных векторами x_1 и x_2 . Вектор x_1 содержит элементы, соответствующие времени прибытия судов в порт (по аналогии с СМО — поток заявок на обслуживание). Вектор x_2 состоит из элементов продолжительности обработки судов (время обслуживания заявок). Для удобства вычислений в цикле в алгоритме используется вектор x_{1_1} , образованный из x_1 путем смещения элементов на один разряд влево. Анализ последовательности элементов векторов позволяет исследовать систему как одноканальную систему массового обслуживания с произвольными распределениями интервалов между моментами прибытия судов и их обслуживания, что возможно выполнить способами имитационного моделирования. С этой целью введем вектор W , элементами которого являются $w(i)$, где $2 \leq i \leq N$ (здесь N — количество судов в системе; $w(i)$ — время ожидания начала обработки i -го судна),

$$W = [w(1) \ w(2) \ w(3) \ \dots \ w(i) \ \dots w(N)]^T, \text{ при условии } w(1) = 0.$$

Элементы $w(2), w(3), \dots, w(i), \dots, w(N)$ вычисляются рекуррентно по формуле

$$w(i) = w(i-1) - x1_1(i-1) + x2(i-1)$$

с соблюдением логических условий: если $w(i) < 0$, то $w(i) = 0$. В иных случаях $w(i-1)$ принимается равным $w(i)$, т. е. $w(i-1) = w(i)$. По завершении цикла формируется вектор-столбец W , состоящий из элементов, больших или равных нулю. Для выполнения циклических операций удобно использовать вектор Wa , который образуется путем смещения W на один шаг с присоединением нулевого элемента:

$$Wa = [0; W].$$

Заметим, что отрицательным значениям рекуррентного соотношения:

$$pt = Wa(i) + x_2(i) - x_{1_1}(i), \quad 1 \leq i \leq N$$

соответствуют потери времени обслуживания вследствие отсутствия судов у причала.

Выполнив оценки соотношений pt в цикле с логическими условиями: если $pt(i) < 0$, то $pt(i) = -pt(i)$, но в иных случаях $pt(i) = 0$, можно сформировать из этих элементов вектор потерь времени работы причала pt вследствие ожидания прибытия судов под обработку. Далее производится оценка эндогенных переменных.

Модель представлена файлом `sah405bb.m` (среда `matlab`).

```
% sah405bb.m
% Имитационная модель порта
% Основа: файл sah405в.m
% =====
clf
clear
clc
%=====
% Исходные данные
N=20
x1=[0.0 3.6 2.0 4.4 0.8 3.3 4.7 0.5 1.9 2.4 2.4 0.4 0.8 1.2 0.4 0.9 1.3 2.9 3.6 0.8 8.0];
x1_1=[3.6 2.0 4.4 0.8 3.3 4.7 0.5 1.9 2.4 2.4 0.4 0.8 1.2 0.4 0.9 1.3 2.9 3.6 0.8 8.0];
```

```

x2=[0.5 4.3 0.4 1.1 2.5 7.0 1.0 0.8 0.7 0.5 0.7 1.7 0.5 0.4 3.7 1.7 2.5 3.2 2.8 3.1];
%=====
aa=sum(x1)
bb=sum(x2)
aaa=aa/N;
bbb=bb/N;
%pause
% Формирование векторов
j=1:N ; v=N;
x1=x1(j); x2=x2(j); x1_1(j);
W=[];
% Вычисления в циклах:
for i=2:v
w(1)=0;
w(i)=w(i-1)-x1_1(i-1)+x2(i-1);
if w(i)<0
w(i)=0;
else
w(i-1)=w(i);
end
W=[W;w(i)];
end
Wa=[0;W]
% Общее время простоя «причала»
Pt=[];
for i=1:v
pt=Wa(i)+x2(i)-x1_1(i);
if pt<0
pt=-pt;
else
pt=0;
end
Pt=[Pt;pt];
end
Pt; Pst=sum(Pt);
%=====
% 1. Вектор времени простоя причала в ожидании судов
Pt
% 2. Суммарное время простоя причала в ожидании судов
Tпрост=sum(Pt)
% 3. Среднее время ожидания в очереди обработки судна
St=sum(Wa);
Tср=St/N
% 4. Коэффициент простоя причала
E=Tпрост/aa
% 5. Вектор времени нахождения судов в порту
WaSa=Wa+x2';
Tsys=WaSa
% 6. Сумма времени нахождения судов в порту (обработка, ожидание)
Sa=sum(WaSa);
    
```

$TT = \text{sum}(Sa)$

% 7. Среднее время нахождения судна в порту

$Tc = TT/N$

% =====

% Графические построения

subplot(2,2,1)

stairs(x1_1,'LineWidth',2),grid

xlabel('Прибывающие суда')

ylabel('Интервалы времени,ч.')

hold on

subplot(2,2,2)

stairs(Wa,'LineWidth',2),grid

xlabel('Прибывшие суда')

ylabel('Ожидание в очереди,ч.')

subplot(2,2,3)

stairs(x2,'LineWidth',2),grid

xlabel('Прибывающие суда')

ylabel('Время обработки,ч.')

subplot(2,2,4)

stairs(Pt,'LineWidth',2),grid

xlabel('Суда')

ylabel('Простои причала,ч.')

% =====

% Оценка вероятностей и времени T_i нахождения в порту i судов, с применением

% распределения Пуассона.

$p0 = Pst/aa;$

$s = 1/p0;$

$v = \log(s);$

$lam = v;$

$\% \exp(v);$

$p1 = \exp(-lam) * (lam)/1$

$p2 = \exp(-lam) * (lam^2)/\text{factorial}(2)$

$p3 = \exp(-lam) * (lam^3)/\text{factorial}(3)$

$p = [p0 \ p1 \ p2 \ p3];$

$Pp = \text{sum}(p);$

% Оценка времени T_i ($i=0,1,2,3$)

$T = aa; \ Pp1 = Pp - p0;$

$T0 = p0 * T;$

$T1 = p1 / Pp1 * (T - T0);$

$T2 = p2 / Pp1 * (T - T0);$

$T3 = p3 / Pp1 * (T - T0);$

$Tv = [T0 \ T1 \ T2 \ T3]$

$TT = \text{sum}(Tv)$

% Проверка условия равенства TT и aa :

$[TT \ aa]$

% Вычисление средних значений

$Pn = p0;$

$Ncp = 1 * p1 + 2 * p2 + 3 * p3$

$NUcp = Pn + 2 * Pn$

$Ro = Pn$

Обсуждения (Discussion)

В файле приведены численные значения (экзогенные переменные) векторов x_1 и x_2 . Вектор x_1 содержит элементы, соответствующие времени прибытия судов в порт. Согласно исходным данным, приведенным в файле `sah405bb.m`, первый элемент вектора x_1 принимается равным нулю и означает момент прибытия первого судна. Второй элемент содержит число, равное 3,6 ч, соответствующее времени прибытия второго судна после первого. Третий элемент, равный 2,0, означает, что третье судно приходит в порт после второго через 2 ч. Аналогично заполняются последующие элементы.

Вектор x_2 содержит числа, соответствующие времени обработки каждого прибывающего в порт судна. В приведенном примере эти значения приняты равными для первого судна 0,5, для второго — 4,3, третьего — 0,4 ч и т. д. Вектора x_1 и x_2 образуют массив, из которого для моделирования могут выбираться данные для N судов. В файле $N = 20$. Суда обрабатываются в порядке прибытия.

Эндогенными переменными являются:

- вектор времени простоя причала в ожидании судов — P_i ;
- суммарное время простоя причала в ожидании судов — $T_{\text{прост}}$;
- среднее время ожидания в очереди обработки судна — T_{cp} ;
- коэффициент простоя причала — E ;
- вектор времени нахождения судов в порту — T_{sys} ;
- сумма времени нахождения судов в порту (обработка, ожидание) — TT ;
- среднее время нахождения судна в порту — T_c .

С помощью файла можно получить любую информацию, связанную с мониторингом вычислительного процесса. Комментарии к вычислениям, приведенные в файле, содержат всю необходимую информацию для практического применения модели.

Моделирование завершается графическими построениями. На рис. 2 представлены графики, соответствующие моделированию системы для численных значений векторов x_1 и x_2 , приведенных в файле.

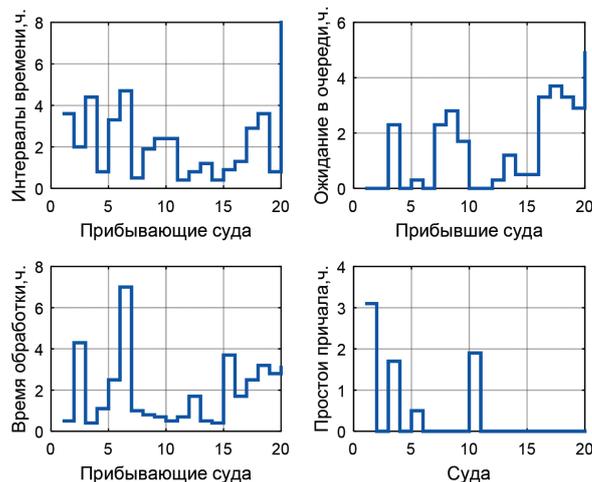


Рис. 2. Имитационное моделирование работы порта с одним причалом

Кумулятивные эндогенные переменные численно равны:

$$T_{\text{прост}} = 7,2 \text{ ч}; \quad T_{\text{cp}} = 1,5 \text{ ч}; \quad E = 0,1555; \quad TT = 69,1 \text{ ч}; \quad T_c = 3,455 \text{ ч}.$$

Исходя из предположения, что поток прибывающих судов распределен по закону Пуассона, можно оценить полное время T_j , в течение которого в системе находятся $j = 0, 1, 2, 3$ судов. Вероятности оценки T_j представлены элементами вектора p при $\lambda = 1,8611$:

$$P = [p_0 \ p_1 \ p_2 \ p_3] = [0.1555 \ 0.2894 \ 0.2693 \ 0.1671].$$

Согласно выполненным расчетам, вероятностям соответствуют значения времени:

$$T_v = [T_1 \ T_2 \ T_3 \ T_4] = [7.2000 \ 15.5914 \ 14.5083 \ 9.0003] \text{ ч.}$$

Для имитационного моделирования отгрузки нефти с платформы «Приразломная» необходимо учесть следующее [10]. Нефть транспортируется челночными танкерами дедеветом 70000 т. Для перекачки нефти к носовому погрузочному устройству танкера от платформы подключается шланг, по которому перекачивается нефть с расходом 10000 м³/ч. Специфика работы танкера состоит в том, что требуется учитывать течения и глубины в период приливов и отливов, повторяющихся ежедневно с шестичасовой периодичностью изменения направлений течения в северо-западном и юго-восточном направлениях. Для обеспечения безопасной погрузки и исключения возможности навалов на платформу, двигаясь против течения, танкер (длина 257 м, ширина 34 м и осадка 14 м) должен приблизиться к платформе на безопасное расстояние, составляющее менее 80 м, выполнить операции швартовки и «шланговки». Затем при удержании носовой части судна в безопасной зоне допустимых отклонений, с использованием судовой системы динамического позиционирования, выполнить погрузку. Время на перекачку нефти, с учетом приливных течений, составляет из шестичасового цикла не более четырех часов. С целью обеспечения безопасности технологического процесса с началом изменения направления течения танкер отходит от платформы на безопасное расстояние. Время швартовки составляет около 35 мин, время подачи и присоединения шланга — около 30 мин. Приблизительно такой же промежуток времени требуется для завершения грузовых операций и подготовки танкера к отходу от платформы.

При формировании векторов x_1 и x_2 для имитационного моделирования работы платформы с танкерами воспользуемся приведенными ранее данными. За начало отсчета примем время минимального уровня, определяемого по графикам сизигийского прилива в пункте Териберская губа (Баренцево море), где движение воды адекватно точке позиционирования платформы «Приразломная». Для определенности к составу двух «челноков» добавим два судна класса «Усинск» дедеветом 19800 т.

Определим последовательность прибытия судов под погрузку:

$$x_1 = [0 \ 3.8 \ 2.7 \ 3.5 \ 2.5 \ 2.7 \ 2.8 \ 3.5 \ 2.5 \ 3.8];$$

$$x_2 = [3.5 \ 2 \ 3.7 \ 2.2 \ 3.6 \ 2.1 \ 3.8 \ 2 \ 3.8 \ 2.1].$$

Внесем в раздел файла «Исходные данные» вектора x_1 , x_2 и установим $N = 10$, предварительно очистив его от других числовых массивов. Выполним моделирование, получим:

$$T_{\text{прост}} = 1,6 \text{ ч}, \quad T_{\text{ср}} = 0.18 \text{ ч}, \quad E = 0.0576, \quad TT = 30,6 \text{ ч}, \quad T_c = 3,06 \text{ ч.}$$

Графические результаты представлены на рис. 3.

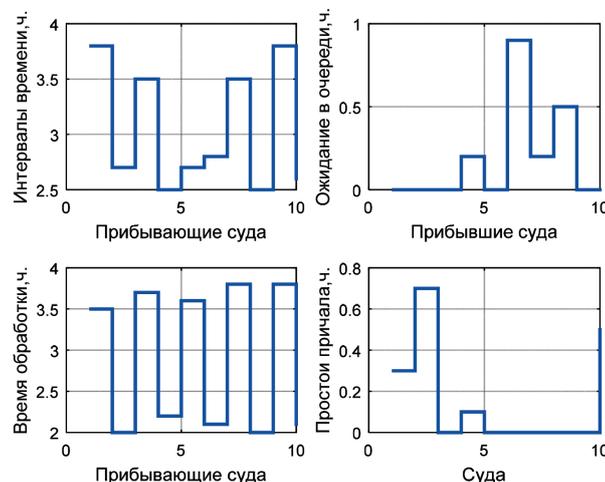


Рис. 3. Имитационное моделирование отгрузки нефти с платформы «Приразломная» с учетом течений во время приливов и отливов

Выводы (Summary)

1. Представленная имитационная модель может применяться для моделирования и оценки процесса погрузки нефти в танкеры с платформ, находящихся в открытом море.
2. Работоспособная модель предназначена для оценки суммарного времени нахождения судов под погрузкой, определения времени простоя причала в ожидании прибытия судов под обработку и других параметров.
3. Применение имитационного моделирования позволяет оперативно решать задачи совершенствования транспортных процессов, формулировать обоснованные выводы и выполнять действия по снижению производственных потерь, формированию различных вариантов составов судов с получением количественных оценок при выборе оптимального решения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Nam B. W.* Time-domain simulation of berthing problem between FPSO and shuttle tanker in waves / B. W. Nam, Y. Kim, S. Y. Hong // *Applied Ocean Research*. — 2016. — Vol. 58. — Pp. 49–61. DOI: 10.1016/j.apor.2016.03.010.
2. *Tannuri E. A.* FPSO and Monobuoy Offloading Operation with a Conventional Shuttle Tanker: Dimensioning of Tugboat Based on Numerical Simulation / E. A. Tannuri, F. G. Torres, H. Igreja, I. Q. Masetti // *IFAC Proceedings Volumes*. — 2009. — Vol. 42. — Is. 18. — Pp. 134–139. DOI: 10.3182/20090916-3-BR-3001.0031.
3. *Tannuri E. A.* Numerical and experimental analysis of a typical DP shuttle tanker operating in Brazilian waters / E. A. Tannuri, H. M. Morishita, R. Vilaça, A. C. Saad // *IFAC Proceedings Volumes*. — 2010. — Vol. 43. — Is. 20. — Pp. 324–329. DOI: 10.3182/20100915-3-DE-3008.00049.
4. *Pessoa J.* Side-by-side FLNG and shuttle tanker linear and second order low frequency wave induced dynamics / J. Pessoa, N. Fonseca, C. G. Soares // *Ocean Engineering*. — 2016. — Vol. 111. — Pp. 234–253. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2015.10.051.
5. *Queiroz Filho A. N.* A shuttle tanker position cooperative control applied to oil transfer operations based on the LQG/LTR method / A. N. Queiroz Filho, E. A. Tannuri, J. J. da Cruz // *IFAC Proceedings Volumes*. — 2012. — Vol. 45. — Is. 27. — Pp. 67–72. DOI: 10.3182/20120919-3-IT-2046.00012.
6. *Tannuri E. A.* Offloading Operation with a Dp Shuttle Tanker: Comparison between Full Scale Measurements and Numerical Simulation Results / E. A. Tannuri, A. C. Saad, H. M. Morishita // *IFAC Proceedings Volumes*. — 2009. — Vol. 42. — Is. 18. — Pp. 249–254. DOI: 10.3182/20090916-3-BR-3001.0021.
7. *Ronalds B. F.* Applicability ranges for offshore oil and gas production facilities / B.F. Ronalds // *Marine structures*. — 2005. — Vol. 18. — Is. 3. — Pp. 251–263. DOI: 10.1016/j.marstruc.2005.06.001.
8. *Kerkhove L. P.* Optimised scheduling for weather sensitive offshore construction projects / L. P. Kerkhove, M. Vanhoucke // *Omega*. — 2017. — Vol. 66. — Pp. 58–78. DOI: 10.1016/j.omega.2016.01.011.
9. *Зайкин Д. А.* Использование имитационного моделирования для анализа морской транспортно-технологической системы платформы «Приразломная» / Д. А. Зайкин, А. Б. Крестьянцев, О. В. Таровик, А. Г. Топаж // *Транспорт Российской Федерации*. — 2017. — № 1 (68). — С. 44–48.
10. *Зайкин Д. А.* Моделирование возможности проведения грузовых операций на платформе «Приразломная» по погодным условиям / Д. А. Зайкин, А. Г. Топаж, А. В. Косортов // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2018. — Т. 10. — № 1. — С. 62–77. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-62-77.
11. *Кузнецов А. Л.* Моделирование работы морского грузового фронта / А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, Д. А. Зайкин // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2019. — Т. 11. — № 1. — С. 33–42. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-33-42.
12. *Киселев В. С.* Анализ судозахода, как объекта транспортно-логистической системы Арктической зоны Российской Федерации / В. С. Киселев // *Транспортное дело России*. — 2019. — №2. — С. 229–233.
13. *Silberholz M. B.* Using simulation to study the impact of work rules on productivity at marine container terminals / M. B. Silberholz, B. L. Golden, E. K. Baker // *Computers & Operations Research*. — 1991. — Vol. 18. — Is. 5. — Pp. 433–452. DOI: 10.1016/0305-0548(91)90020-R.
14. *Özkan E. D.* Capacity analysis of RO-RO terminals by using simulation modeling method / E. D. Özkan, S. Nas, N. Güler // *The Asian Journal of Shipping and Logistics*. — 2016. — Vol. 32. — Is. 3. — Pp. 139–147. DOI: 10.1016/j.ajsl.2016.09.002.

REFERENCES

1. Nam, B. W., Y. Kim, and S. Y. Hong. "Time-domain simulation of berthing problem between FPSO and shuttle tanker in waves." *Applied Ocean Research* 58 (2016): 49–61. DOI: 10.1016/j.apor.2016.03.010.
2. Tannuri, Eduardo A., Fernando G.S. Torres, Haroldo Igreja, and Isaías Q. Masetti. "FPSO and Monobuoy Offloading Operation with a Conventional Shuttle Tanker: Dimensioning of Tugboat Based on Numerical Simulation." *IFAC Proceedings Volumes* 42.18 (2009): 134–139. DOI: 10.3182/20090916-3-BR-3001.0031.
3. Tannuri, Eduardo A., Helio M. Morishita, Rodrigo Vilaça, and Arthur C. Saad. "Numerical and experimental analysis of a typical DP shuttle tanker operating in Brazilian waters." *IFAC Proceedings Volumes* 43.20 (2010): 324–329. DOI: 10.3182/20100915-3-DE-3008.00049.
4. Pessoa, João, Nuno Fonseca, and C. Guedes Soares. "Side-by-side FLNG and shuttle tanker linear and second order low frequency wave induced dynamics." *Ocean Engineering* 111 (2016): 234–253. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2015.10.051.
5. Queiroz Filho, Asdrubal N., Eduardo A. Tannuri, and José J. da Cruz. "A shuttle tanker position cooperative control applied to oil transfer operations based on the LQG/LTR method." *IFAC Proceedings Volumes* 45.27 (2012): 67–72. DOI: 10.3182/20120919-3-IT-2046.00012.
6. Tannuri, Eduardo A., Arthur C. Saad, and Hélio Mitio Morishita. "Offloading Operation with a Dp Shuttle Tanker: Comparison between Full Scale Measurements and Numerical Simulation Results." *IFAC Proceedings Volumes* 42.18 (2009): 249–254. DOI: 10.3182/20090916-3-BR-3001.0021.
7. Ronalds, Beverley F. "Applicability ranges for offshore oil and gas production facilities." *Marine structures* 18.3 (2005): 251–263. DOI: 10.1016/j.marstruc.2005.06.001.
8. Kerkhove, L-P., and Mario Vanhoucke. "Optimised scheduling for weather sensitive offshore construction projects." *Omega* 66 (2017): 58–78. DOI: 10.1016/j.omega.2016.01.011.
9. Zaykin, D.A., A.B. Krestyantsev, O.V. Tarovik, and A.G. Topazh. "Application of simulation modelling for analysis of maritime transport and technology system of the Prirazlomnaya platform." *Transport business of Russia* 1(68) (2017): 44–48.
10. Zaykin, Dmitry A., Aleksandr G. Topaj, and Andrey V. Kosorotov. "Modeling of cargo operation ability on Prirazlomnaya platform according to the weather conditions." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.1 (2018): 62–77. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-62-77.
11. Kuznetsov, Aleksandr L., Aleksandr V. Kirichenko, and Dmitrii A. Zaikin. "Simulation of the sea cargo front operation." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.1 (2019): 33–42. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-33-42.
12. Kiselev, V. "Analysis of vessel call as an object of the transport and logistics system of the arctic zone Russian Federation." *Transport business of Russia* 2 (2019): 229–233.
13. Silberholz, Michael B., Bruce L. Golden, and Edward K. Baker. "Using simulation to study the impact of work rules on productivity at marine container terminals." *Computers & Operations Research* 18.5 (1991): 433–452. DOI: 10.1016/0305-0548(91)90020-R
14. Özkan, Emin Deniz, Selçuk Nas, and Nil Güler. "Capacity analysis of RO-RO terminals by using simulation modeling method." *The Asian Journal of Shipping and Logistics* 32.3 (2016): 139–147. DOI: 10.1016/j.ajsl.2016.09.002

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Киселев Вадим Сергеевич —
Инженер. Исследователь. Соискатель.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: vadim.s.kiselev@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Kiselev, Vadim S. —
Engineer. Researcher. Applicant.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: vadim.s.kiselev@gmail.com

Статья поступила в редакцию 6 ноября 2019 г.
Received: November 6, 2019.