

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ

УДК 519.87 (51-7)

<https://doi.org/10.37220/MIT.2021.52.2.027>

Имитационное моделирование эксплуатации морских транспортных средств с учетом ветро-волнового режима

А.А. Карпенко¹, e-mail: st071979@student.spbu.ru¹Санкт-Петербургский государственный университет

Аннотация Эксплуатация морского транспорта подвержена влиянию множества факторов, учет которого требует высокой трудоемкости. Как правило, моделирование морских транспортных систем, выступающих в роли связующего звена различных экономических процессов, производится на стадии предпроектной разработки. На этой стадии, помимо прочего, необходимо оценить влияние на проектируемую систему не только детерминированных, но и стохастических процессов. В данной работе описан алгоритм учета влияния ветро-волновых режимов морских участков на эксплуатацию морских транспортных судов. Данный алгоритм реализован на примере модели системы поставок сжиженного природного газа (СПГ) морским транспортом потребителям г. Мурманск.

Научной новизной данной работы является комплексный подход к логико-математическому описанию эксплуатации морских транспортных средств. Этот подход включает в себя моделирование эксплуатации судна на базе агентного подхода, моделирование ветро-волновых режимов на основе анализа временных рядов и стохастических экспериментов и определение скорости движения судна на основе эмпирико-статистических формул расчета скорости судна и теории гидродинамики судна. В ходе выполнения данной работы была построена имитационная модель поставок СПГ в г. Мурманск морским транспортом. Результаты прогонов этой модели были верифицированы на основе технико-экономического обоснования АО «ЦНИИМФ». Алгоритм построения имитационной модели, описанный в данной работе, может быть применен для имитационного моделирования морских транспортных систем с различными целями функционирования.

Ключевые слова: Имитационное моделирование, AnyLogic, анализ временных рядов, R, морской транспорт, гидродинамика судна.

Simulation of marine vehicles operation in the state of wind and wave conditions

Alexander A. Karpenko¹, e-mail: st071979@student.spbu.ru¹St. Petersburg State University, Russian Federation

Abstract. Marine transport operation is affected by a lot of factors taking into account of which requires a high laboriousness. In most cases modelling of marine transport operation as a link in various economic processes is performed at the pre-design development stage. By the way, evaluation of the impact of both deterministic and stochastic processes on the designed system is necessary at this stage. Evaluation of transport system efficiency based on pre-formed system of criteria is in progress at this stage. This paper describes an algorithm for modeling the operation of marine vessels taking into account wind-wave regime of sea areas. This algorithm is implemented by the model of liquified natural gas (LNG) supply chain system by marine transport to consumers of the city of Murmansk.

Scientific novelty of this paper is a complex approach to logical-mathematical description of marine vehicles exploitation. This approach consists of agent-based simulation of vessel exploitation, modelling of wind-wave regimes by means of time series analysis and stochastic modelling and the speed determination of the vessel movement based on the empirical-statistical formulas for calculating the speed of the vessel and the theory of vessel hydrodynamics. During this research simulation model LNG supply chain system by marine transport to consumers of the city of Murmansk was developed. The results of the model have been verified by the feasibility study performed by CNIIMF JSC. The algorithm for constructing simulation model described in this paper could be implemented in modelling of marine transport system for various purposes.

Key words: Simulation, AnyLogic, timeseries analysis, R, marine transport, ship hydrodynamics.

Введение

Эксплуатация морских транспортных судов сопряжена с высокими затратами, величина которых в значительной степени зависит от продолжительности и структуры времени рейса. На величину эксплуатационных затрат морского судна оказывают влияния различные внутренние и внешние факторы, учет которых с помощью аналитического моделирования является задачей с низкой гибкостью реализации относительно вариации исходных данных проекта. В таких ситуациях применение средств имитационного моделирования позволяет построить логико-математическую компьютерную модель

исследуемого объекта, позволяющую в ходе экспериментов над ней получить необходимую исследователю информацию о возможностях по снижению затрат на реализацию рассматриваемого проекта.

Особенно актуальным является применение средств имитационного моделирования в исследовании комплексной транспортной системы со множеством уровней вариативности: вариативность маршрута транспортных средств, вариативность типоразмера самих транспортных средств, вариативность расположения пунктов отправления и пунктов назначения, а также их количества, вариативность вида перевозимого груза. А также с факторами, имеющими стохастическую природу:

изменчивость гидрометеорологических условий навигации, длительность задержек при осуществлении портовых операций (длительность нахождения в очереди из-за конфигурации портовых слухб как системы массового обслуживания) и т.д.

В данной работе акцентировано внимание на моделировании ветро-волновых режимов районов эксплуатации морских транспортных средств, а также на расчете приращения скорости судов, вызываемого ветро-волновыми режимами соответствующих морских участков эксплуатации.

Стоит отметить, что термины «морской участок» (при описании эксплуатации морских транспортных средств) и «район моря» (при районировании морей в океанографии) в настоящей работе являются взаимозаменяемыми. В дальнейшем при обсуждении эксплуатации морских транспортных судов будет использоваться термин «морской участок».

1. Краткое описание исследуемых объектов

Задачей реализуемого проекта является выбор оптимальных значений параметров транспортной системы поставок на проектируемый терминал для приема, хранения и регазификации сжиженного природного газа (СПГ) в Мурманской области. Такими параметрами являются маршрут транспортировки, типоразмер судна и вместимость хранилища СПГ для каждого из двух вариантов потребления. Критерием оптимизации является минимум совокупных затрат на реализацию данного проекта. Оптимизация проводится для каждого из двух вариантов потребления СПГ: потребление только котельными ПАО «Мурманская ТЭЦ» и потребление котельными ПАО «Мурманская ТЭЦ» и иными (перспективными) потребителями г. Мурманск и Мурманской области.

К проекту транспортной системы газоснабжения предъявлены следующие требования:

- обеспечивать необходимый объем потребления газа, меняющийся ежемесячно – дефицит газа при снабжении рассматриваемых потребителей г. Мурманск считается недопустимым;

- учитывать различие между двумя вариантами потребления СПГ;

- соблюдать неснижаемый запас СПГ в хранилище, уровень которого зависит от максимального суточного объема потребления, а также от вместимости хранилища – данное требование обеспечивает поддержание СПГ в хранилище в захлаженном состоянии (при температуре $-160,4^{\circ}\text{C}$);

- доставка СПГ в г. Мурманск газовозами должна осуществляться по мере необходимости, но не реже, чем 1 раз в месяц – при длительном хранении СПГ в хранилище (более 1 месяца) происходит изменение физико-химических свойств СПГ, в связи с чем необходимо добавлять новый газ для «обновления» СПГ.

Подробнее о моделировании рассматриваемой системы поставок изложено автором в его работах [9], [10].

Маршрут транспортировки характеризуется расположением пунктов отправления (порт Выборг или Высоцк, порт Усть-Луга, СПГ-терминал на о. Кильдин или в Ура-Губе) и назначения (г. Мурманск). Маршруты следования газовозов проходят по

Балтийскому, Северному, Норвежскому и Баренцеву морям. Следовательно, в качестве факторов, влияющих на эксплуатацию морских судов, рассматриваются ветро-волновые режимы районов вышеуказанных морей: Балтийское море (7 районов), Северное море (3 района), Норвежское море (2 района) и Баренцево море (4 района) [15], [16]. Каждый из рассматриваемых районов морей имеет уникальный ветро-волновой режим.

К рассматриваемой системе поставок предъявляются обязательные к исполнению требования о недопустимости дефицита поставляемого СПГ. С другой стороны, достижение целевого (минимального) значения совокупных затрат на реализацию данного проекта подразумевает минимизацию суммы операционных (связанных с эксплуатацией судов) и капитальных (связанных с постройкой судов) затрат проекта. В связи с этим одним из главных результатов моделирования данной системы является расписание поставок, при котором выполняются следующие условия:

- транспортные суда выходят в рейс в такие моменты времени, чтобы после их прибытия в пункт назначения и разгрузки СПГ в хранилище было не менее неснижаемого уровня запаса СПГ;

- пополнение СПГ в хранилище в пункте назначения производится не реже 1 раза в месяц;

- достижение наибольшей загрузки судна, в т.ч. путем сокращения порожних (без груза) пробегов.

Однако соблюдение расписания рейсов морских транспортных судов подвержено существенному влиянию со стороны гидрометеорологических условий навигации, которое следует учитывать.

2. Постановка задачи

Наравне с построением глобальных волновых моделей в области геофизической гидродинамики, основанных на спектральном представлении волнового поля [12], в исследовательской деятельности имеет место исследование временных рядов гидрометеорологических параметров и построение моделей временных рядов [21], [22]. В совокупности с физической сущностью каждого из природных явлений построенные модели могут иметь высокую надежность и состоятельные оценки коэффициентов в модели. Основными физическими явлениями, рассматриваемыми в данной работе, являются глобальная циркуляция вод мирового океана и глобальная циркуляция атмосферы [13]. Помимо данных явлений также рассматривается воздействие движения воздушных масс на движение поверхностного слоя воды [5].

Учет влияния ветро-волнового режима на приращение скорости судна осуществляется с применением эмпирико-статистических моделей и моделей воздействия гидродинамических сил на судно при поступательном движении. Исходными данными для этих моделей, помимо характеристик судов, являются: направление и скорость ветра, высота и курсовой угол бега ветровых волн, численные значения воздушного сопротивления соответствующего угла ветра и полного сопротивления воды подводной части судна.

Таким образом, первой задачей имитационного моделирования эксплуатации морских судов является создание модуля генерации

гидрометеорологических условий навигации в виде моделей временных рядов направления и скорости ветра, скорости, высоты и направления бега ветровых волн. Дискретность моделей определяется дискретностью доступных для анализа статистических данных исследовательской системы островов Тихого океана университета Гавайи за 2016-2020 гг. [6], [7].

Стоит отметить, что в настоящем исследовании влиянием зыби на эксплуатацию морских транспортных судов пренебрегается.

Второй задачей имитационного моделирования эксплуатации морских транспортных судов является построение логико-математического описания процесса эксплуатации, включающего в себя модуль расчета скорости движения судна. Данный модуль в каждый момент времени должен учитывать:

- местонахождение, технические и эксплуатационные характеристики судна;
- гидрометеорологические условия навигации морского участка, в котором судно находится.

Данный модуль реализован с применением средств агентного имитационного моделирования в среде имитационного моделирования AnyLogic.

Третьей задачей имитационного моделирования эксплуатации морских транспортных судов является обеспечение взаимодействия между модулем генерации гидрометеорологических условий навигации и модулем расчета скорости движения судна.

3. Построение модуля генерации гидрометеорологических условий навигации

3.1. Моделирование векторной скорости ветра

Для учета физической сущности исследуемых природных явлений (а именно - временной и пространственной корреляции) строится карта с векторами гипотетических перемещений воздушных масс (рис. 1).

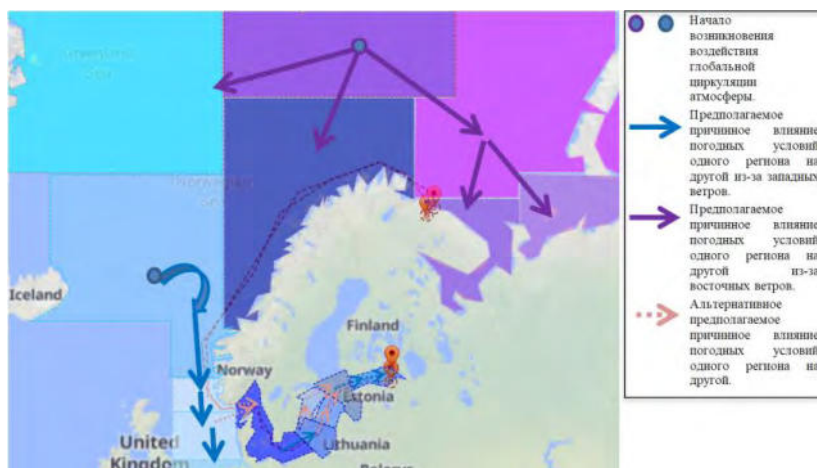


Рис.1. Районирование морских участков и распределение векторов гипотетических перемещений воздушных масс

На рисунке продемонстрированы векторы гипотетического перемещения воздушных масс между соседними морскими участками на основе западных ветров (голубой цвет векторов) и восточных ветров (сиреневые вектора). Наравне со всеми векторами, однозначно отражающими воздействие гидрометеорологических условий между соседними морскими участками, имеются вектора (темно-оранжевого цвета), отражающие воздействия, направления которых необходимо проверить с помощью специализированных статистических тестов (например, тест на причинность по Грейнджеру [20]).

Построение моделей временных рядов направления и скорости ветра осуществляется по следующему алгоритму:

- определение морских участков, по территории которых проходит непосредственное воздействие глобальной циркуляции атмосферы (ключевых участков) – такими участками были выбраны первый регион Норвежского моря (перемещение западных ветров со стороны экватора) и четвертый регион Баренцева моря (перемещение восточных ветров в Северном полушарии);
- определение для каждого из морских участков центра участка;

- построение многомерного временного ряда векторной скорости ветра вместо направления и абсолютной скорости – с целью соблюдения первичных условий стационарности [8];

- приведение многомерного временного ряда к стационарному и коинтегрированному виду.

Далее, алгоритм разделяется на работу с ключевыми морскими участками и морскими участками, смежными с ключевыми. Так, для моделирования временных рядов векторной скорости ветра для ключевых морских участков осуществляются:

- выбор оптимальной модели временного ряда (VARMA(p,q) или SVARMA(p,q)(P,Q)[L]) с точки зрения минимума значения Байесовского информационного критерия (или критерия Шварца) (BIC или SBIC) [25] или Акаике (AIC) [19] –проводится на языке программирования R (в качестве среды разработки выбрана среда RStudio);
- верификация построенной модели путем проверки остатков на стационарность (проверки по столбцам, проверки всего многомерного временного ряда с использованием статистики Льюинга-Бокса [24]).

Для моделирования многомерных временных рядов векторной скорости ветра в морских участках,

смежных с ключевыми, осуществляется выбор оптимальной модели временного ряда (VARX(p,m)) и ее верификация – аналогично предыдущему.

Построенные модели временных рядов для гидрометеорологических параметров ключевых морских участков используются вместе с эмпирическими законами распределения с целью учета в моделировании стохастики исследуемых параметров. Эмпирический закон распределения для каждого ключевого морского участка по каждой проекции скорости ветра представляет собой матрицу, в которой по столбцам указаны месяцы, а по строкам – интервалы значений проекции скорости ветра. Эмпирические законы распределения построены по гистограмме частот обучающих

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix}_t = \begin{pmatrix} A_0 \\ A_1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{pmatrix}_1 \begin{pmatrix} \tilde{u} \\ \tilde{v} \end{pmatrix}_t + \sum_{i=2}^p \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{pmatrix}_i * \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix}_{t-i} + \sum_{j=1}^q \begin{pmatrix} B_{11} & B_{12} \\ B_{21} & B_{22} \end{pmatrix}_j \begin{pmatrix} e_u \\ e_v \end{pmatrix}_{t-j} \quad (1)$$

где: $\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix}_t$ – вычисляемые значения проекций скорости ветра в момент времени t , $\begin{pmatrix} A_0 \\ A_1 \end{pmatrix}$ – свободный член модели временного ряда, $\begin{pmatrix} \tilde{u} \\ \tilde{v} \end{pmatrix}_t$ – сгенерированные по эмпирическому распределению значения проекций скорости ветра в момент времени t , $\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix}_{t-i}$ – исторические значения проекций скорости ветра в момент времени $t-i$, $\begin{pmatrix} e_u \\ e_v \end{pmatrix}_{t-j}$ – остатки проекций скорости ветра от авторегрессионной составляющей в момент времени $t-i$, $\begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{pmatrix}_i$ – матрица коэффициентов модели для авторегрессионной части на лаге i , $\begin{pmatrix} B_{11} & B_{12} \\ B_{21} & B_{22} \end{pmatrix}_j$ – матрица коэффициентов модели для части остатков (скользящей средней) модели на лаге j .

Построенные модели временных рядов используются для генерации векторных скоростей ветра по каждому из рассматриваемых морских участков и пересчета их в направление ветра и абсолютную скорость ветра для дальнейших расчетов.

3.2. Моделирование векторной скорости ветровых волн

Гипотезы по распределению направления ветровых волн аналогичны гипотезам перемещения воздушных масс, т.к. эмпирически установлено, что направление бега ветровых волн не отличается от направления ветра более чем на 45 градусов [15], [16].

Исследование динамики параметров ветровых волн также должно быть сфокусировано на многомерном временном ряду векторной скорости бега ветровых волн вместо временных рядов направления и абсолютной скорости бега. В связи с этим имеющиеся данные о направлении бега ветровых волн преобразуются по следующему алгоритму:

- рассчитывается абсолютная скорость ветра (W) для регионов, по которым имеется информация о динамике ветровых волн;

- рассчитывается коэффициент крутизны волны (ε) по формуле (2), длина разгона волны (D) по формуле (3) и длина волны (L) по формуле (4) [4]:

$$\varepsilon = \frac{1}{0.9\sqrt{100+W^2}} \quad (2)$$

$$D = 30W^2\varepsilon \quad (3)$$

$$L = 0.073 * W * \sqrt{\frac{D}{\varepsilon}} \quad (4)$$

- в случае отсутствия временных рядов абсолютной скорости бега ветровых волн используются модельные значения (v)(5):

выборки. В среде AnyLogic эмпирические законы распределения представлены в виде табличных функций, которые заполняются при инициализации модели.

Таким образом, генерация значений проекций скоростей ветра для ключевых морских участков происходит в следующем порядке:

- генерация значений проекций скоростей по эмпирическим законам распределения;

- вычисление значений проекций скоростей ветра по модели временного ряда вида VARMA(p,q) (p – порядок авторегрессионного лага, q – порядок лага скользящей средней), используя сгенерированные и исторические значения (1):

$$v = 1.25\sqrt{L} \quad (5)$$

- преобразование абсолютной скорости и направления бега ветровых волн (φ) в векторную скорость бега ветровых волн – на широтную (v_x) и долготную (v_y) оси (6). Стоит отметить, что полученные направления бега волн измеряются в румбовых углах [23], в связи с чем в уравнении проекций синус и косинус меняются местами:

$$v_x = -v \cdot \sin\left(\frac{\varphi\pi}{180}\right), v_y = -v \cdot \cos\left(\frac{\varphi\pi}{180}\right) \quad (6)$$

Дальнейший порядок проведения анализа временных рядов векторной скорости бега ветровых волн совпадает с порядком проведения анализа временных рядов векторной скорости ветра: построение и выбор оптимальной модели временного ряда и ее верификация.

Построенные модели временных рядов векторной скорости бега ветровых волн также используются для их генерации по каждому из рассматриваемых морских участков. Сгенерированные векторные скорости пересчитываются обратно в высоту, направление и скорость бега ветровых волн.

3.3. Программная реализация модуля генерации гидрометеорологических условий навигации

Реализация полученных моделей временных рядов векторной скорости ветра и бега ветровых волн в среде AnyLogic происходит следующим образом. В имитационной модели создается java-класс генератора гидрометеорологических условий навигации. На основе этого класса на главном уровне (в данном случае – на уровне агента Main) имитационной модели создается популяция (коллекция) агентов – по одному агенту на исследуемый морской участок. Каждый из агентов представляет собой экземпляр java-класса

генератора гидрометеорологических условий, полями которого являются ключевые параметры ветро-волнового режима (направление и скорость ветра, высота, направление и скорость бега ветровых волн) и функциональные зависимости между ними.

Для каждого из агентов строится многоугольный узел библиотеки разметки пространства (в случае использования GIS-карты – GIS-регион), который является значением поля «Местоположение» этого агента с целью дальнейшего определения морского участка, по территории которого движется судно.

В момент запуска имитационной модели выполняются функции, рассчитывающие начальные значения параметров ветро-волновых режимов по всем морским участкам в порядке, предусмотренном распределением векторов перемещений воздушных масс.

4. Построение модуля расчета скорости движения судна с учетом ветро-волновых режимов

Модуль расчета скорости движения судна является частью диаграммы состояний эксплуатации судна, которая описывает выполнение расписания рейсов поставок. При моделировании выхода судна в рейс запускается цикл расчета скорости движения судна с шагом, соответствующим дискретности моделей временных рядов. На каждом шаге выполняются следующие действия:

- определяется принадлежность судна к одному из рассматриваемых морских участков маршрута;
- выполняется оценка потери скорости судна из-за ветровых волн;
- выполняется оценка потери скорости судна из-за ветра.

Стоит отметить, что учет влияния волнения на эксплуатацию судна происходит при допущении того, что система автоматического управления (САУ) движения судна при волнении допускает снижение мощности двигателей и, соответственно, скорости для обеспечения безопасной работы судовой энергетической установки [3].

Определение принадлежности судна к одному из рассматриваемых морских участков маршрута осуществляется путем сопоставления местоположения судна (координат в пикселях или широты и долготы) с местоположением морских участков каждого из экземпляров java-класса гидрометеорологических условий навигации.

В качестве функциональной зависимости между параметрами ветровых волн и приращением скорости судна на волнении были рассмотрены две: формула П.М. Хохлова [17] и формула, описанная Вагущенко Л.Л. и Цымбал Н.Н. в их учебном пособии [3]. Поведение данных функций было проанализировано в рамках эксперимента варьирования параметров: каждый из аргументов функции изменялся в ограниченном допустимом диапазоне значений, а поведение функций верифицировалось путем его сопоставления с информацией о поведении судна на волнении на основе материалов [11], [18], в которых описаны следующие положения.

При попутном волнении прирост скорости судна недопустим по причине риска брошинга: если скорость волны больше скорости судна, винт

закручивается так, что его момент стремится развернуть судно лагом к волне; если скорость волны меньше скорости судна, судно захватывается задним склоном волны и не может из нее выйти даже при повышенной мощности двигателей. Следовательно, в формуле расчета приращения скорости судна не должно быть положительного прироста скорости при попутном волнении, а также не должно быть положительного прироста скорости судна при увеличении мощности двигателей.

Таким образом, для оценки приращения скорости судна из-за ветровых волн (ΔV_v) используется эмпирико-статистическая формула из учебного пособия [3], принимающая на вход значения высоты ветровых волн, м (h_z), скорости движения судна в спокойной воде, узл (V_0), курсовой угол бега ветровых волн, рад. (q_w), длина судна, м (L) (7):

$$\Delta V_v = \frac{0,01 \cdot V_0}{\sqrt{1 + \left(\frac{5 \cdot q_w}{\pi}\right)^2}} * \left(\frac{175 \cdot h_z \cdot \sqrt{h_z}}{L} + 0,32 \cdot h_z^2 \right) \quad (7)$$

Для оценки приращения скорости судна из-за ветра используется формула В.В. Дремлюга [5], прошедшая верификацию по данным материалов [2]. На вход данной функции расчета приращения скорости судна из-за ветра, узл. (ΔV_w) принимаются абсолютная скорость ветра, м/с (W), курсовой угол ветра, град. (q_w), ветровой коэффициент ($K_q = c_x S / 81 \xi \Omega$), коэффициент воздушного сопротивления соответствующего курсового угла ветра (c_x), площадь проекции подводной части судна на плоскость миделя, м² (S), коэффициент полного сопротивления подводной части судна (ξ), площадь смоченной поверхности судна (Ω) (8):

$$\Delta V_w = V_0 - \sqrt{\frac{V_0^2 (1 + K_q) - K_q W^2}{1 + K_q}} - \frac{K_q W}{1 + K_q} \cos q_w \quad (8)$$

Расчет ветрового коэффициента производится поэлементно по данным [1]. Так, коэффициент воздушного сопротивления соответствующего курсового угла ветра определяется в зависимости от типа судна и курсового угла ветра [1]. Коэффициент полного сопротивления воды подводной части судна представляет собой сумму коэффициентов сопротивления трения, сопротивления формы и волнового сопротивления [1]. Для расчета составляющих коэффициента полного сопротивления воды используются следующие данные:

- значение числа Фруда (Fr), зависящее, в том числе, от ускорения свободного падения (g) [1] (9):

$$Fr = \frac{V_0}{\sqrt{g \cdot L}} \quad (9)$$

- кинематическая вязкость воды, зависящая от ее температуры (σ) [1];

- значение числа Рейнольдса (Re) [1] (10):

$$Re = \frac{V_0 \cdot L}{\sigma} \quad (10)$$

- аппроксимация зависимости коэффициента волнового сопротивления от чисел Фруда на основе графика по причине отсутствия у автора формулировки функциональной зависимости в явном виде [1].

Расчет приращения скорости движения судна из-за ветро-волновых потерь, имитация движения судна с рассчитанной скоростью и аккумуляция статистических данных о характеристиках рейса

судна производится встроенными средствами среды AnyLogic.

5. Результаты имитационного моделирования эксплуатации морских судов с учетом ветро-волновых режимов

Для верификации алгоритма генерации гидрометеорологических условий навигации были взяты данные из обучающей выборки построенных моделей, т.е. из источника, используемого при построении данного алгоритма [6], [7].

Верификация модельных значений гидрометеорологических условий навигации проведена отдельно по выборкам ключевых морских участков и морских участков, смежных с ключевыми. Данные выборки были составлены в ходе проведения эксперимента Монте-Карло в среде AnyLogic на протяжении 488 прогонов имитационной модели.

Критериями сравнения были выбраны относительные отклонения (по модулю) по основным описательным статистикам (среднее, минимум, максимум), по коэффициенту автокорреляции первого порядка выборок проекций скоростей ветра, направления и высоты ветровых волн, а также результаты статистических тестов Колмогорова-Смирнова и Манна-Уитни для двух выборок. Нулевая гипотеза данных тестов заключается в предположении о том, что распределение рассматриваемых параметров между исследуемыми выборками (модельной и обучающей) не имеют статистически значимых различий. Статистические тесты проводятся на уровне значимости 0,05.

Результаты верификации приведены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты верификации модуля генерации гидрометеорологических условий навигации

Тип морского участка	Модуль	Целевой показатель критерия сравнения	Среднее значение критерия сравнения
Ключевой	Ветер	Основные описательные статистики	37,61%
		Коэффициент автокорреляции	14,37%
	Волны	Основные описательные статистики	26,37%
		Коэффициент автокорреляции	1,76%

Не ключевой	Ветер	Основные описательные статистики	33,24%
		Коэффициент автокорреляции	2,59%
	Волны	Основные описательные статистики	9,05%
		Коэффициент автокорреляции	3,27%

По данным таблицы 1 видно, что реализованный алгоритм моделирования временной корреляции обеспечивает незначительные отклонения коэффициента автокорреляции выборки модельных значений от выборки фактических значений. Однако относительные отклонения (по модулю) описательных статистик выборки модельных значений от выборки фактических значений слишком велики, чтобы утверждать, что выборки взяты из одной и той же генеральной совокупности.

Также по результатам проведения статистических тестов Колмогорова-Смирнова и Манна-Уитни была отвергнута нулевая гипотеза для всех морских участков, что означает наличие статистически значимых различий в распределении модельных и фактических значений проекций скорости ветра и параметров ветровых волн.

Для верификации алгоритма расчета скорости движения судна с учетом ветро-волновых режимов участков эксплуатации необходима следующая информация: установленная капитаном судна скорость движения (узл), географические координаты судна, достигнутая скорость движения судна (узл) с дискретностью модуля генерации гидрометеорологических условий навигации. Однако получить такие данные из открытых источников практически невозможно, поэтому базой сравнения результатов применения данного алгоритма являются результаты технико-экономического обоснования [14].

Верификация модельных значений эксплуатационных показателей судов проведена по выборкам средней длительности морского перехода из пункта погрузки в пункт выгрузки, а также по среднемесячной потребности в судах в среднем по двум вариантам потребления СПГ. Данные выборки также сформированы в ходе проведения эксперимента Монте-Карло в среде AnyLogic на протяжении 488 прогонов имитационной модели.

Таблица 2

Результаты верификации модуля расчета скорости движения судна с учетом ветро-волновых режимов

Исследуемое судно	Период навигации	Целевой показатель критерия сравнения	Среднее значение критерия сравнения
Судно №1 (вместимость 8000 куб.м.)	Зимне-весенний	Длительность морского перехода	2,28%
		Потребность во флоте	0,61%
	Летне-осенний	Длительность морского перехода	4,73%
		Потребность во флоте	2,62%

Судно №2 (вместимость 17000 куб.м.)	Зимне-весенний	Длительность морского перехода	1,41%
		Потребность во флоте	7,13%
	Летне-осенний	Длительность морского перехода	1,37%
		Потребность во флоте	10,55%
Судно №3 (вместимость 23000 куб.м.)	Зимне-весенний	Длительность морского перехода	0,22%
		Потребность во флоте	9,52%
	Летне-осенний	Длительность морского перехода	0,28%
		Потребность во флоте	11,01%

Среднее относительное отклонение (по модулю) модельных значений целевых показателей критерия сравнения от полученных при выполнении ТЭО составило: для потребности в судах – 6,91%, для средней длительности морского перехода – 1,72%.

Также по данным таблицы 2 прослеживается увеличение среднего относительного отклонения (по модулю) с ростом вместимости исследуемого судна. Такая динамика объясняется в следующем. С ростом вместимости грузовых танков рассматриваемых транспортных средств увеличивается их габаритная длина, что влечет за собой рост приращения скорости из-за ветро-волновых режимов регионов эксплуатации. Поскольку модельные значения параметров гидрометеорологических условий навигации имеют большие отклонения от фактических значений, увеличение приращения скорости влечет за собой увеличение относительного отклонения модельных значений эксплуатационных показателей от значений базы сравнения.

Заключение

В настоящей работе описан алгоритм моделирования учета ветро-волновых режимов морских участков в моделировании эксплуатации морских транспортных судов. Данный алгоритм включает в себя реализацию двух модулей расчета: модуль генерации гидрометеорологических условий

навигации и модуль расчета скорости движения судна с учетом ветро-волновых потерь.

Однако оценка точности применимых методов весьма ограничена по ряду причин, ключевой из которых является отсутствие или скудность натурных наблюдений за поведением судна на волнении. Рассмотренные в данной работе методы основаны на экспериментальных рейсах судов, с момента постройки которых технологии судостроения претерпели значительные изменения. Получение натурных данных о поведении на волнении судов морально считающихся актуальными, в т.ч. в рамках экспериментальных рейсов, существенно ограничено, поскольку не имеет привлекательности для судовладельцев.

Перспективой развития модуля генерации гидрометеорологических условий навигации является использование моделей, использующихся в метеорологии, с целью учета гораздо большего множества факторов, влияющих на волновое действие. Примером такой модели является WaveWatch III – программный комплекс, разработанный в Национальном центре атмосферы и океана США (NOAA). С учетом существующего исследовательского опыта по объединению волновой модели WaveWatch III и атмосферной модели Weather Research & Forecasting [12], имеется перспектива в создании модуля генерации гидрометеорологических условий навигации на качественно новом уровне.

Литература

1. Басин А.М., Анфимов В.Н. Гидродинамика судна: Сопротивление воды, движители, управляемость и качка: учеб. пособие для вузов водного транспорта. Л.: Речной транспорт. Ленингр. отд-ние, 1961. 684 с.
2. Бояринов А.М., Ершов А.А., Пылаев С.М. Анализ применимости формул расчета ветро-волновых потерь скорости хода морских судов // Вестник ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова, 2017 г. Том 9 №6. С. 1168-1174
3. Вагущенко Л.Л., Цымбал Н.Н. Системы автоматического управления движением судна. Одесса: Фенікс, 2007. 329 с.
4. Васильев К.П. Что должен знать судоводитель о картах погоды и состоянии моря. Л.: Гидрометео-. издат, 1980. 232 с.
5. Дремлюг В.В., Гордиенко А.Н. Гидрометеорологическое обеспечение судовождения: учебник для вузов мор.транс. М.: Транспорт, 1989. 240 с.
6. Исследовательская система островов Тихого океана. Университет Гавайи [Электронный ресурс]. URL: https://pae-paha.pacioos.hawaii.edu/erddap/griddap/ncse_global.html (дата обращения: 04.02.2021)
7. Исследовательская система островов Тихого океана. Университет Гавайи [Электронный ресурс]. URL: https://pae-paha.pacioos.hawaii.edu/erddap/griddap/www3_global.html (дата обращения: 04.02.2021)
8. Канторович Г.Г. Анализ временных рядов // Лекционные и методические материалы. Экономический журнал ВШЭ, N 1-4, 2002. С. 81 – 523.
9. Карпенко А.А. Имитационное моделирование транспортной системы снабжения сжиженным природным газом города Мурманск и Мурманской области // Транспорт России: проблемы и перспективы – 2019.

- Материалы Международной научно-практической конференции. Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко РАН. 2019. С. 199-203.
10. Карпенко А.А. Оптимизация транспортной системы снабжения сжиженным природным газом г. Мурманск с использованием морского транспорта // Выпускная квалификационная работа по направлению 01.04.02 «Прикладная математика и информатика» ФГБОУ «СПБГУ», 2019. 82 с.
 11. Козырь Л.А., Аксютин Л.Р. Управление судами в шторм. М.: Транспорт, 1973. 112 с.
 12. Кузнецова А.М. Численное моделирование поверхностного ветрового волнения на коротких разгонах/диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики РАН», 2019. 110 с.
 13. Переведенцев Ю.П. Теория общей циркуляции атмосферы: учебное пособие. Казань: Казан.ун-т, 2013. 224 с.
 14. Предпроектная документация. Выбор и обоснование оптимальной логистической схемы доставки СПГ на Объект // 18-19-1/51.01.14.4.24-19-1-ОИ.2. АО «ЦНИИМФ», СПб., 2019. 153 с.
 15. Справочные данные по режиму ветра и волнения Балтийского, Северного, Черного, Азовского и Средиземного морей / Российский морской регистр судоходства. СПб.: РМРС, 2006. 452 с.
 16. Справочные данные по режиму ветра и волнения Баренцева, Охотского и Каспийского морей / Российский морской регистр судоходства. СПб.:РМРС, 2003. 214 с.
 17. Хохлов П.М. Учет воздействия волнения на судно повышает безопасность плавания и эффективность работы флота // ММФ ЦБНТИ, серия "Безопасность мореплавания". N 6(31), М., 1969. С. 9-51.
 18. Чижумов С.Д. Основы динамики судов на волнении: учеб. пособие. Комсомольск-на-Амуре:ГОУВПО «КНАГТУ», 2010. 110 с.
 19. Akaike H. A new look at the statistical model identification. IEEE Trans. Autom. Control 19, 1974. P. 716-723.
 20. Granger C. W. J. Investigating causal relations by econometric models and cross-spectral methods. Econometrica 37, 1969. P. 424-438.
 21. Hering A.S., Kazor K., Kleiber W. A Markov-Switching Vector Autoregressive Stochastic Wind Generator for Multiple Spatial and Temporal Scales. Resources 2015, 4, 70-92. <https://doi.org/10.3390/resources4010070> (дата обращения: 18.03.2020)
 22. Izaskun B.M., Garcia Morales R.M., Marino J., de los Santos F.: A Decision Support Tool for Port Planning Based on Monte Carlo Simulation, Proc. 2018 Winter Simulation Conference, Las Vegas, D.C., 2018. P. 2885 – 2896.
 23. Marine modeling and analysis branch. NOAA NWS NCEP environmental modeling center: <https://polar.ncep.noaa.gov/waves/implementations.php> (дата обращения: 21.03.2020)
 24. Ruey S. Tsay. Multivariate Time Series Analysis with R and Financial Applications. John Wiley. Hoboken, NJ. 2014. 520p.
 25. Schwartz G. Estimating the dimension of a model. The Annals of Statistics 5, 1978. P. 461-464.

References

1. Basin A.M., Anfimov V.N. Gidrodinamika sudna: Soprotivlenie vody, dvizhiteli, upravlyaemost' i kachka [Vessel hydrodynamics: Water resistance, propellers, controllability and pitching]: ucheb. posobie dlya vuzov vodnogo transporta. L.: Rechnoy transport. Leningr. otd-nie, 1961. 684 p.
2. Boyarinov A.M., Ershov A.A., Pylaev S.M. Analiz primenimosti formul rascheta vetro-volnovykh poter' skorosti khoda morskikh sudov [Analysis of the applicability of the formulas the calculation of the loss of ships speed due to wind and waves]. Vestnik Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, 2017 g. Part 9 N 6. pp. 1168-1174
3. Vagushchenko L.L., Tsymbal N.N. Sistemy avtomaticheskogo upravleniya dvizheniem sudna [Automatic ship movement control systems]. Odessa: Feniks, 2007. 329 p.
4. Vasil'ev K.P. Chto dolzhen znat' sudovoditel' o kartakh pogody i sostoyanii morya [What a boatmaster needs to know about weather charts and the state of the sea]. L.: Gidrometeoizdat, 1980. 232 p.
5. Dremlyug V.V., Gordienko A.N. Gidrometeorologicheskoe obespechenie sudovozhdeniya [Hydrometeorological support for navigation]: uchebnik dlya vuzov mor.trans. M.: Transport, 1989. 240 p.
6. Issledovatel'skaya sistema ostrovov Tikhogo okeana [Pacific islands Ocean observing system]. The University of Hawai'i. https://pae-paha.pacioos.hawaii.edu/erddap/griddap/ncep_global.html (accessed February 4, 2021)
7. Issledovatel'skaya sistema ostrovov Tikhogo okeana [Pacific islands Ocean observing system]. The University of Hawai'i. https://pae-paha.pacioos.hawaii.edu/erddap/griddap/ww3_global.html (accessed February 4, 2021)
8. Kantorovich G.G. Analiz vremennykh ryadov [Timeseries analysis]. Lektsionne i metodicheskie materialy. Ekonomicheskii zhurnal VShE, N 1-4, 2002. pp. 81 – 523.
9. Karpenko A.A. Imitatsionnoe modelirovanie transportnoy sistemy snabzheniya szhizhennym prirodnym gazom goroda Murmansk i Murmanskoy oblasti [Simulation modeling of transport system of liquefied natural gas supply of Murmansk and Murmansk region]. Transport Rossii: problemy i perspektivy – 2019. Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian academy of sciences. 2019. pp. 199-203.
10. Karpenko A.A. Optimizatsiya transportnoy sistemy snabzheniya szhizhennym prirodnym gazom g. Murmansk s ispol'zovaniem morskogo transporta [Optimization of supplying system for Murmansk by liquefied natural gas using marine transport]. Graduation project. Applied Mathematics and Computr Science. Saint-Petersburg State University, 2019. 82 p.
11. Kozyr' L.A., Aksyutin L.R. Upravlenie sudami v shtorm [Steering a ship during the storm]. M.: Transport, 1973. 112 p.

12. Kuznetsova A.M. Chislennoe modelirovanie poverkhnostnogo vetrovogo volneniya na korotkikh razgonakh [Numerical modeling of surface wind waves at short accelerations]. PhD thesis. Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, 2019. 110 p.
13. Perevedentsev Yu.P. Teoriya obshchey tsirkulyatsii atmosfery [Atmospheric general circulation theory]: uchebnoe posobie. Kazan': Kazan' State University, 2013. 224 p.
14. Predproektnaya dokumentatsiya. Vybory i obosnovaniye optimal'noy logisticheskoy skhemy dostavki SPG na Ob"ekt [The choice and justification of the optimal logistic scheme of cargo delivery to the Object]. 18-19-1/51.01.14.4.24-19-1-OI.2. CNIIMF JSC, SPb., 2019. 153 p.
15. Spravochnye dannye po rezhimu vetra i volneniya Baltiyskogo, Severnogo, Chernogo, Azovskogo i Sredizemnogo morey [Reference data on the wind and wave regime of the Baltic, North, Black, Azov and Mediterranean seas]. Saint-Petersburg, Russian register of shipping, 2006. 452 p.
16. Spravochnye dannye po rezhimu vetra i volneniya Barentseva, Okhotskogo i Kaspiyskogo morey [Reference data on the wind and wave regime in the Barents, Okhotsk and Caspian seas]. Saint-Petersburg, Russian register of shipping, 2003. 214 p.
17. Khokhlov P.M. Uchet vozdeystviya volneniya na sudno povyshaet bezopasnost' plavaniya i effektivnost' raboty flota [Accounting for the impact of waves on the vessel increases the safety of navigation and the efficiency of fleet operations]. Ministry of the Navy. Central Bureau of Scientific and Technical Information, "Navigation safety". N 6(31), M., 1969. pp. 9-51.
18. Chizhiumov S.D. Osnovy dinamiki sudov na volnenii [The fundamentals of ship dynamics on the waves]: Komsomol'sk-na-Amure, Komsomol'sk-na-Amure state technical university, 2010. 110 p.
19. Akaike H. A new look at the statistical model identification. IEEE Trans. Autom. Control 19, 1974. P. 716-723.
20. Granger C. W. J. Investigating causal relations by econometric models and cross-spectral methods. Econometrica 37, 1969. P. 424-438.
21. Hering A.S., Kazor K., Kleiber W. A Markov-Switching Vector Autoregressive Stochastic Wind Generator for Multiple Spatial and Temporal Scales. Resources 2015, 4, 70-92. <https://doi.org/10.3390/resources4010070> (accessed March 18, 2020)
22. Izaskun B.M., Garcia Morales R.M., Marino J., de los Santos F.: A Decision Support Tool for Port Planning Based on Monte Carlo Simulation, Proc. 2018 Winter Simulation Conference, Las Vegas, D.C., 2018. P. 2885 – 2896.
23. Marine modeling and analysis branch. NOAA NWS NCEP environmental modeling center: <https://polar.ncep.noaa.gov/waves/implementations.php> (accessed March 21, 2020)
24. Ruey S. Tsay. Multivariate Time Series Analysis with R and Financial Applications. John Wiley. Hoboken, NJ. 2014. 520p.
25. Schwartz G. Estimating the dimension of a model. The Annals of Statistics 5, 1978. P. 461-464.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Александр Александрович Карпенко, аспирант кафедры Вычислительных методов механики деформируемого тела, Санкт-Петербургский государственный университет, 199034, Санкт-Петербург, Университетская набережная, 7-9, e-mail: st071979@student.spbu.ru

Alexander A. Karpenko, graduate student of the Department of Computational Methods in Continuum Mechanics, St. Petersburg state University, Universitetskaya Emb. 7-9, St. Petersburg, 199034, Russian Federation, e-mail: st071979@student.spbu.ru

Поступила в редакцию: 17.03.2021

Принята к публикации: 15.05.2021