

16. Joey Rogers, Object-Oriented Neural Network in C++, Academic Press, San Diego, CA, 1997.
17. M.T. Hagan, H.B. Demuth and M.H. Beale, Neural Network Design, PWS Publishing, Boston, MA, 1995
18. Каракаев А.Б., Луканин А.В., Николаев Н.И., Хекерт Е.В. Контроль и управление коммутационными состояниями электрических сетей/ Морские интеллектуальные технологии. 2019. Т. 2. № 1 (43). С. 46-54
19. Каракаев А.Б., Хекерт Е.В., Галиев Г.А. Методические основы структурно-функционального подхода в системном анализе/Морские интеллектуальные технологии.– 2019.– Т. 2.– № 1 (43).– С. 77-81.
20. Печников А.Н., Хекерт Е.В. Моделирование процессов трансформации функциональной структуры деятельности операторов судовых систем в процессе их подготовки.// Человеческий фактор: проблемы психологии и эргономики.– 2007.– № 3-2 (41).– С. 76-77.
9. Rodionov A.I. Avtomatizaciya sudovozhdeniya. – М.: Transport, 1992. – 192s.
10. Smolencev S. V. Avtomaticheskij sintez reshenij po raskhozheniyu sudov v more // Vestnik GUMRF. - Vypusk 2 (36). - 2016. - S. 7 – 15
11. Smolencev S. V. Konceptiya avtomatizirovannoj intellektual'noj sistemy raskhozheniya sudov / S. V. Smolencev, B. V. Afanas'ev, A. E. Filyakov, D. V. Kunic // Ekspluataciya morskogo transporta. — 2012. — № 4 (70). — С. 11–14.
12. Smolencev S. V. Problema ocenki navigacionnoj situacii v more / S. V. Smolencev // Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova. — 2015. — № 6 (34). — С. 23–28.
13. Subanov E.E. Razrabotka modelej effektivnoj ocenki opasnosti stolknoveniya sudov pri prinyatii resheniya metodom analiza ierarhij./ Avtoref. dis. kand. tekhn. nauk: 05.22.19.- Novorossijsk - 2012.- 24 s.
14. Subanov E.E., Mironov A.V. Ispol'zovanie modifitsirovannoj modeli metoda analiza ierarhij dlya bezopasnogo raskhozheniya morskikh sudov // Ekspluataciya morskogo transporta. – 2014. - №1 - S. 24 – 28
15. Hajkin, S. Nejronnye seti: polnyj kurs, 2-e izdanie. [Tekst]: Per. s Angl. – М.: Izdatel'skij dom «Vil'yams», 2006.
16. Joey Rogers, Object-Oriented Neural Network in C++, Academic Press, San Diego, CA, 1997.
17. M.T. Hagan, H.B. Demuth and M.H. Beale, Neural Network Design, PWS Publishing, Boston, MA, 1995
18. Karakaev A.B., Lukanin A.V., Nikolaev N.I., Hekert E.V. Kontrol' i upravlenie kommutacionnymi sostoyanijami elektricheskikh setej/ Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2019. Т. 2. № 1 (43). С. 46-54
19. Karakaev A.B., Hekert E.V., Galiev G.A. Metodicheskie osnovy strukturfunkcional'nogo podhoda v sistemnom analize/Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2019. Т. 2. № 1 (43). С. 77-81.
20. Pechnikov A.N., Hekert E.V. Modelirovanie processov transformacii funkcional'noj struktury deyatel'nosti operatorov sudovyh sistem v processe ih podgotovki./ Chelovecheskij faktor: problemy psihologii i ergonomiki. 2007. № 3-2 (41). С. 76-77.

References

1. Astrein V.V. Razrabotka tekhnologij vyrabotki reshenij po preduprezhdeniyu stolknovenij sudov v more / Avtoref. dis. kand. tekhn. nauk: 05.22.19. - Novorossijsk - 2011. - 24 s.
2. Vasil'ev S. N. Intellektual'noe upravlenie dinamicheskimi sistemami / S. N. Vasil'ev, A. K. ZHerlov, E. A. Fedosov [i dr.]. — М.: Fizmatlit, 2000. — 352 s.
3. Vagushchenko L.L., Vagushchenko A.L. Podderzhka reshenij po raskhozheniyu s sudami. Odessa: Feniks, 2010. – 229 с.
4. Vas'kov A.S., Mironenko A.A. Sistema podderzhki prinyatiya reshenij v sudovozhdenii. Sb. nauchn. tr. – Novorossijsk: NGMA, 2003. - Vyp.8. S. 5-11.
5. Vas'kov V.A. Nekotorye principy sistemy podderzhki prinyatiya resheniya v sudovozhdenii Sb. nauchn. tr. – Novorossijsk: NGMA, 2013. - Vyp.3. S. 15-21.
6. Dmitriev, V.I. Sovremennye navigacionnye sistemy i bezopasnost' sudovozhdeniya / V.I. Dmitriev, V.I. Farfonov.– М.: Morkniga, 2010. – 160 s.
7. Mal'cev A.S. Manevrirovanie sudov pri raskhozhenii: Odessa: SPAP, 2005. - 208s.
8. Melihov A.N., Bernshtejn L.S., Korovin S.YA. Situacionnye sovetuyushchie sistemy s nechetkoj logikoj. - М.: Nauka, 1990.

УДК 629.58

DOI: 10.34046/aumsuomt91/8

МОДЕЛЬ АЛГОРИТМА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПОСТРОЕНИЯ МАРШРУТА СУДНА ДЛЯ ТАНКЕРОВ, ПЕРЕВОЗЯЩИХ ВЫСОКОВЯЗКИЕ НЕФТЕПРОДУКТЫ

В.И. Филатов, аспирант

В представленной статье рассмотрен пример автоматизированного выбора океанской части плавания для судов, перевозящих высоковязкие нефтепродукты, в частности мазут, на примере трансатлантического перехода. В данном направлении существует большое количество исследований по причине

развития концепции E-navigation, а также постепенного ужесточения требований по использованию бункерного топлива и удорожанию стоимости эксплуатации судна соответственно. В работе описана методология решения подобного рода задач, сформулированы основные проблемы и представлен пример построения такой траектории в математической среде. Элементом научной новизны в исследовании является определение нового фактора оптимальности- термодинамического процесса между высоковязким наливным грузом и окружающей средой, что многократно увеличивает стоимость перевозок. Результатом моделирования является траектория оптимального маршрута, рассмотренная совместно с традиционной ортодромической траекторией океанской части плавания.

Ключевые слова: графы, температурный градиент, гидрометеорологическая обстановка, оптимальный маршрут, генерирование линий предварительной прокладки

There is example of automated generation of transatlantic ocean's voyage for the vessels carrying high viscosity liquid oil products in this article. The calculations made for HSFO fuel oil. A lot of scientific researches have made for this direction of maritime industry due to development of E-navigation conception and gradually increasing of regulations for using of bunkering fuels, that make the management of the vessel more expensive. The article describes the methodology for solving problems of this kind, formulates the main problems and presents an example of automated trajectory in a mathematical environment. An element of scientific novelty in the study is the determination of the optimality factor, the thermodynamic process between the highly viscous oil cargo and the environment, which greatly increases the cost of transportation. The result of the simulation is the optimal trajectory of the route, considered in conjunction with the traditional orthodromic trajectory of the ocean part of the voyage.

Keywords: graph, temperature gradient, hydrometeorological conditions, optimal voyage, generation for the lines of vessel's track.

В представленной работе рассмотрен пример методики автоматизированного расчёта и построения оптимальной траектории пути судна. В современных рыночных условиях и грядущих переменах в плане ужесточения требований к использованию бункерного топлива и развития, и внедрения концепции E-навигации, морская транспортная система ставится в жёсткие рамки на всех уровнях и элементах, входящих в неё. Это не может не отразиться на требованиях со стороны фрахтователя к судовладельцу по оптимальному распределению финансовых затрат на коммерческую и техническую эксплуатацию судна.

В свою очередь судовладелец требует от «команды мостика» более детально подходить к вопросам планирования переходов и нахождению такого перехода, при котором будет наиболее рационально использовано бункерное топливо. «Палка о двух концах» состоит в постоянно меняющейся обстановке в период рейса и в то же время в заранее утверждённом плане перехода ещё до выхода судна из порта. Один из примеров фактора давления – стандартный ответ любого фрахтователя на «пооперорт» с вопросом: «Почему скорость не выдержали?», «Почему перерасход такой большой и не совпадает с заявленной таблицей расходов согласно ступени хода на телеграфе?»

По мнению специалистов, введение с 2020 года 0,5-процентного ограничения серы в топливе вряд ли вызовет значительный рост спроса на ультра низкосернистые виды горючего (с содержанием серы до 0,1%). Скорее в выигрыше окажется низко сернистый мазут (с содержанием серы не более 0,5%), учитывая, что разница в

цене между данными видами топлива может достигать 100 долларов США за тонну [2]. Для экономической стороны эксплуатации судов, расходующих в сутки десятки тонн топлива, эта разница может быть очень ощутимой.

Если исследования по минимизированию влияния от гидрометеорологических условий ведутся достаточно широко и уже имеют реализацию в ПО СППР, то необходимость исследовать новые параметры оптимальности стоит перед морской отраслью достаточно остро.

В данной работе в качестве одного из факторов оптимальности рассматривается критерий термодинамического процесса в период плавания судна, перевозящего высоковязкий груз на примере задачи о нахождении оптимальной траектории плавания в задаче трансатлантического рейса, для судна, перевозящего мазут. Такой подход является элементом научной новизны, поскольку ни одна существующая методика планирования перехода не включает в себя учёт данного фактора. В методе учёта данный критерий рассматривается в совокупности с другими факторами, влияющими на изохрону судна-полный вектор его состояния в один момент времени.

В данной работе характер каждого отдельного векторного пространства над полем $F_{доп}$ -допустимого пространства района плавания имеет нормальное распределение Гаусса [2]:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

где параметр μ — математическое ожидание, а параметр σ — среднеквадратическое отклонение распределения.

Векторное пространство ветра представлено массивом данных

$$\mathbf{V}_w = \{M_w(K_w), M_w(V_w), M_w(H_w)\},$$

где $M_w(K_w), M_w(V_w), M_w(H_w)$ – сгенерированные матрицы случайных величин направление ветра, скорости ветра, высота волны. При моделировании векторного поля ветра в качестве его параметров представлены три основных параметра: k_i – направление ветра; v_i – скорость ветра, узлы; h_i – высота волны, метров

$$\left. \begin{aligned} M_w(K_w) &= \{k_i | f(k) = f(x), \text{ где } k \in [0, 360]\} \\ M_w(V_w) &= \{v_i | f(v) = f(x), \text{ где } v \in [7, 15]\} \\ M_w(H_w) &= \{h_i | f(h) = f(x), \text{ где } h \in [0.3, 3.5]\} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Векторное пространство течений представлено массивом данных $\mathbf{V}_c = \{M_c(K_c); M_c(V_c)\}$.

k_i - направление течения; v_i - скорость течения, узлы. Так же в северо-западной части поля преобладают течения $k_i \in [20, 95]$ -некоторая общность с Гольфстримом, а в восточной части у Гибралтара имеются сильные встречные течения $k_i \in [230, 360]^\circ$, $v_i \in [2.2, 3.6]$

$$\left. \begin{aligned} M_c(K_c) &= \{k_i | f(k) = f(x), \text{ где } k \in [0, 360]\} \\ M_c(V_c) &= \{v_i | f(v) = f(x), \text{ где } v \in [0.5, 3.6]\} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

В условиях роста цен на энергоресурсы себестоимость перевозок нефтепродуктов во многом определяется затратами на топливо. Особенность эксплуатации нефтеналивных судов заключается в необходимости подогрева груза, что связано с дополнительным расходом топлива. Даже современный двухкорпусной танкер «Aframax» в зимнее время при перевозке груза мазута из портов Балтийского моря в порты Мексиканского залива расходует около 300 т топлива на поддержание погрузочной температуры груза. Расход бункера увеличивается, если требуется повысить температуру груза. В зависимости от внешних метеоусловий ежедневный расход бункера на танкере класса «Aframax» на

поддержание температуры груза составляет от 12 до 20 т в сутки, а на повышение – от 25 до 30 т. Учитывая мощность судового энергетического комплекса танкера, даже небольшой процент экономии топлива положительно сказывается на финансовых результатах работы судна и повышает конкурентоспособность судоходной компании. Поэтому в настоящее время актуальны поиск и внедрение наиболее эффективных и экономичных технологий в топливно-энергетический комплекс судна[2,4]. Но в первую очередь основным фактором остывания высоковязкого груза является температура заборной воды. Элементом научной новизны в данной работе является рассмотрение взаимосвязи между процессом остывания высоковязкого нефтепродукта и оптимальностью рейса в целом.

Модель описанного алгоритма реализована в среде Matlab методом динамического программирования в дискретном виде, в частности матрично-графовым методом.

В данной статье векторное пространство температурного поля $\mathbf{V}_T = \{M_T(t_i)\}$ выражено двумя составляющими: градиентной и случайной. Градиентная составляющая является следствием падения солнечных лучей под прямым углом на экваториальную зону. На Экваторе вода теплее, по мере удаления к северному полюсу идёт процесс охлаждения водной поверхности.

Случайная составляющая является диапазоном случайных величин в заданном пределе для каждого широтного пояса. В каждом широтном поясе доступен диапазон температур в пределах 3-4 градусов. Направлением градиента является перпендикуляр к плоскости экватора направленный на увеличение температуры.

$$\left. \begin{aligned} grad \mathbf{T} &= \nabla \mathbf{T} = \left(\frac{\partial t}{\partial \varphi} \right) \vec{e} \\ M_T(T) &= \{t_i | f(t) = f(x), \text{ где } t \in [5, 15]\} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Модель векторного пространства температурного поля \mathbf{V}_T представлено на рисунке ниже:

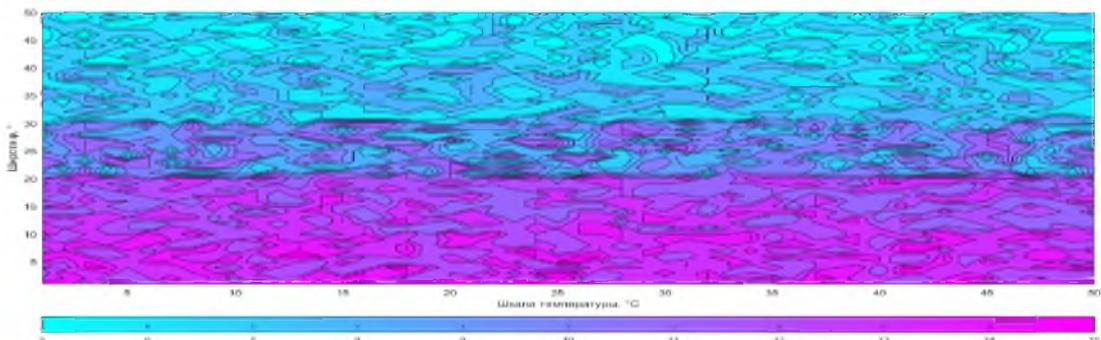


Рисунок 1 – Векторное пространство \mathbf{V}_T над полем $\mathbf{F}_{дон}$

При перевозке высоковязкого нефтепродукта каждый фрахтователь даёт инструкцию по подогреву груза. Существует два типа подогрева груза: “tomaintain” – постоянное поддержание температуры груза и “toheat”- режим подогрева груза, который характеризуется промежутками остывания и нагрева груза. В данной работе рассматривается наиболее используемый тип подогрева груза, характеризующийся периодами остывания и нагрева груза. Моделирование произведено для типового рейсового задания и сопутствующих инструкций фрахтователя.

Дано: судно класса «Aframax», перевозящее мазут через атлантический океан. Количество груза $Q=90000$ т, $C=1,836 \cdot 10^3$ Дж/(кг*К). Дан условный прогноз на всю трансатлантическую часть. Задание фрахтователя: следовать на полном ходу, что в условия спокойной гидрометеорологической обстановки соответствует $V=13$ узлов, Начальная температура груза $T_n=50$ °С, температура нижнего предела остывания $T_{н.п.}=30$ °С. Осадка в полном грузу $d=14$ метров.

Допустимым нижним пределом температуры груза для мазута является температура, на 10 °С превышающая его температуру застывания (pour point) – температуры, при которой жидкость теряет текучесть, загустевает настолько,

что при наклоне пробирки под углом 45 ° уровень жидкости остается неподвижным в течение 1 минуты. В данном решении температура застывания мазута $T_s = 20$ °С.

Методика расчёта периода остывания, нагрева и суммарного периода теплопередачи основана на законе Ньютона-Рихмана:

$$\left. \begin{aligned} \tau_c &= \frac{G \times C}{\sum k_i \times F_i} \times \ln \frac{(T_n - t_i)}{(T_{н.п.} - t_i)} \\ \tau_h &= \frac{G \times C}{\sum k_i \times F_i} \times \ln \frac{(T_{н.п.} - t_i)}{(T_h - t_i)} \\ \tau_f &= \tau_c + \tau_h \end{aligned} \right\} (5)$$

где G – количество груза ,Т; C – удельная теплоёмкость мазута , Дж/(Кг*К)); k_i – коэффициент теплопередачи (Вт/(м²*К)); F_i – площадь контактной части борта с водой (м²); T_n – начальная температура груза; t_i – температура воды за бортом, С; $T_{н.п.}$ – температура нижнего предела, °С; τ_c, τ_h, τ_f – периоды остывания, нагрева и полный период теплопередачи соответственно.

Результат расчёта периода остывания мазута при различных температурах забортовой воды представлен на рисунке 2.

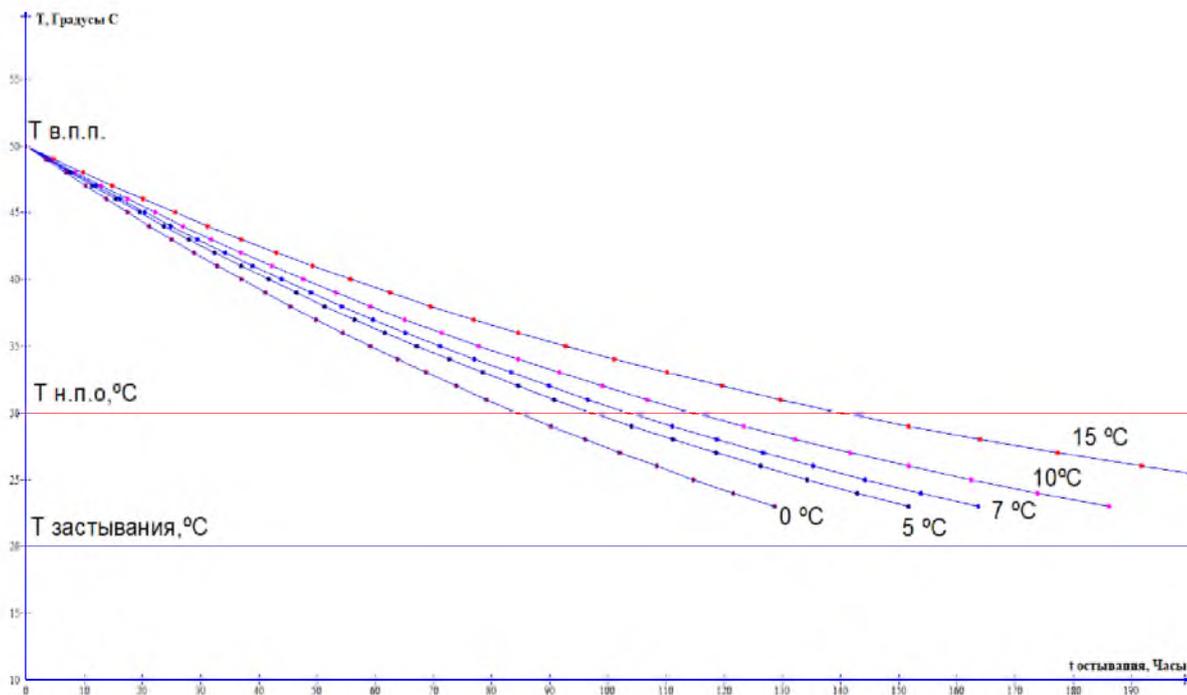


Рисунок 2 – Период остывания груза при различных температурах забортовой воды

Анализируя полученный график видно, что:
 $\tau_c = 140,3$ ч при $t_i = 15$ °С; $\tau_c = 103,6$ ч при $t_i = 7$ °С

Таким образом $\Delta \tau = 36,7$ ч, при средней стоимости мазута на зимний период 2019 года

$C_{б.м} = 460 \frac{\text{долл}}{т}$ и количеству бункерного топлива, затрачиваемого на подогрев груза $Q_{сум} = 25 \frac{\text{тонн}}{\text{сут}}$ разница бункера, потраченного на

подогрев груза, составила бы:

$$E = \frac{36,74}{24} \times 25 \frac{т}{сут} \times 460 \frac{\text{долл}}{т} = 17585,41 \text{ долл.}$$

Таким образом можно сделать вывод о том, что фактор расходов бункерного топлива на подогрев груза является существенной экономической частью рейса и необходимо брать его во внимание при решении задачи определения оптимального маршрута предстоящего перехода. Более того следует сказать о том, что если судно выполняет рейсовый чартер, то расходы за потребление дополнительного топлива, связанные с поддержанием температуры груза, равной грузозной, несёт судовладелец.

Теория графов выбрана в качестве математического аппарата для нахождения оптимального пути. Данный раздел дискретной математики выбран по причине относительной простоты реализации с последующим усложнением. Граф T представляет множество узлов, пронумерованных от 1 до n , и множество хорд между ними; $T = \langle V, E \rangle$, где $\{v_i, v_j \in V \cup e_{ij} \in E\}$. В данном случае граф ориентирован и взвешен, а каждое ребро имеет вес w_{ij} . При нахождении оптимального пути выполняется условие:

$$T = \begin{cases} 0, & \text{если } i = j \\ w_{ij}, & \text{если } (v_i, v_j) \in E, i \neq j \\ \infty, & \text{если } (v_i, v_j) \notin E, i \neq j \end{cases} \quad (6)$$

В случае дискретизации допустимой зоны плавания $F_{дон}$, граф T будет иметь древовидный характер и будет называться ордеревом – непустым конечным множеством узлов, на котором определено разбиение на подмножества [1]:

$$T(F_{дон}) \stackrel{Def}{=} \{ \{r\}, T_1, T_2, \dots, T_k \} \quad (7)$$

где r -корень ордерова, характеризующийся точкой начала маршрута; T_1, T_2, \dots, T_k - корни поддеревьев. Точкой начала океанской части плавания $A = [26; -72]$ является корень ордерова r , а целевой точкой окончания маршрута является $B = [35; -12]$.

Как известно, ортодромия является самым коротким расстоянием между двумя точками на сфере. Но в современной практике судовождения кратчайшее расстояние зачастую не всегда является самым оптимальным.

Задача дискретизации района плавания будет состоять в ветвлении поддеревьев от корня графа r вдоль ортодромической траектории до определённого пика, а затем на симметричное удаление вершина по мере приближения к целевой точке. Тогда степень вершины $d(v)$ описывается количеством хорд, инцидентных вершине v . Рассмотрены несколько степеней валентности, в частности: минимальная δ , когда нет рёбер, инцидентных вершине v , и максимальным Δ .

$$\delta(T(V, E)) = \min_{v \in V} d(v) = 0, \quad \Delta(T(V, E)) = \max_{v \in V} d(v) = 5 \quad (8)$$

Например, при $\Delta(T(V, E)) = 5$, 5 рёбер инцидентно вершины v и соответствует пяти направлениям, для данного случая это $K_v = \{45; 63; 90; 117; 135\}$

Данный вид связывания отличается от существующей методики, использующейся компанией BOEING. В исследовании выбраны дополнительные узловые точки для возможного дополнительного обчёта оптимизации генерации линий траектории. Полная методика дискретизации района плавания будет рассмотрена в последующих работах более подробно.

Проанализировав методики алгоритмов поиска оптимальной траектории в рамках задач навигационного обеспечения судоходства на графах в уже реализованных моделях, переработав его и добавив новый критерий оптимальности можно сделать вывод, что целевая функция веса хорды w_{ij} между любыми двумя рёбрами на графе рассчитывается, как:

$$w_{ij} = k_m \left(\frac{S_{ij}}{v_{ij}} \right) + k_t \tau_{ij} = k_m \left(\frac{\sqrt{(\varphi_j - \varphi_i)^2 + (\lambda_j - \lambda_i)^2 \cos\left(\frac{\varphi_i + \varphi_j}{2}\right)}}{v_{ij}} \right) + k_t \left(\frac{\tau_i + \tau_j}{2} \right) \quad (9)$$

где $v_i = [\varphi_i; \lambda_i]$, $v_j = [\varphi_j; \lambda_j]$ - вершины графа; k_m - коэффициент усиления для гидрометеорологической составляющей веса хорды, k_t - коэффициент усиления для температурной составляющей хорды, v_{ij} - ожидаемая скорость с учётом ветро-волнового влияния на каждом дискретном промежутке. При анализе формулы 9 можно сделать вывод о том, что степень влияния каждого критерия зависит от множества различных факторов и может быть применена в общем виде к любому судну, перевозящему не только высоковязкие нефтепродукты. В частном случае, при перевозке грузов, обладающих маленькой вязкостью $k_t = 0$, $k_t = 1$, и тогда только гидрометеорологическая составляющая будет учитываться.

ваться при поиске множества рёбер, характеризующих оптимальную траекторию.

Для увеличения скорости вычислительных процессов ордереро T задаётся с помощью списочной структуры, отражающей смежность вершин рёбер с различными степенями вершины

корня r от $\delta \rightarrow A$, тогда [3]:

$$T = \{M_w(w_{ij}) \mid e_{ij} \in [1 \dots n]\} \quad (10)$$

Элемента расчёта весовых коэффициентов плеч w_{ij} представлены в нижеприведённой таблице 1.

Таблица 1 – Элемента расчёта весовых коэффициентов плеч w_{ij}

| № e_{ij} | w_{ij} , при $K=90^\circ$ | w_{ij} , при $K=45^\circ$ | w_{ij} , при $K=63^\circ$ | w_{ij} , при $K=117^\circ$ | w_{ij} , при $K=135^\circ$ |
|------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|
| 1 | 25,50 | 32,49 | 45,00 | ∞ | ∞ |
| 2 | 27,08 | 32,44 | 41,47 | 42,36 | 31,69 |
| 3 | 22,20 | 26,76 | 35,11 | 35,11 | 26,58 |
| 4 | 23,43 | 11,91 | 10,71 | 39,70 | 29,87 |
| 7 | 23,50 | 29,89 | 38,23 | ∞ | ∞ |
| 8 | 23,61 | 29,67 | 40,01 | 41,74 | 29,87 |
| 9 | 22,92 | 27,48 | 36,29 | 37,18 | 28,45 |
| 10 | 22,72 | 28,14 | 38,04 | 37,21 | 28,37 |
| 13 | 24,66 | 32,30 | 40,53 | ∞ | ∞ |
| 14 | 22,99 | 27,39 | 37,29 | 37,15 | 28,47 |
| 15 | 23,21 | 30,85 | 38,04 | 39,24 | 30,61 |
| 16 | 22,96 | 30,80 | 39,10 | 39,99 | 29,38 |
| i+1 | ... | ... | ... | ... | ... |
| 142 | 20,75 | 27,53 | ∞ | ∞ | 27,05 |
| 143 | 19,82 | 10,71 | ∞ | ∞ | 26,10 |
| 145 | 19,26 | 23,84 | ∞ | ∞ | ∞ |
| 146 | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ |

Маршрутом на представленном ордерере будет цепь, чередующаяся вершин и хорд, начинающаяся в точке № 2 (A) и кончающаяся в точке №146 (B). Таким образом оптимальная траектория S будет соответствовать упорядоченной последовательности составных элементов, состоящей из рёбер с наименьшим коэффициентом веса w_{ij} .

$$S \{ \{v_A, v_B\} \} = \min_{\{A, B\}} | \langle A, B \rangle | = \min_{\{(i,j)\}} \sum_{i,j \in V} \langle v_{ij}, w_{ij} \rangle \quad (11)$$

При поиске оптимальной траектории использован алгоритм Дейкстры для поиска оптимального пути S , потому что он разработан для нахождения оптимальной цепи для любых двух вершин в орграфе, если дуги имеют неотрицательный вес. Результатом расчёта является путь:

$$S \{ \{v_A, v_B\} \} = \left\{ \begin{array}{l} W_{2;15;15;28}; W_{28;36}; W_{36;53}; W_{53;61}; W_{61;69}; W_{69;77}; W_{77;85}; W_{85;102}; \\ W_{102;110}; W_{110;125}; W_{125;133}; W_{133;138}; W_{138;142}; W_{142;146} \end{array} \right\}$$

Часть кода в пакете Matlab представлена ниже:

```
%Задание координатной сетки
%Создание карты земли, WGS-84 Datum
figure('color','w');
ha = axesm('mapproj','mercator',...
'maplatlim',[20 50], 'maplonlim',[-80 0]);
axis on, gridmon, framemon;
%Задание нанесения сетки карты
setm(ha,'MLineLocation',5,'PLineLocation',5);
hold on
xlabelLong
ylabelLat
```

```

mlabelon, plabelon;
load coast;
hg = geoshow(lat,long,'displaytype','line','color','k');
hold on
textm(26,-76.3,'A(r)\rightarrow ','FontSize',14)
textm(33,-12,'B','FontSize',14)
textm(28,-74,'Wij\rightarrow ','FontSize',14)
holdon;
A= [26 -72];
B= [35 -12];
% Нанесение дуги большого круга
gcpts = track2('gc',A(1),A(2),...
B(1),B(2));
geoshow(gcpts(:,1),gcpts(:,2),'DisplayType','line',...
'color','black','linestyle','-')
text(0.09,0.65,'\leftarrow ДБК','FontSize',14)
text(0.07,0.76,'\downarrow Оптимальный маршрут s [<Va,Vb>'],'FontSize',14)
%Отображение оптимальной траектории, выраженной путевыми точками и их соединение в траекторию предварительной прокладки
s = [26 -72; 29 -66; 32 -60; 32 -57; 35 -51; 35 -48; 35 -45; 35 -42; 35 -39; 38 -33; 38 -30; 35 -24; 35 -21; 35 -18; 35 -15; 35 -12 ];
waypoints = s; %список путевых точек, являющихся узлами ордерова r, найденные по алгоритму Дейкстры
plotm([26 -72; 29 -66; 32 -60; 32 -57; 35 -51; 35 -48; 35 -45; 35 -42; 35 -39; 38 -33; 38 -30; 35 -24; 35 -21; 35 -18; 35 -15; 35 -12 ],'ro')
hold on
[litrk,lintrk] = track(waypoints);
plotm(litrk,lintrk,'r')
hold on

```

Результат обчёта оптимального маршрута в сравнении с ортодромической траекторией показан на рисунке 3. Так же на нём показан наглядный пример дискретизации небольшого участка района плавания и ветвления ордерова из корня r , а так же присвоение веса w_{ij} ребру e_{ij} , соединяющему промежуточные вершины $v_i(A(r)), v_j \in V$.

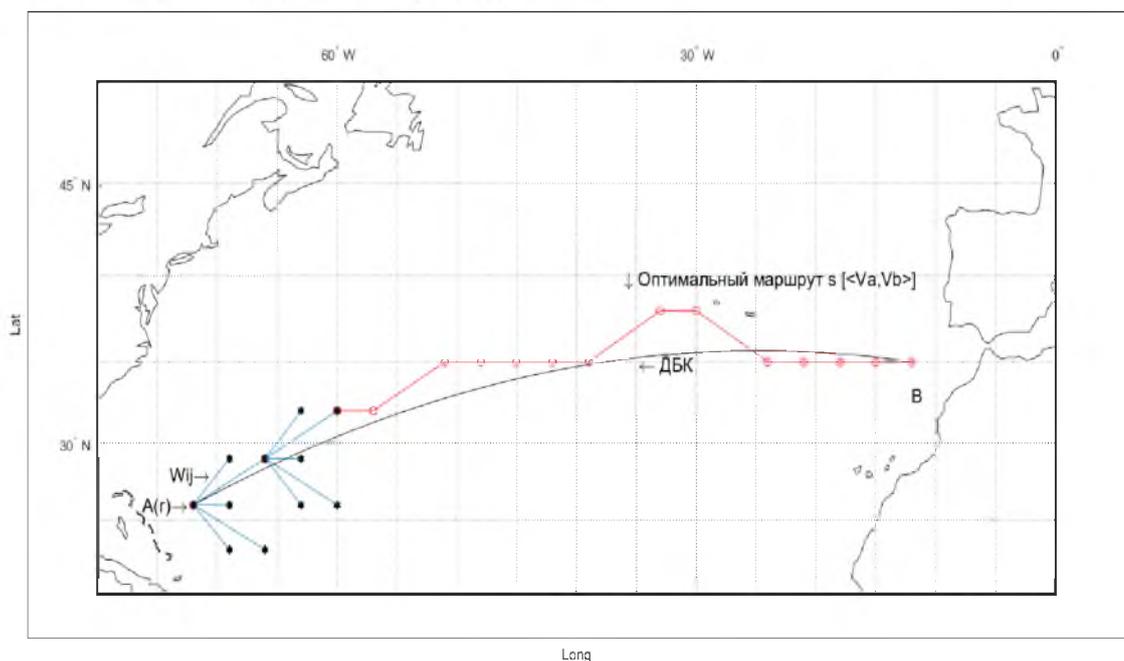


Рисунок 3 – Визуализация оптимальной траектории

Таким образом при анализе полученной траектории можно сделать вывод, что в общем случае оптимальной траекторией будет являться траектория, близкая к ортодромической. Рассмотренный метод учёта процесса теплопередачи в задачах определения оптимальной траектории может быть использован, потому что появляется новый критерий оптимизации. Чем больше факторов оптимальности учитывается при планировании, тем более экономически выгодным может оказаться рейс в целом. То есть даже при небольшом выигрыше в каждом из отдельно учтённых критериев, суммарная выгода перехода может быть существенной. Так же метод дискретизации района плавания на ордереве с подграфами является важной частью расчёта, что более подробно будет рассмотрено в других работах. Также важным элементом работы данного алгоритма является методика получения гидрометеорологической информации. Данный алгоритм может быть применён совместно с автоматической системой гидрометеомониторинга, которая разрабатывается на базе университета имени адмирала Ф. Ф. Ушакова. Данная система может полностью удовлетворить потребность пользователя в получении необходимой информации о погоде.

Литература

1. Горбатов В. А. Фундаментальные основы дискретной математики. Информационная математика. – М.: Наука, 1999. – 544 с.
2. Лопухов В.В. Методика расчета затрат энергии при периодическом подогреве мазута в резервуарах / В.В. Лопухов // РНСЭ, 10-14 сентября 2001: Материалы стендовых докладов. — Казань: Казанский гос. энерг. университет, 2001. – 40-43.

3. Новиков Ф. А. Дискретная математика для программистов: учебник для вузов. 3-е изд. – СПб.: Питер, 2009. – 384с.
4. Дурнев Ю.Н. / Планирование и мониторинг оптимального режима подогрева груза нефтепродуктов на танкерах. / Ю.Н. Дурнев, операционный суперинтендант, ОАО «Новороссийское морское пароходство». //Морской вестник - Санкт-Петербург. – 2013.– С 113-115.
5. Плохотников К. Э., Николенко В. Н. Теория вероятностей в пакете MATLAB: учебник для вузов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2014. – 611с. + Папка с MATLAB-файлами (16 семинарских занятий, 196 файлов).

References

1. Gorbатов V. A. Fundamental'nye osnovy diskretnoy matematiki. Informatsionnaya matematika. M.: Nauka, 1999, 544 s.
2. Lopukhov V.V. Metodika rascheta zatrat energii pri periodicheskom podogreve mazuta v rezervuarakh / V.V. Lopukhov // RNSE, 10—14 sentyabrya 2001: Materialystendovykh dokladov. — Kazan': Kazanskiy gos. energ. universitet, 2001. —40—43.
3. Novikov F. A. Diskretnaya matematika dlya programmistov. Uchebnik dlya vuzov. 3-e izd. — SPb.: Piter, 2009, 384s.
4. Durnev Yu.N. / Planirovaniye monitoring optimal'nogo rezhima podogreva gruzha nefteproduktov na tankerakh. / Yu.N. Durnev, operatsionnyy superintendant, ОАО «Novorossiyskoe morskoe parokhodstvo». / Morskoy vestnik -Sankt-Peterburg – 2013. S 113-115.
5. Plohotnikov K. E., Nikolenko V. N. Teoriya veroyatnostey v pakete MATLAB. / Uchebnik dlya vuzov. – M.: Goryachaya liniya – Telekom, 2014. – 611s. + Papka s MATLAB-faylami (16 seminar-skiikh zanyatiy, 196 faylov).

УДК 629.5.017.2

DOI: 10.34046/ aumsuomt91/9

МЕТОД МОДЕЛИРОВАНИЯ СИЛОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НЕРЕГУЛЯРНОГО ВОЛНЕНИЯ НА ТАНКЕР

*Ю. И. Юдин, доктор технических наук, профессор
В.В. Перевозов, капитан*

Для моделирования движения танкера при выполнении сложных маневров в реальных условиях плавания в его математическую модель требуется ввести математическое описание силовых нагрузок, определяющих характер влияния внешних факторов, присутствующих в районе маневрирования, на маневренные характеристики танкера. При маневрировании в условиях открытого моря в районе маневрирования присутствуют, как правило, все хорошо известные внешние факторы, включая волнение. В статье представлен способ математического моделирования силового воздействия нерегулярного волнения на танкер. Нерегулярное волнение имеет ряд особенностей, каждая из которых влияет на специфику его математического описания. Оно достаточно хорошо изучено с точки зрения его влияния на мореходные качества судна. Тем не менее, исследования в области судовождения требуют