
**ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И
ГИДРОГРАФИЯ/OPERATION OF WATER TRANSPORT, WATERWAYS AND HYDROGRAPHY**

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.170.40> EDN: UPAWRW**СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ ОБХОДА ДВИЖУЩЕГОСЯ ОБЪЕКТА**

Научная статья

Живулин Е.А.^{1,*}, Гришкин В.М.²¹ORCID : 0009-0002-4843-8178;²ORCID : 0000-0002-2080-1898;^{1,2} Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (st078725[at]student.spbu.ru)

Предложена: 15.04.2026; Принята: 31.07.2026; Опубликовано: 17.08.2026

Аннотация

Экономия топлива важна для судовладельцев. По этой причине актуальна задача построения маршрута обхода движущегося объекта, который позволит эффективно расходовать топливо. В данной статье представлены результаты сравнения различных методов обхода движущегося объекта. Для сравнения методов была разработана программа, которая реализует математическую модель движения судна. Для сравнения методов были проведены расчеты при различных значениях параметров движущегося объекта. Варьировались такие параметры, как изначальные координаты, курсовой угол, скорость движущегося объекта. Также была учтена возможность маневрирования движущегося объекта. Были проведены расчеты для случаев прямолинейного движения объекта и движения с одним и двумя поворотами. Сравнение эффективности методов производилось на основании среднего значения затрат энергии на маршрут.

Ключевые слова: обход движущегося объекта, экономия топлива, экономия энергии, оптимальный маршрута, оптимальный метод обхода.

A COMPARISON OF METHODS FOR BYPASSING A MOVING OBJECT

Research article

Zhivulin E.A.^{1,*}, Grishkin V.M.²¹ORCID : 0009-0002-4843-8178;²ORCID : 0000-0002-2080-1898;^{1,2} Saint Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russian Federation

* Corresponding author (st078725[at]student.spbu.ru)

Suggested: 15.04.2026; Accepted: 31.07.2026; Published: 17.08.2026

Abstract

Fuel economy is important for shipowners. For this reason, the task of devising a route to bypass a moving object, which makes efficient use of fuel, is of particular relevance. This article presents the results of a comparison of various methods for bypassing a moving object. To compare the methods, a programme was developed that implements a mathematical model of a vessel's motion. Calculations were carried out for various values of the moving object's parameters. Parameters such as the initial coordinates, approach angle and speed of the moving object were varied. The possibility of the moving object manoeuvring was also taken into account. Calculations were performed for cases involving the object's rectilinear motion and motion involving one or two turns. The effectiveness of the methods was compared based on the average energy consumption per route.

Keywords: bypassing a moving object, fuel economy, energy saving, optimal route, optimal bypass method.

Введение

Большая часть расходов на эксплуатацию и обслуживание судна приходится на закупку топлива [1]. Расход топлива судна на единицу пути нелинейно зависит от скорости движения, которую стремится развить двигатель [2]. Следовательно, при маневрировании среди движущихся объектов необходимо учитывать не только длину маршрута, но и скорость движения по разным его участкам.

В случае риска столкновения с другими судами существуют разные способы построения маршрута. Например, алгоритм Дейкстры [3] и его модификации, генетические алгоритмы [4], эвристические алгоритмы [5], гибридные алгоритмы [6] и т.д. Однако данные алгоритмы и другие, используемые для решения подобных задач, хорошо работают для построения маршрута в рамках неподвижных препятствий, но они не были рассчитаны на применение к задаче маневрирования среди движущихся объектов с учетом зависимости эффективности маршрута от скорости судна. Часто подобные алгоритмы используются для построения дискретного маршрута, который затем нужно сглаживать. Это так же может приводить к менее эффективному решению.

В последнее время приобрели популярность нейронные сети для решения задач построения маршрута [7]. Однако для их применения необходимо большое количество тренировочных данных для обучения нейронных сетей. Для

формирования тренировочных данных, нужна методика построения маршрута, которая будет использоваться при решении.

За счет нелинейного расхода топлива на единицу пути от скорости, не всегда наиболее короткий маршрут также является и наиболее эффективным, потому что скорость при движении по этому маршруту может быть существенно выше, чем в других вариантах движения. Это может привести к большему расходу топлива, чем при движении по более длинному пути, на котором требуется меньшая скорость движения. Именно поэтому важно учитывать и скорость судна.

Для того чтобы решать задачу обхода нескольких объектов, необходимо выбрать метод обхода одного объекта. Исследование этого вопроса представлено в данной статье.

Существуют различные способы обхода движущегося объекта, каждый из которых имеет свои преимущества и недостатки. В данной статье приводятся методика и результаты сравнения различных методов построения маршрута судна. Для решения задачи сравнения методов обхода одного объекта, необходима реализация модели, которая способна определить оптимальность построенного маршрута. Реализацией модели является программа, которая моделирует движение судна и объекта, обход которого производится. После моделирования движения судна и объекта определяется расход энергии судна на маршрут.

Математическая модель движения судна

Для моделирования движения судна используется следующая стандартная система уравнений движения судна [8, С. 202]:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = v \cos(q - \beta) \\ \frac{dy}{dt} = v \sin(q - \beta) \\ \frac{dq}{dt} = w \\ \frac{dv}{dt} = -v\omega \sin(\beta) \cos(\beta) \left(\frac{1}{1+k_{11}} - \frac{1}{k+k_{22}} \right) - \frac{(\sum_i F_{yi}) \sin(\beta)}{(1+k_{22})\rho V} + \frac{(\sum_i F_{xi}) \cos(\beta)}{(1+k_{11})\rho V} \\ \frac{d\beta}{dt} = w \left(\frac{\sin^2(\beta)}{1+k_{11}} + \frac{\cos^2(\beta)}{1+k_{22}} \right) - \frac{(\sum_i F_{xi}) \sin(\beta)}{(1+k_{11})\rho V v} - \frac{(\sum_i F_{yi}) \cos(\beta)}{(1+k_{22})\rho V v} \\ \frac{dw}{dt} = \frac{\sum_i M_i}{(1+k_{66})I_x} \end{cases}$$

, где x — координата судна по ОХ, y — координата судна по ОУ, q — курсовой угол судна, v — модуль скорости судна, β — угол сноса судна, w — угловая скорость судна, F_x — силы, действующие на судно вдоль корпуса (не обязательно параллельны ОХ), M — момент сил, действующих на судно, k_{11} — коэффициент продольной присоединенной массы воды, — коэффициент поперечной присоединенной массы воды, k_{66} — коэффициент присоединенного момента, I_z — момент инерции относительно ОZ, ρ — плотность воды, V — объем части судна, погруженной в воду. Курсовой угол судна определяется, как разность между углом корпуса судна и углом сноса: $q - \beta$.

Данная модель рассматривается в условиях штиля. Это значит, что отсутствует течение и ветер. То есть при отсутствии работы двигателя и нахождении судна на месте, на него не будут действовать никакие силы, векторы направления которых лежат в горизонтальной плоскости.

При равномерном прямолинейном движении судна, на него воздействует сила тяга, создаваемая двигателем и сила сопротивления воды и воздуха вдоль корпуса. Силы, действующие на судно перпендикулярно корпусу, в таком случае будут отсутствовать.

Правая часть системы дифференциальных уравнений задает приращение координат судна и их скоростей. Для управления значением приращения меняется сила тяги судна и момент сил судна, задающий поворот за счет изменения направления судового руля.

Была разработана программа, реализующая расчет правой части уравнения и на основе этого формирующая следующее передвижение судна в соответствии с указанной моделью. Это позволяет строить траекторию движения судна, подчиненную существующим физическим законам движения, с заданной функцией управления.

Обход движущегося объекта

Для сравнения методов обхода движущегося объекта требуется определить задачу, которая должна быть решена посредством разных функций управления, и критерий эффективности ее выполнения. По результатам выполнения задачи будет проведено сравнение методов и выбор оптимального для обхода движущегося объекта.

Судно должно прийти в пункт назначения и при этом обойти другой объект. Для обхода движущегося объекта необходимо произвести маневр, в ходе которого судно будет сближаться с движущимся объектом, при приближении к нему начнет маневр по непосредственному обходу объекта, представляющий собой поворот для достижения курсового угла, направленного на пункт назначения. Затем судно должно достигнуть пункта назначения.

В течение всего маневра судно должно находиться на дистанции от объекта не менее, чем заданная минимальная дистанция. Для соблюдения этого условия судно должно во время маневра по сближению с объектом после достижения заданной дистанции сближения начать совершать поворот для выхода на направление к цели.

Дистанция, при достижении которой начинается поворот на цель, может различаться для разных направлений движения судна и объекта, и требует изменения и последующего пересчета траектории в том случае, если минимальное расстояние между судном и объектом за весь маршрут будет отличаться от заданной минимальной дистанции сближения с точностью до 1%.

Варьирование дистанции, при достижении которой судно начинает поворот к цели, позволяет найти оптимальную траекторию в рамках применения рассматриваемого метода без необходимости разрабатывать алгоритм для определения требуемой дистанции между судном и объектом для начала поворота в зависимости от ситуации.

В результате моделирования движения судна во время обхода движущегося объекта в разных условиях, будут построены траектории, сравнение которых позволит определить эффективность рассматриваемых методов в различных ситуациях.

Для сравнения методов обхода используются как ситуации прямолинейного движения объекта без изменения курса движения, так и с изменением курса. У судна, представленного движущимся объектом, как правило, нет необходимости часто менять курсовой угол движения. Судно движется к заданной цели и поэтому, как правило, не меняет угол движения на слишком большую величину. Поэтому в качестве ситуаций движения с маневрированием рассматриваются такие, в которых объект совершает один или два поворота.

Первый поворот совершается на угол $\frac{\pi}{6}$ влево или вправо. В случае маршрута объекта с двумя поворотами, второй поворот совершается на угол $\frac{\pi}{6}$, если он производится в ту же сторону, что и первый, и $\frac{\pi}{3}$, если второй поворот производится не в ту же сторону, что и первый. В том случае, если поворот производился, он был произведен через

В том случае, если поворот производился, он был произведен через $\frac{1}{3}$ от времени сближения с объектом в случае максимально быстрого возможного сближения. Если производилось два поворота, второй был после первого спустя еще $\frac{1}{3}$ от времени сближения с объектом в случае максимально быстрого возможного сближения.

Судно идет с постоянной мощностью работы двигателя, управление движением осуществляется через изменение момента сил судна. Изменение момента сил производится через изменение значения производной момента сил. Это сделано для того, чтобы ограничить скорость изменения момента сил. Приращение момента сил в единицу времени рассчитывается по формуле

$$\frac{dM}{dt} = f(t, x, y, q, v, \beta, w, M, \alpha_{aim}),$$

где f — функция управления.

За счет полученной информации функция управления принимает решение о текущем приращении значения момента сил. Функция управления получает такие параметры, как время, значение координат и скоростей судна, момента сил и угла на цель — угол вектора, соединяющего текущее положение судна и цели. Эти данные позволяют функции управления принимать решение о том, как менять значение скорости изменения момента сил.

Момент сил и угловая скорость судна ограничены максимальными значениями этих величин. Соответственно, чем ближе текущее значение момента сил по модулю к максимальному, тем меньше может быть значение приращения, если оно продолжает приводить к изменениям момента сил в сторону роста его модуля. Чем больше модуль значения угловой скорости, тем меньшее значение по модулю может принимать момент сил, при условии, что значения угловой скорости и момента сил одного знака.

При большом значении модуля разности курсового угла судна и угла на цель, функция управления возвращает большее значение приращения, чем при малом значении модуля разности. В том случае, когда разность углов мала, существенное увеличение момента сил и, как следствие, угловой скорости, приведет к тому, что в момент достижения значения курсового угла, равного углу на цель, угловая скорость судна будет такой, что оно произведет дальнейший поворот по инерции в ту же сторону, в которую он производился. Это приведет, как минимум, к движению по кривой, которая существенно отклоняется от прямолинейной траектории движения к цели. Более того, вследствие такого управления, движение судна может стать нестабильным и неконтролируемым. Если же разность углов велика, необходимо увеличить угловую скорость как можно быстрее, чтобы совершить поворот и выйти на требуемое направление движения раньше, с последующей стабилизацией.

Для стабилизации судна при завершении поворота, производится уменьшение модулей угловой скорости и момента сил, чтобы после достижения требуемого значения курсового угла судно не произвело поворот дальше по инерции слишком далеко. Даже при движении по прямолинейной траектории, судно необходимо стабилизировать и удерживать на курсе. Эту задачу решает функция управления. Для решения этой задачи производится определение разности курсового и целевого углов, учет значения угловой скорости и момента сил. Функция стремится уменьшить значение всех трех параметров, чтобы отклонения от курса были как можно меньше.

Методы построения траектории обхода объекта

Функция управления судна стремится привести курсовой угол к требуемому значению. Необходим метод, который определяет требуемое значение курсового угла. В тот момент, когда судно достигнет заданной дистанции с движущимся объектом, потребуются совершить маневр по непосредственному обходу. Во время этого маневра и далее целью судна будет пункт назначения. Функция управления будет выполнять задачу поворота судна на пункт назначения и удержания на этом курсе. После начала маневра по непосредственному обходу движущегося объекта, целевой угол определяется для всех методов обхода по одному и тому же принципу, различие есть на этапе сближения с объектом. Достижение заданной дистанции между судном и объектом необходимо для того, чтобы судно не производило обход по более длинной траектории, чем возможно в данном случае.

Разница будет заключаться в этапе достижения точки начала маневра по непосредственному обходу. Точка начала непосредственного обхода находится на окружности с радиусом заданной дистанции сближения до момента начала поворота и с центром, который задается координатами движущегося объекта. Она задается так, чтобы в момент ее достижения скорость судна относительно движущегося объекта была сонаправлена с касательной к этой точке.

Были протестированы следующие методы достижения точки начала маневра по непосредственному обходу движущегося объекта:

1. Прямолинейное движение к предполагаемой точке начала непосредственного обхода [9].
2. Следование за текущим положением точки начала непосредственного обхода [10].
3. Следование за текущим положением точки начала непосредственного обхода с упреждением [11, С. 24].
4. Следование за текущим положением точки начала непосредственного обхода с запаздыванием [12, С. 103].

Метод под номером 1 предполагает определение точки начала непосредственного обхода, после чего судно движется к этой точке напрямую.

Для определения этой точки производится переход в инерционную систему координат, в которой объект не движется. Затем производится построение касательной из точки текущего расположения судна к окружности с центром в точке расположения объекта и радиусом дистанции сближения. Построенная касательная задает угол вектора относительной скорости судна. На основе известных значений скоростей судна и объекта, а также известного значения курсового угла объекта, определяется требуемое значение курсового угла судна, двигаясь в соответствии с которым из текущего положения судно достигнет точки начала маневра по непосредственному обходу при прямолинейном движении.

Данная оценка не является абсолютно точной, т.к. не учитывает необходимость судна поворачивать по криволинейной траектории с замедлением скорости и необходимость корректировать отклонения от курса при прямолинейном движении. Данная потеря точности компенсируется постоянным обновлением требуемого значения курсового угла, что позволяет учитывать поворот судна и достигать достаточной точности при приближении к объекту.

Метод под номером 2 предполагает функцию управления движением судна, которая устанавливает направление вектора скорости на текущее положение точки начала непосредственного обхода движущегося объекта. В данном случае точка начала непосредственного обхода движущегося объекта определяется, как точка касания луча, построенного из точки нахождения судна к окружности с центром в точке нахождения объекта и радиусом, равным дистанции сближения с объектом. Таким образом, судно следует за объектом по кривой траектории. Траектория, построенная таким методом показана на рис. 1.

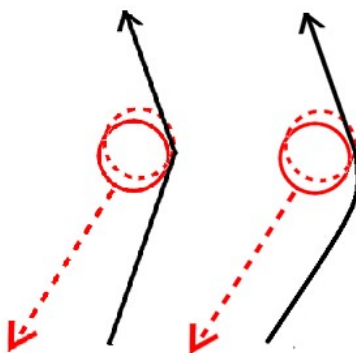


Рисунок 1 - Обход движущегося объекта в соответствии с методами 1 и 2

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.170.40.1>

Примечание: слева и справа соответственно

На рисунке 1 изображена схема движения судна при обходе. Судно совершает поворот для движения к объекту (первый поворот на рисунке не изображен). Метод 1 после первого поворота движется к точке начала маневра по непосредственному обходу прямолинейно. Метод 2 движется к точке начала маневра по непосредственному обходу по криволинейной траектории.

Методы под номерами 3 и 4 аналогичны номеру 2, но в отличие от метода 2, в качестве целевого значения угла они используют значение угла на цель, к которому добавляется или от которого вычитается заданное значение угла упреждения или запаздывания соответственно. Траектории, полученные таким образом, аналогичны траекториям, полученным по методу 2.

Преимущество методов 2, 3 и 4 заключается в том, что они могут быть применены для того, чтобы достичь маневрирующего заданного объекта (в данном случае точки начала поворота). Метод 1 может быть более эффективен в случае известной траектории движения объекта. Метод 1 основывается на достраивании траектории объекта с предположением о его прямолинейном движении с той же скоростью.

Сравнение методов построения траектории обхода

Для сравнения методов обхода было проведено моделирование перемещения судна и объектов при различных изначальных значениях координат, направлении движения и скорости объекта.

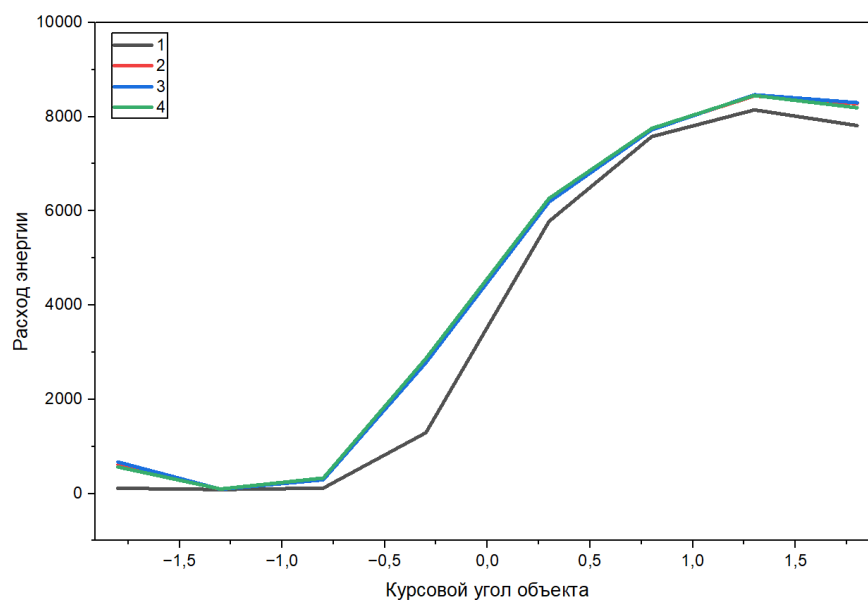


Рисунок 2 - Зависимость расхода энергии судна от курсового угла объекта:
1-4 - методы управления

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.170.40.2>

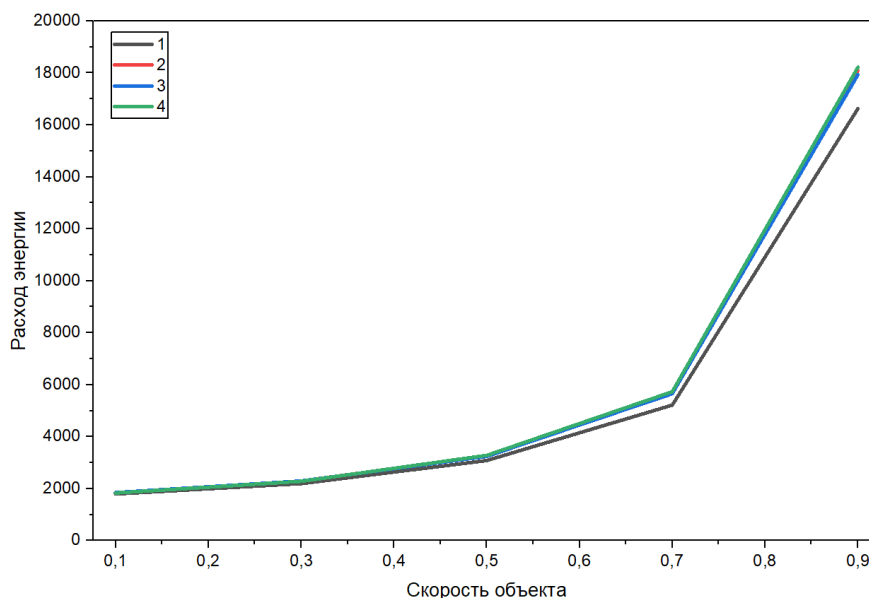


Рисунок 3 - Зависимость расхода энергии судна от скорости объекта:

1-4 - методы управления

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.170.40.3>

На рисунке 2 изображен график зависимости расхода энергии судна от курсового угла объекта. График построен при прямолинейном движении объекта и заданном значении его начального положения. При определении расхода энергии для одного значения курсового угла объекта, проводилось усреднение значения по разным скоростям движения объекта.

Из графика видно, что метод под номером 1 показывает меньший расход энергии по сравнению с другими методами. Большинство графиков, построенных для других траекторий объекта, аналогичны представленному: метод под номером 1 демонстрирует расход энергии меньше, чем другие методы.

На рисунке 3 изображен график зависимости расхода энергии судна от скорости объекта. График построен при прямолинейном движении объекта, заданных значениях его начального положения и курсового угла. Метод под номером 1 расходует меньше энергии, чем другие методы. Большинство графиков зависимости расхода энергии судна от скорости объекта также показывают большую экономичность метода 1.

Для сравнения рассматриваемых методов обхода движущегося объекта необходимо провести моделирование движения судна и объекта в разных условиях. Для этого были проведены расчеты для множества различных значений параметров объекта. Изначальные координаты движущегося объекта варьировались таким образом, чтобы угол вектора, направленного из начального положения судна до объекта, менялся от 0 до π с шагом в $\frac{\pi}{6}$. Значения скоростей объекта перебираются из множества $\{0,1v; 0,3v; 0,5v; 0,7v; 0,9v\}$, где v — скорость судна. Изначальные значения углов движения объекта перебираются из множества $\{-1,8; -1,3; -0,8; -0,3; 0,3; 0,8; 1,3; 1,8\}$ рад.

Методы направления вектора скорости на движущуюся точку, которая является началом маневра по непосредственному обходу, с упреждением или запаздыванием, могут быть реализованы с различными значениями углов запаздывания и упреждения. Были проведены расчеты для углов упреждения и запаздывания из множества $\left\{\frac{1,5\pi}{180}, \frac{3\pi}{180}, \frac{4,5\pi}{180}\right\}$.

Методы под номером 1 и номером 2 не обладают такими вариативными параметрами, поэтому расчеты произведены только для одной реализации каждого из этих двух методов. По результатам проведения расчетов было определено, что наиболее эффективным методом движения судна является метод под номером 1.

Таблица 1 - Расход энергии судна при различном управлении

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.170.40.4>

	Метод 1	Метод 2	Метод 3. Угол упреждения: 1,5 π /180	Метод 4. Угол запаздывания 1,5 π /180
Движение без поворотов	12745	18245	19254	18713
Поворот налево	5961	8857	9191	10506
Поворот налево, затем поворот налево	5756	6641	6584	6628

	Метод 1	Метод 2	Метод 3. Угол упреждения: 1,5л/180	Метод 4. Угол запаздывания 1,5л/180
Поворот налево, затем поворот направо	6541	7120	7079	7154
Поворот направо	7039	7381	7653	7637
Поворот направо, затем поворот налево	5938	7081	7011	7026
Поворот направо, затем поворот направо	4358	5682	5591	5599
	6905	8715	8909	9038

Примечание: в первой строке указан метод управления; в первом столбце указаны повороты объекта; на пересечении ячеек из первой строки и первого столбца указан расход энергии судна при данных условиях; нижняя строка показывает средний расход энергии судна соответствующим управлением

Таблица 2 - Расход энергии судна при различном управлении

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.170.40.5>

	Метод 3. Угол упреждения: 3л/180	Метод 4. Угол запаздывания 3л/180	Метод 3. Угол упреждения: 4,5л/180	Метод 4. Угол запаздывания: 4,5л/180
Движение без поворотов	16886	23645	14999	24582
Поворот налево	9248	10404	7968	10106
Поворот налево, затем поворот налево	6423	6594	6317	6666
Поворот налево, затем поворот направо	7167	7194	7157	7253
Поворот направо	7270	7645	7305	7490
Поворот направо, затем поворот налево	6962	6980	7031	6622
Поворот направо, затем поворот направо	5680	5283	5697	5213
	8519	9678	8068	9705

Примечание: в первой строке указан метод управления; в первом столбце указаны повороты объекта; на пересечении ячеек из первой строки и первого столбца указан расход энергии судна при данных условиях; нижняя строка показывает средний расход энергии судна соответствующим управлением

В таблицах 1 и 2 представлены результаты расчетов для разных методов управления судном в разных случаях движения объекта. В первой строке, начиная со второго столбца, указан номер метода управления и значение его параметра (угла упреждения или запаздывания), если он имеется. В первом столбце каждой таблицы начинания со второй ячейки указано, производились ли повороты объектом.

На пересечении ячейки из первой строки и ячейки из второго столбца в таблице указан средний расход энергии судном при данных условиях — соответствующем управлении судном и движении объектом. Значение усреднено по расчетам в ситуациях, при которых у движущегося объекта изменялся курсовой угол, положение и значение скорости в начальный момент времени.

Исходя из результатов сравнения видно, что метод прямолинейного движения к предполагаемой точке начала непосредственного обхода продемонстрировал лучшие результаты по эффективности среди рассматриваемых методов. Несмотря на более низкие показатели для каждого из рассмотренных вариантов маневрирования объекта, в тех случаях, когда движущийся объект существенно отклоняется от своей изначальной траектории, относительная разница



в эффективности между методом под номером 1 и рядом других методов сокращается. Это происходит в связи с тем, что метод под номером 1 реализует управление на основе прогноза движения объекта. Соответственно, качество управления сильно зависит от качества прогноза, и чем больше ошибка прогнозирования, тем менее эффективно управление.

Это означает, что метод прямолинейного движения к предполагаемой точке начала непосредственного обхода демонстрирует более высокую эффективность в случае решения задач, в которых движение объектов достаточно предсказуемо или меняется редко. Его эффективность падает в тех случаях, когда движение может быть непредсказуемым, например при большой плотности объектов, приводящей к необходимости большого числа маневров, или при движении вблизи судна, потерявшего возможность управления или другого объекта, не имеющего возможности управления.

Заключение

1. В ходе работы было проведено моделирование движения судна при обходе движущегося объекта в различных условиях. Моделирование проводилось при различных изначальных значениях координат, курсового угла, скорости и маневров движущегося объекта. Для каждой траектории движения судна был определен расход энергии на маршрут.

2. Оптимальным методом управления судном в рассмотренных условиях по совокупности результатов моделирования является метод, предполагающий поворот и последующее прямолинейное движение к рассчитанному положению точки начала маневра по непосредственному обходу движущегося объекта.

3. Метод, предполагающий поворот и последующее прямолинейное движение показывает высокую эффективность в сравнении с другими рассмотренными методами в случае предсказуемого движения объекта без изменения курса. При появлении непредсказуемости движения объекта эффективность метода падает.

4. Среднее значение расхода энергии для метода номер 1 за все маршруты лучше второго по эффективности метода на 16,8%, что является существенной разницей.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Carri`ere-Swallow Y. Shipping costs and inflation / Y. Carri`ere-Swallow, P. Deb, D. Furceri et al. // Journal of International Money and Finance. — 2003. — № 0261–5606.
2. Barentine J.M. A Process-Based Cost Estimating Tool for Ship Structural Designs: dis....MD: 17-2121.00 : defense of the thesis 2026-04-15 : approved 1996-05-01 / J.M. Barentine. — Atlanta, 2026. — 229 p.
3. Navid B. Ship voyage optimization considering environmental forces using the iterative Dijkstra's algorithm / B. Navid, M.S. Seyed // Ships and Offshore Structures. — 2023. — № 1744–5302. — P. 1173–1180. — DOI: 10.1080/17445302.2023.2231200
4. Khan S. The benefits of co-evolutionary Genetic Algorithms in voyage optimisation / S. Khan, P. Grudniewski, Y. Muhammad et al. // Ocean Engineering. — 2021. — № 0029–8018.
5. Han H. Exploring the application of ant colony optimization in path planning for Unmanned Surface Vehicles / H. Han, M.H.M. Ghazali, W. Rahiman // Ocean Engineering. — 2024. — № 311. — DOI: 10.1016/j.oceaneng.2024.118738
6. Wang H. HA-RRT: A heuristic and adaptive RRT algorithm for ship path planning / H. Wang, S. Chen, Z. Liu et al. // Ocean Engineering. — 2025. — № 316. — DOI: 10.1016/j.oceaneng.2024.119906
7. Guzelbulut C. Artificial Neural Network-Based Route Optimization of a Wind-Assisted Ship / C. Guzelbulut, T. Badalotti, Y. Fujita et al. // Journal of Marine Science and Engineering. — 2024. — № 2077–1312. — DOI: 10.3390/jmse12091645
8. Юдин Ю.И. Математические модели плоскопараллельного движения судна. Классификация и критический анализ / Ю.И. Юдин, И.И. Сотников // Вестник МГТУ. — 2006. — № 1560–9278.
9. Живулин Е.А. Расчет траектории обхода движущегося судна с целью экономии топлива / Е.А. Живулин, В.М. Гришкин // Процессы управления и устойчивость. — 2023. — № 2313–7304. — С. 56–64.
10. Колпин Р.В. Метод самонаведения погони / Р.В. Колпин, К.А. Тямин, А.А. Чудаков // Актуальные исследования. — 2022. — № 2713–1513.
11. Куркоткин В.И. Самонаведение ракет / В.И. Куркоткин, В.Л. Стерлигов. — Москва: Воениздат, 1963. — 89 с.
12. Паньков С.Я. Теория и методика управления авиацией / С.Я. Паньков, Ю.Е. Забураев, А.М. Матвеев. — Ульяновск: УВАУ ГА, 2006. — 209 с.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Carri`ere-Swallow Y. Shipping costs and inflation / Y. Carri`ere-Swallow, P. Deb, D. Furceri et al. // Journal of International Money and Finance. — 2003. — № 0261–5606.



2. Barentine J.M. A Process-Based Cost Estimating Tool for Ship Structural Designs: dis....MD: 17-2121.00 : defense of the thesis 2026-04-15 : approved 1996-05-01 / J.M. Barentine. — Atlanta, 2026. — 229 p.
3. Navid B. Ship voyage optimization considering environmental forces using the iterative Dijkstra's algorithm / B. Navid, M.S. Seyed // Ships and Offshore Structures. — 2023. — № 1744–5302. — P. 1173–1180. — DOI: 10.1080/17445302.2023.2231200
4. Khan S. The benefits of co-evolutionary Genetic Algorithms in voyage optimisation / S. Khan, P. Grudniewski, Y. Muhammad et al. // Ocean Engineering. — 2021. — № 0029–8018.
5. Han H. Exploring the application of ant colony optimization in path planning for Unmanned Surface Vehicles / H. Han, M.H.M. Ghazali, W. Rahiman // Ocean Engineering. — 2024. — № 311. — DOI: 10.1016/j.oceaneng.2024.118738
6. Wang H. HA-RRT: A heuristic and adaptive RRT algorithm for ship path planning / H. Wang, S. Chen, Z. Liu et al. // Ocean Engineering. — 2025. — № 316. — DOI: 10.1016/j.oceaneng.2024.119906
7. Guzelbulut C. Artificial Neural Network-Based Route Optimization of a Wind-Assisted Ship / C. Guzelbulut, T. Badalotti, Y. Fujita et al. // Journal of Marine Science and Engineering. — 2024. — № 2077–1312. — DOI: 10.3390/jmse12091645
8. Yudin Yu.I. Matematicheskie modeli ploskoparallel'nogo dvizheniya sudna. Klassifikaciya i kriticheskij analiz [Mathematical Models of Plane-Parallel Vessel Motion: Classification and Critical Analysis] / Yu.I. Yudin, I.I. Sotnikov // MSTU Bulletin. — 2006. — № 1560–9278. [in Russian]
9. Zhivulin E.A. Raschet traektorii obxoda dvizhushhegosya sudna s cel'yu e'konomii topliva [Calculating a trajectory to avoid a moving vessel to save fuel] / E.A. Zhivulin, V.M. Grishkin // Management processes and sustainability. — 2023. — № 2313–7304. — P. 56–64. [in Russian]
10. Kolpin R.V. Metod samonavedeniya pogoni [Homing method of pursuit] / R.V. Kolpin, K.A. Tyamin, A.A. Chudakov // Current research. — 2022. — № 2713–1513. [in Russian]
11. Kurkotkin V.I. Samonavedenie raket [Homing missiles] / V.I. Kurkotkin, V.L. Sterligov. — Moscow: Voenizdat, 1963. — 89 p. [in Russian]
12. Pan'kov S.Ya. Teoriya i metodika upravleniya aviaciej [Theory and methodology of aviation management] / S.Ya. Pan'kov, Yu.E. Zaburaev, A.M. Matveev. — Ul'yanovsk: UVAU GA, 2006. — 209 p. [in Russian]