Научные труды Дальрыбвтуза. 2026. Том 76, № 2. С. 138–144.

РЫБНОЕ ХОЗЯЙСТВО, АКВАКУЛЬТУРА И ПРОМЫШЛЕННОЕ РЫБОЛОВСТВО

Научная статья
УДК 639.2 + 519.876.5 DOI: doi.org/10.48612/dalrybvtuz/2026-76-15 EDN: QUGXUD

Разработка методики расчёта оптимального распределения конических ловушек на палубе судна

Василий Владимирович Кудакаев
Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет, Владивосток, Россия
kudakaev_v@mail.ru

Аннотация. Определяется необходимость формализации задачи оптимального размещения ловушек на палубе промыслового судна для последующей алгоритмизации и автоматизации процесса. Проблема заключается в отсутствии комплексной математической модели, учитывающей геометрические ограничения, специфику размещения ловушек на промысловой палубе во время перехода судов и ведения промысла. Выполнена разработка математической модели задачи размещения конических ловушек на палубе, представленной в виде прямоугольной области, форму рабочей зоны можно конфигурировать с помощью препятствий произвольной формы. Методы исследования включают формализацию ограничений, разработку целевых функций, построение геометрических моделей препятствий. Результаты представлены в виде системы уравнений и неравенств, описывающих условия корректного размещения. Предложенная модель адекватно описывает практическую задачу и может служить основой для разработки оптимизационных алгоритмов.

Ключевые слова: математическая модель, размещение конусных ловушек, геометрические ограничения, целевая функция, условия коллизии, палубное пространство, ловушечное рыболовное судно, оптимизационная задача

Для цитирования: Кудакаев В. В. Разработка методики расчёта оптимального распределения конических ловушек на палубе судна // Научные труды Дальрыбвтуза. 2026. Т. 76, № 2. С. 138–144.

Scientific Journal of the Far Eastern State Technical Fisheries University. 2026. Vol. 76, no. 2. P. 138–144.

FISHERIES, AQUACULTURE AND INDUSTRIAL FISHERIES

Original article

Development of a calculation methodology for the optimal layout of conical pots on a vessel's deck

Vasilii V. Kudakaev
Far Eastern State Technical Fisheries University, Vladivostok, Russia
kudakaev_v@mail.ru

Abstract. This study is motivated by the need to formalize the problem of optimally placing pots on a fishing vessel's deck for subsequent algorithmization and process automation. The core issue lies in the absence of a comprehensive mathematical model that accounts for geometric constraints and the specifics of trap arrangement on the working deck during both vessel transit

© Кудакаев В. В., 2026

and fishing operations. The paper presents the development of a mathematical model for placing conical traps on a deck represented as a rectangular area. The shape of the working zone can be configured using obstacles of different form. The research methods involve the formalization of constraints, the development of objective functions, and the construction of geometric models for the obstacles. The results are presented as a system of equations and inequalities describing the conditions for correct placement. The proposed model adequately describes the practical problem and can serve as a basis for developing optimization algorithms.

Keywords: mathematical model, placement of conical pots, geometric constraints, objective function, collision constraints, deck space, pot fishing vessel, optimization problem

For citation: Kudakaev V. V. Development of a calculation methodology for the optimal layout of conical pots on a vessel's deck. *Scientific Journal of the Far Eastern State Technical Fisheries University*. 2026; 76(2):138–144. (In Russ.).

Введение

Задача оптимального размещения объектов на ограниченной площади является классической проблемой исследования операций и вычислительной геометрии. В контексте судов, занимающихся промыслом с использованием конусных ловушек, эта задача приобретает специфические особенности, связанные с конусной формой ловушек, наличием разнообразных препятствий на палубе и другими требованиями. Математическая формализация данной задачи необходима для последующей разработки эффективных алгоритмов и программного обеспечения.

В существующих исследованиях рассматриваются различные аспекты задач упаковки [1, 2], однако комплексная модель, учитывающая все особенности размещения ловушек на палубе рыболовного судна, отсутствует. Большинство работ фокусируется либо на задаче упаковки кругов в прямоугольник без препятствий [1, 2], либо на размещении прямоугольных объектов, либо не учитывают требования минимальных расстояний между объектами. В то же время в области промышленного рыболовства моделируются элементы крабовой ловушки [3, 4, с.198], процессы выборки ловушек [5, 6], но не рассматривается задача их оптимального размещения на палубе. Известные работы по компьютерному моделированию упаковки объектов различной формы [7], [8], [9] послужили основой для идеи данного исследования, направленного на заполнение пробела в области автоматизации размещения конусных ловушек на палубе добывающего судна.

Целью данного исследования является разработка комплексной математической модели задачи размещения конических ловушек на палубе судна.

Для выполнения исследования поставлены следующие задачи:

1) формализация области размещения и ограничивающих условий;

2) разработка математических моделей препятствий различной геометрической формы (прямоугольники, окружности, равнобедренные и прямоугольные треугольники);

3) формулировка условий корректного размещения ловушек;

4) определение целевых функций для оптимизации.

Методы исследований

Математическая модель разрабатывалась на основе различных условий размещения ловушек на палубах рыболовных судов. Исследование проводилось методами аналитической геометрии, теории оптимизации и дискретной математики.

Исходные данные для моделирования включают: геометрические параметры палубы, размеры и форму ловушек, минимальные допустимые расстояния, параметры препятствий. В качестве математического аппарата использовались: векторная алгебра для описания геометрических преобразований, неравенства для формулировки ограничений, булевы переменные для описания дискретных решений.

Результаты и их обсуждение

Область размещения конусных ловушек

Палуба рыболовного судна моделируется как прямоугольная область в декартовой системе координат и может быть задана формулой

$$\Omega = \{(x, y) \in R^2 \mid 0 \le x \le W, 0 \le y \le L\}, \quad (1)$$

где W – ширина палубы;

L – длина палубы;

R – радиус ловушек, которые представляются как круги фиксированного.

Каждая i-я ловушка характеризуется координатами центра (x_i, y_i).

Модели препятствий

Препятствия на палубе (промысловые механизмы, надстройки, различные люки и оборудование) могут иметь различную геометрическую форму. В текущей модели препятствия приставлены в виде прямоугольников, окружностей, прямоугольных и равнобедренных треугольников. Для каждого типа препятствия разработана соответствующая математическая модель.

Прямоугольное препятствие задается координатами центра (x_j, y_j), шириной w_j, высотой h_j и углом поворота φ_j. Область, занятая препятствием, описывается системой неравенств после применения преобразования поворота:

$$(x - x_j)\cos\varphi_j + (y - y_j)\sin\varphi_j \le \frac{w_j}{2}, \quad (2)$$

$$-(x - x_j)\sin\varphi_j + (y - y_j)\cos\varphi_j \le \frac{h_j}{2}, \quad (3)$$

$$-(x - x_j)\cos\varphi_j - (y - y_j)\sin\varphi_j \le \frac{w_j}{2}, \quad (4)$$

$$(x - x_j)\sin\varphi_j - (y - y_j)\cos\varphi_j \le \frac{h_j}{2}. \quad (5)$$

Треугольное препятствие моделируется как выпуклый многоугольник с тремя вершинами. Для равнобедренного треугольника с основанием b_j и высотой h_j координаты вершин описываются как

$$V_1 = \left(x_j, y_j - \frac{h_j}{2}\right), \quad (6)$$

$$V_2 = \left(x_j + \frac{b_j}{2}, y_j + \frac{h_j}{2}\right), \quad (7)$$

$$V_3 = \left(x_j - \frac{b_j}{2}, y_j + \frac{h_j}{2}\right). \quad (8)$$

Принадлежность точки (x, y) треугольнику проверяется с помощью барицентрических координат или проверки знаков векторных произведений.

Для прямоугольного треугольника (прямой угол используется как центр) с длиной горизонтального катета a_j и вертикального b_j координаты вершин описываются как

$$V_1 = (x_j, y_j), \quad (9)$$

$$V_2 = (x_j + a_j, y_j), \quad (10)$$

$$V_3 = (x_j, y_j + b_j), \quad (11)$$

здесь V_1 – вершина прямого угла;

V_2 – конец горизонтального катета;

V_3 – конец вертикального катета.

Круглое препятствие (объекты на виде сверху в виде окружности) задается центром (x_j, y_j) и радиусом r_j. Условие принадлежности области препятствия описывается неравенством

$$(x - x_j)^2 + (y - y_j)^2 \le r_j^2 . \quad (12)$$

Условия корректного размещения ловушек

Для корректного размещения ловушек должны выполняться следующие условия: условие нахождения внутри палубы, условие отсутствия пересечения с препятствиями и условие минимального расстояния между ловушками.

Условие нахождения ловушки внутри палубы можно описать как

$$R \le x_i \le W - R, \quad R \le y_i \le L - R \forall_i \in \{1, \ ..., \ N\}. \quad (13)$$

Условие отсутствия пересечения с препятствиями. Для каждого препятствия j и каждой ловушки i должно выполняться условие непересечения.

Для круглых препятствий условие можно описать как

$$(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 \ge (R + r_j)^2 \forall_i \in i, \quad j . \quad (14)$$

Для прямоугольных препятствий условие непересечения формулируется через расстояние от центра ловушки до ближайшей точки прямоугольника. Если прямоугольник не повернут, условие имеет вид

$$|x_i - x_j| \ge \frac{w_j}{2} + R \quad или \quad |y_i - y_j| \ge \frac{h_j}{2} + R . \quad (15)$$

Для повернутых прямоугольников используется преобразование координат:

$$x' = (x_i - x_j)\cos\varphi_j + (y_i - y_j)\sin\varphi_j \ , \quad (16)$$

$$y' = -(x_i - x_j)\sin\varphi_j + (y_i - y_j)\sin\varphi_j \ , \quad (17)$$

$$|x'| \ge \frac{w_j}{2} + R \quad или \quad |y'| \ge \frac{h_j}{2} + R \ . \quad (18)$$

Условие минимального расстояния между ловушками можно записать как

$$(x_i - x_k)^2 + (y_i - y_k)^2 \ge (2R + \delta)^2 \forall i \ne k, . \quad (19)$$

где δ – минимальное допустимое расстояние между i-й и k-й ловушками.

Целевые функции могут быть сформулированы в зависимости от практических требований.

Функцию *максимизации количества ловушек* можно сформулировать как

$$F_1 = N \to \max , \quad (20)$$

где N – количество размещенных ловушек.

Функцию *максимизации заполнения пространства* можно сформулировать как

$$F_2 = \frac{N\pi R^2}{(W \times L - S_{obstacles})} \to \max , \quad (21)$$

где $S_{obstacles}$ – суммарная площадь, занятая препятствиями.

Функцию *минимизации свободного пространства* можно сформулировать как

$$F_3 = W \times L - N\pi R^2 - S_{obstacles} \to \min . \quad (22)$$

Задача размещения ловушек полностью математически может быть сформулирована как задача условной оптимизации:

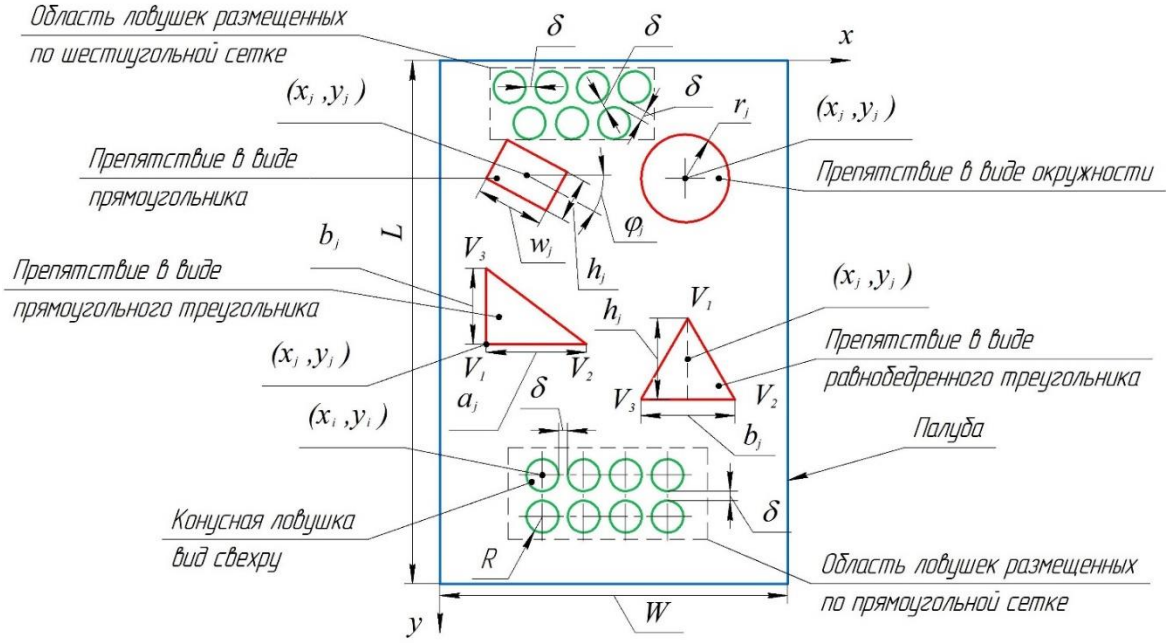
- найти $\{x_i, y_i\}, \ i = 1, \ ..., N$;

- целевая функция: F_1 (или F_2, F_3) $\to extr$;

- при ограничениях: (14), (15), (19),

где N может быть фиксированным или переменным, подлежащим оптимизации.

Геометрическая интерпретация разработанной математической модели представлена на рисунке.



Геометрическая интерпретация разработанной модели. Составлено автором
Geometric interpretation of the developed model. Compiled by the author

Как обозначено в рисунке, для заполнения промысловой палубы конусными ловушкам предлагается использовать алгоритмы, описанные в работах [1, 2], применяемых для задач упаковки окружностей в прямоугольник по прямоугольной и шестиугольной сеткам.

В таблице представлены основные параметры математической модели.

Основные параметры математической модели для размещения конических крабовых ловушек на палубе рыболовного судна

Basic parameters of the mathematical model for placing conical crab traps on the deck of a fishing vessel

Параметр	Обозначение	Единица измерения
Ширина палубы	W	м
Длина палубы	L	м
Радиус ловушки	R	м
Минимальное расстояние	δ	м
Координаты центра ловушки i	(x_i, y_i)	м
Координаты центра препятствия j	(x_j, y_j)	м

Разработанная математическая модель адекватно описывает практическую задачу размещения ловушек на палубе рыболовного судна. Модель учитывает основные факторы, влияющие на размещение: геометрические ограничения палубы, наличие препятствий различной формы, требования к минимальным расстояниям между ловушками.

К сильным сторонам модели относятся:

1) универсальность, т.е. возможность описания препятствий различной геометрической формы;

2) полнота, т.е. учет всех основных ограничений;

3) гибкость, т.е. возможность использования различных целевых функций в зависимости от практических требований.

В данной интерпретации модель имеет следующие ограничения:

1) предположение о жесткости ловушек и препятствий;

2) не учтены динамические факторы (движение судна, ветровая нагрузка и т.д.);

3) предположение о двухмерности задачи (не учитывается высота расположения объектов).

Практическое применение модели включает:

1) использование в качестве основы для разработки алгоритмов автоматического размещения конусных ловушек;

2) использование для обоснования выбора нижнего кольца конусных ловушек при проектировании и эксплуатации;

3) применение в учебном процессе для обучения методам оптимизации.

Возможные варианты направления развития полученной модели:

1) учет трехмерности объектов;

2) включение динамических ограничений;

3) учет неконической формы ловушек;

4) разработка стохастической модели для учета неопределенностей в параметрах.

Заключение

В рамках данного исследования была успешно разработана комплексная математическая модель для решения актуальной практической задачи оптимизации размещения конических ловушек на ограниченном пространстве промысловой палубы судна.

Основным научным результатом работы является формализованная постановка задачи условной оптимизации, которая включает:

- математическое описание рабочей области (палубы) как прямоугольника с возможностью конфигурации;
- универсальные геометрические модели препятствий различной формы (прямоугольники, треугольники, окружности), что повышает адекватность модели реальным условиям;
- систему детерминированных ограничений, гарантирующих корректность размещения ловушек, их нахождение в пределах палубы, отсутствие коллизий с препятствиями и соблюдение минимальных расстояний между объектами;
- набор альтернативных целевых функций (максимизация количества, заполненной площади, минимизация свободного пространства), позволяющих адаптировать модель под конкретные эксплуатационные сценарии.

Предложенная модель восполняет существующий пробел в области автоматизации, предлагая математический аппарат для задач палубного планирования, в отличие от предыдущих работ, фокусировавшихся на вопросах проектирования или технологических процессах.

Практическая значимость модели заключается в том, что она служит готовым фундаментом для создания программных решений и алгоритмов (например, на основе метаэвристик), направленных на автоматическое или полуавтоматическое планирование загрузки палубы. Внедрение таких решений позволит повысить эффективность использования пространства и, как следствие, экономические показатели работы промыслового флота. Кроме того, модель может быть использована для обоснования конструктивных параметров орудий лова на этапе проектирования.

Перспективы дальнейшего развития разработанной модели связаны со снятием принятых упрощающих допущений и могут включать следующие направления: переход от двухмерной к трехмерной постановке задачи с учетом высоты объектов и их возможного штабелиро-

ваны; интеграция динамических факторов (качка судна, инерционные нагрузки) для повышения надежности размещения в реальных морских условиях; расширение библиотеки геометрических форм для моделирования ловушек и препятствий произвольной неконической формы; разработка стохастической версии модели, учитывающей неопределенности в параметрах размещения и внешних условиях.

Представленная работа вносит вклад как в теоретическую область исследования операций и вычислительной геометрии, так и в прикладную сферу промышленного рыболовства, открывая путь к созданию интеллектуальных систем поддержки принятия решений для экипажей судов и судовладельцев.

Список источников

1. Kennedy T. Compact Packings of the Plane with Two Sizes of Discs // Discrete & Computational Geometry. 2005. Vol. 33, no. 2. P. 255–267.

2. Heppes A. Some Densest Two-Size Disc Packings in the Plane // Discrete & Computational Geometry. 2003. Vol. 30, no. 2. P. 241–262.

3. Габрюк В. И., Бобиков А. В. Моделирование ловушек для лова крабов, креветок и трубачей // Известия ТИНРО. 2007. Т. 149. С. 379–393. EDN JJYWYB.

4. Габрюк В. И. Математическое моделирование орудий рыболовства и рыболовных систем (траловой, ярусной и ловушечной). Владивосток : ДВФУ, 2024. 496 с.

5. Осипов Е. В. Моделирование процессов выборки ловушечных крабовых порядков с больших глубин // Рыбное хозяйство. 2023. № 2. С. 101–103.

6. Осипов Е. В., Карпелев Т. П. Повышение эффективности выборки крабовых ловушечных порядков // Рыбное хозяйство. 2025. № 1. С. 116–120.

7. Совертков П. И., Печугина Д. В. Компьютерное моделирование расположения груш в сушилке // Информатика в школе. 2024. № 1. С. 70–-76.

8. Гимади, Э. Х. Задача упаковки в контейнеры: асимптотически точный подход / Э. Х. Гимади, В. В. Залюбовский // Известия высших учебных заведений. Математика. 1997. № 12. С. 25–33. EDN HQUVJB.

9. Enkhbat, R. Convex Maximization Formulation of General Sphere Packing Problem // The Bulletin of Irkutsk State University. Series: Mathematics. 2020. Vol. 31. P. 142–149. DOI 10.26516/1997-7670.2020.31.142. EDN YYFMSV.

Сведения об авторе

В. В. Кудакаев – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Промышленное рыболовство».

Information about the author

V. V. Kudakaev – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Industrial Fisheries.

Статья поступила в редакцию 10.02.2026; одобрена после рецензирования 28.03.2026; принята к публикации 11.05.2026.

The article was submitted 10.02.2026; approved after reviewing 28.03.2026; accepted for publication 11.05.2026.

© Кудакаев В. В., 2026.

«Разработка методики расчёта оптимального распределения конических ловушек на палубе судна» [Кудакаев В. В.] распространяется под лицензией Creative Commons Attribution (CC BY 4.0).