

УДК 629.123

DOI: 10.37890/jwt.vi75.357

Применение методов многокритериальной оптимизации для решения задачи проектирования судна

М.В. Китаев

ORCID: 0000-0001-5345-6333

И.А. Новосельцев

Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток, Россия

Аннотация. В статье рассмотрено применение методов одно- и многокритериальной оптимизации применительно к решению задачи оптимизации проектных характеристик судна. Выполнен анализ влияния частных критериев оптимальности на значения проектных характеристик и элементов судна. Рассмотрены наиболее известные методы многокритериальной оптимизации и численный пример их применения для решения задачи обоснования проектных характеристик судна с учетом требований к его свойствам и качествам. Выполнено сравнение результатов, полученных разными методами многокритериальной оптимизации между собой, а также с результатами однокритериальной оптимизации. На численном примере показано, что попытка поиска компромисса зачастую приводит ухудшению значений частных критериев оптимальности. Установлено, что применение методов многокритериальной оптимизации для решения задач проектирования судов позволяет лучше понять роль каждого частного критерия оптимальности и оценить степень его влияния на показатели функциональной эффективности и проектные характеристики.

Ключевые слова: методы оптимизации, проектирование судов, характеристики судна, критерии эффективности, принятие решений, многокритериальный подход

Application of multicriteria optimization methods for solving the problem of ship design

Maksim V. Kitaev

ORCID: 0000-0001-5345-6333

Igor A. Novoseltcev

Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia

Abstract. The article considers the application of single-and multi-criteria optimization methods in relation to solving the problem of optimizing the ship's design characteristics. The analysis of the influence of particular optimality criteria on the values of the design characteristics and elements of the ship has been carried out. The most well-known methods of multicriteria optimization and a numerical example of their application for solving the problem of substantiating the design characteristics of a vessel, taking into account the requirements for its properties and qualities, are considered.

The results obtained by different methods of multicriteria optimization are compared with each other, as well as with the results of single-criteria optimization. A numerical example shows that an attempt to find a compromise often leads to a deterioration in the values of particular optimality criteria. It has been established that the use of multi-criteria optimization methods for solving ship design problems makes it possible to understand the role of each particular optimality criterion better and assess the degree of its influence on functional efficiency indicators and design characteristics.

Keywords: optimization methods, ship design, ship characteristics, efficiency criteria, decision making, multi-criteria approach.

Введение

При проектировании судов для поиска оптимальных вариантов решений используют различные виды критериев. Как и в любом другом виде инженерной деятельности, в зависимости от целей и системного уровня задачи в качестве критериев могут рассматриваться технические, эксплуатационные и экономические показатели. В большинстве случаев экономические критерии рассматривают как основополагающие, так как именно на основе анализа экономических показателей на практике чаще всего определяют целесообразность создания того или иного объекта [1, 2].

Несмотря на большое количество публикаций и научных исследований, посвященных вопросам технико-экономического обоснования, к настоящему времени так и не создано единого (универсального) подхода к выбору критерия, который можно применять при проектировании судов и других объектов морской техники. Отсутствие единого критерия определяется тем фактом, что в различных экономических условиях для оценки эффективности проектируемого объекта морской техники используют разные методологические подходы и показатели эффективности [3 - 5].

Например, если исходить из того, что продукцией морского транспорта является перевозка, а основная деятельность судоходных компаний направлена на получение дохода (прибыли), то годовой доход вполне можно рассматривать в качестве основного критерия. Однако в некоторых случаях он может быть равен нулю, например, для военных кораблей, научно-исследовательских судов, ледоколов, судов обеспечения и др. Критерий приведенных затрат, широко применявшийся в условиях плановой экономики, также имеет ограниченную область применения, т.к. требует равенства срока службы и проектных характеристик (водоизмещения, мощности, грузоподъемности, годового объема перевозок и других показателей) сравниваемых судов. В условиях конкуренции при рыночном ценообразовании затраты конкретного перевозчика не всегда являются основой для формирования стоимости фрахта на заданном направлении перевозок.

Кроме того, существуют национальные (исторически обусловленные) предпосылки к формированию методик расчета и выбору перечня показателей сравнительной экономической эффективности объектов морской техники, характерные как для отечественной, так и для зарубежной практик проектирования [1 - 5]. Немаловажную роль в принятии проектных решений имеют субъективные оценки проектанта, инвестора или другого лица, ответственного за принятие решений (ЛПР), основанные на собственном опыте и интуиции [6].

В конечном счете, если подходить системно, то оценить эффективность и целесообразность создания такого сложного инженерного сооружения как судно, одним показателем просто невозможно т.к. на различных этапах его жизненного цикла (проектирование, постройка, эксплуатация и утилизация) используются различные по структуре, составу и количеству ресурсы, по-разному распределённые во времени и характеризующиеся разными по своей сути показателями, отражающими интересы проектанта, завода-строителя, судовладельца и инвестора. Вследствие этого критерии часто являются противоречивыми, а попытка учесть несколько показателей эффективности приводит к многокритериальности, т.е. к необходимости поиска компромисса и как следствие к неопределенности [6, 7].

Влияние критериев на характеристики и элементы судна

Наиболее понятными с позиций принятия решений являются однокритериальные задачи оптимизации [8]. Математическую модель однокритериальной задачи представим в следующем виде:

$$\begin{aligned}
 f(\mathbf{x}^*) &= \min f(\mathbf{x}), \\
 \mathbf{x} &\in X \\
 g(\mathbf{x}) &= 0, \quad i = 1, \dots, m, \\
 h(\mathbf{x}) &\leq 0, \quad j = 1, \dots, k \\
 \mathbf{x}_l &\leq \mathbf{x} \leq \mathbf{x}_u.
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

где \mathbf{x} – вектор значений оптимизируемых переменных $\mathbf{X} \in \mathbf{R}^n$; x_l и x_u – диапазоны изменения значений оптимизируемых переменных.

Модели вида (1) являются универсальными, т.к. позволяют учитывать линейные и нелинейные ограничения в виде равенств и неравенств, а также требования к значениям и диапазонам изменения оптимизируемых переменных, в качестве которых выступают характеристики и элементы проектируемого судна. Для поиска оптимальных решений используют методы первого, второго порядка, квазиньютоновские и др. алгоритмы [8].

С учетом специфики существующих алгоритмов оптимизации, как правило ориентированных на поиск минимума целевой функции, переход от задачи на поиск минимума к задаче на поиск максимума осуществляется путем замены знака $f(\mathbf{x})$ на $-f(\mathbf{x})$.

В настоящем исследовании на численном примере показано влияние различных критериев на значения функциональных показателей, проектных характеристик и элементов судна. Для получения результатов использовалась математическая модель проектирования навалочного судна, подробно рассмотренная в работе [9].

Для сравнительной оценки результатов оптимизации расчеты выполнены для одних и тех же исходных данных: тип судна – балкер, стоимость топлива - 500 долл./т., протяженность линии - 2500 миль, нормы грузообработки - 8000 тонн/сут.

Диапазоны изменения значений оптимизируемых переменных приняты следующие: $150 \leq L \leq 270$; $20 \leq B \leq 32$; $13 \leq H \leq 25$; $7 \leq T \leq 11,71$; $14 \leq V_s \leq 18$; $0,63 \leq C_b \leq 0,8$. Диапазон изменения расчетных значений дедвейта $25000 \leq DW \leq 500000$, остальные ограничения приняты как в работе [9].

В табл. 1 приведены результаты оптимизации, выполненной для различных критериев, в качестве которых рассматривались следующие показатели: f_1 – строительная стоимость судна (I , млн. долл.); f_2 – транспортные расходы TRC , долл./т.; f_3 – годовые эксплуатационные расходы (C , млн. долл.); f_4 – годовой грузооборот одного судна (Q , млн. т./год); f_5 – водоизмещение судна порожнем (D_0 , тонн).

Таблица 1

Результаты оптимизации характеристик и элементов судна

Критерий	Минимум f_1	Минимум f_2	Минимум f_3	Максимум f_4	Минимум f_5
I , млн. долл.	12,519	19,700	12,905	28,761	12,801
TRC , долл./т.	17,74	14,03	16,56	23,27	19,75
C , млн. долл.	6,845	8,344	6,406	16,716	7,597
Q , млн. т. /год	0,386	0,595	0,387	0,718	0,385
D_0 , тонн.	5426	11216	5983	13021	5277

Значения проектных характеристик и элементов					
L , м	153,85	222,49	166,46	222,49	150,00
B , м	25,64	32,00	27,74	32,00	24,10
H , м	13,84	15,73	13,84	15,73	13,84
T , м	10,39	11,71	10,39	11,71	10,39
V_s , уз.	14,00	14,00	14,00	18	14
C_b	0,72	0,69	0,63	0,80	0,78
DW , т.	25000	47966	25000	55343	25000
N , кВт	5540	6480	4635	24910	6753

Из анализа табл. 1 следует, что в зависимости от критерия оптимальности суда претенденты отличаются характеристиками, главными размерениями, экономическими и функциональными показателями. Так судно, спроектированное по критерию минимума строительной стоимости, отличается от альтернативных вариантов наименьшими значениями водоизмещения, мощности энергетической установки, скорости и главных размерений.

При поиске минимума показателя, характеризующего транспортные (рейсовые) расходы получено судно, имеющее наибольшие значения проектных характеристик и главных размерений, скорость хода ограничена нижним пределом ограничений.

При минимизации годовых эксплуатационных расходов решением является судно, отличающееся от альтернативных вариантов минимальной мощностью энергетической установки, дедвейтом, скоростью и общей полнотой.

Оптимизация по годовому грузообороту приводит к максимально возможному увеличению значений проектных характеристик и элементов, что приводит к значительному росту строительной стоимости и себестоимости перевозок.

Решение, полученное в результате поиска минимума водоизмещения порожнем, характеризует вариант с наименьшими значениями главных размерений.

Таким образом, однокритериальный подход дает однозначный результат в случае принятия в качестве основного какого-либо одного из локальных критериев оптимальности, т.е. позволяет получить вариант судна, который характеризуется определенным сочетанием проектных характеристик и элементов. В результате выполненных расчетов установлено, что в случае независимости частных критериев оптимальности невозможно получить вариант судна, который бы являлся наилучшим по нескольким критериям оптимальности одновременно. Это видно из данных табл. 1.

При рассмотрении нескольких показателей эффективности перед проектантом возникает проблема выбора оптимального варианта судна, заключающаяся в наличии нескольких альтернативных вариантов проектных решений, отличающихся характеристиками, элементами и эксплуатационно-экономическими показателями. В этом случае желание найти компромиссный вариант приводит к необходимости решать проектную задачу в многокритериальной постановке.

Рассмотрим и проанализируем влияние критериев и методов многокритериальной оптимизации на значения показателей функциональной эффективности, проектных характеристик и главных размерений судна сравнив их с значениями, полученными при решении проектной задачи в однокритериальной постановке.

Многокритериальный подход

Результаты, полученные в предыдущем разделе, подтверждают тот факт, что задачи проектирования сложных технических систем, к которым относятся суда, целесообразно рассматривать и решать в многокритериальной постановке, когда различные варианты проектных решений оцениваются посредством анализа совокупности частных критериев оптимальности f_1, \dots, f_m . Переход к многокритериальности обусловлен желанием проектанта найти компромисс. Как правило, такие задачи рассматриваются в рамках теории принятия решений и

обладают спецификой (в сравнении с однокритериальными) в части поиска оптимального варианта.

В общем случае многокритериальные задачи не имеют строгого математического решения, несмотря на многообразие методов их решения. Проблема состоит в неопределенности выбора критерия, удовлетворяющего запросы всех участников процесса проектирования судна и неоднозначности оптимального решения, т.к. критерии могут быть противоречивыми, разнонаправленными (в одной и той же точке один из критериев может достигать максимума, а другой минимума) и иметь разную размерность и др.

Многокритериальную задачу оптимизации запишем в виде:

$$\begin{cases} F(\mathbf{x}) \rightarrow \max \\ \mathbf{x} \in D \end{cases}, \quad (2)$$

где D - область допустимых решений; \mathbf{x} – вектор оптимизируемых переменных; $F(\mathbf{x}) = (f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x}), \dots, f_k(\mathbf{x}))$ – векторная целевая функция; $f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x}), \dots, f_k(\mathbf{x})$ – скалярные целевые функции (характеризуют частные критерии оптимальности) векторного аргумента \mathbf{x} .

Суть большинства методов многокритериальной оптимизации состоит в сведении многокритериальной задачи к однокритериальной. Наиболее известными являются следующие [10, 11]:

- метод главного критерия;
- метод свертывания критериев;
- метод равномерной оптимальности;
- метод идеальной точки;
- метод последовательных уступок;
- метод справедливого компромисса;
- метод группировки критериев;
- и др.

Для иллюстрации многокритериального подхода рассмотрим применение некоторых из вышеуказанных методов применительно к решению задачи оптимизации характеристик судна и сравним полученные результаты. Для сокращения объема вычислений за основу возьмем только три основных критерия: f_1 – строительная стоимость судна (I , млн. долл.); f_3 – годовые эксплуатационные расходы (C , млн. долл.); f_4 – годовой грузооборот одного судна (Q , млн. т./год).

Для нормализации критериев использовалась формула [11]:

$$\bar{f}_j = \frac{f_j(\mathbf{x}) - f_j^{\min}}{f_j^{\max} - f_j^{\min}}, j = 1, \dots, n. \quad (3)$$

Значения составляющих в формуле (3) рассчитываются следующим образом:

$$f_j^{\max} = \max_{\mathbf{x} \in D} f_j(\mathbf{x}), f_j^{\min} = \min_{\mathbf{x} \in D} f_j(\mathbf{x}), f_j^{\max} \neq f_j^{\min} \quad (4)$$

В табл. 2 приведены предельные (максимальные и минимальные) значения принятых в качестве основных критериев оптимальности, вычисленные по формуле (4).

Таблица 2

Предельные значения рассматриваемых критериев

Критерий	Обозн.	Максимальное значение	Минимальное значение
Строительная стоимость судна, млн. долл.	f1	29,92	12,52
Годовые эксплуатационные расходы, млн. долл.	f3	22,07	6,40
Годовой грузооборот, млн. тонн/год	f4	0,718	0,382

Кратко охарактеризуем основные методы решения многокритериальных задач.

Согласно методу равномерной оптимальности лучшей считается альтернатива, которая обладает максимальной суммой частных критериев оптимальности [11]:

$$f^*(\mathbf{x}) = \sum_{j=1}^n \bar{f}_j(\mathbf{x}) \rightarrow \max. \quad (5)$$

Согласно методу справедливого компромисса выбор лучшей альтернативы осуществляется на основе максимального значения произведения частных критериев [11]:

$$f^*(\mathbf{x}) = \prod_{j=1}^n \bar{f}_j(\mathbf{x}) \rightarrow \max. \quad (6)$$

Метод свертывания критериев состоит в том, что каждому из анализируемых критериев присваивается весовой коэффициент, характеризующий степень его значимости. Наиболее часто используемым методом является аддитивная свертка критериев [11]:

$$f^*(\mathbf{x}) = \sum_{j=1}^n \alpha_j \bar{f}_j(\mathbf{x}) \rightarrow \max, \quad (7)$$

где $\sum_{j=1}^n \alpha_j = 1$ - весовые коэффициенты, характеризующие степень важности частных критериев оптимальности и определяющие предпочтения ЛПР.

Использование аддитивной свертки подразумевает, что при решении задачи с привлечением разных по квалификации и информированности специалистов, оценки значимость частных критериев оптимальности могут отличаться, следовательно результатом будут являться разные варианты проектных решений.

В случае использования метода идеальной точки решением является альтернатива, в которой вектор значений частных критериев оптимальности по норме минимально отличается от идеальной точки (точки утопии) [11]:

$$f^*(\mathbf{x}) = \sqrt{\sum_{j=1}^n (\bar{f}_j(\mathbf{x}) - f_j^*)^2} \rightarrow \min, \quad (8)$$

где $f^* = (\max_{x \in D} f_1(x), \max_{x \in D} f_2(x), \dots, \max_{x \in D} f_n(x))$ – вектор, состоящий из

максимальных значений частных критериев (идеальная точка) $f^* \notin D$.

Метод главного критерия также предполагает сведение многокритериальной задачи оптимизации к однокритериальной для этого один из частных критериев оптимальности принимается в качестве главного, а остальные переходят в разряд ограничений задаваемых ЛПР в числе исходных данных [11]:

$$\begin{aligned} f_j^*(\mathbf{x}) &= f_j(\mathbf{x}) \rightarrow \max, \\ f_j(\mathbf{x}) &\geq t_j, j = 2, \dots, n. \end{aligned}$$

где t_j – верхняя / нижняя границы частного критерия оптимальности.

В любом случае значения оптимизируемых переменных должны принадлежать множеству допустимых решений $\mathbf{x} \in D$.

В табл. 3 приведены результаты решения задачи оптимизации характеристик судна, полученные методом главного критерия, в качестве которого принят показатель, характеризующий годовые эксплуатационные расходы C (критерий f_3), а строительная стоимость I (критерий f_1) и годовой грузооборот судна Q (критерий f_4) выступали в качестве ограничений t_j .

Анализ результатов вычислений (см. табл. 3), говорит о том, что любые попытки поиска оптимального решения посредством использования дополнительных ограничений (в нашем случае к значениям годового грузооборота Q и строительной стоимости судна I) приводят к ухудшению главного критерия (f_3) по отношению к значению, полученному в результате решения однокритериальной задачи оптимизации (см. табл. 1). В то же время, значения частных показателей функциональной эффективности, принятые при решении задачи в качестве ограничений, могут быть улучшены, но только за счет ухудшения других показателей

(в том числе и главного критерия). Это говорит о том, что найденные решения являются оптимально-компромиссными, а соответствующие им значения вектора $x \in D$ характеризуют эффективные точки [12]. Полученные результаты подтверждают тот факт, что введение дополнительных ограничений не улучшает оптимального решения (не влияет на него), ухудшает оптимальное решение, либо создает несовместность [13]. Особенностью рассматриваемого метода, является то, что при определенном сочетании значений t_j формуле (9), характеризующих требования к Q и I , задача решений не имеет.

Таблица 3

Результаты многокритериальной оптимизации (метод главного критерия)

Обозначение	$I \leq 12,805$ $Q \geq 0,387$	$I \leq 12,705$ $Q \geq 0,387$	$I \leq 12,605$ $Q \geq 0,387$	$I \leq 12,905$ $Q \geq 0,396$	$I \leq 12,905$ $Q \geq 0,400$	$I \leq 12,805$ $Q \geq 0,396$
TRC, долл./т.	16,65	16,79	17,05	16,63	16,76	16,96
I, млн. долл.	12,805	12,705	12,605	12,905	12,905	12,805
C, млн. долл.	6,440	6,497	6,595	6,598	6,702	6,730
Q, млн. т./год	0,387	0,387	0,387	0,397	0,400	0,397
DW, т	25000	25021	25040	25914	26208	25938
N, кВт	4731	4866	5074	4998	5190	5265
L, м	164,32	161,82	158,73	162,43	160,56	158,90
B, м	27,39	26,97	26,46	27,07	26,76	26,48
H, м	13,84	13,85	13,85	14,01	14,06	14,01
T, м	10,39	10,39	10,39	10,51	10,54	10,51
Vs, уз.	14,00	14,00	14,00	14,00	14,00	14,00
Cb	0,64	0,66	0,69	0,67	0,69	0,70

Результаты решения многокритериальной задачи оптимизации характеристик судна, полученные с использованием рассмотренных выше методов, представлены в табл. 4.

Таблица 4

Результаты многокритериальной оптимизации

Обозначение	Метод равномерной оптимальности	Метод справедливого компромисса	Аддитивная свертка				Метод идеальной точки
			$\alpha_1 = 0,50$ $\alpha_2 = 0,25$ $\alpha_3 = 0,25$	$\alpha_1 = 0,25$ $\alpha_2 = 0,50$ $\alpha_3 = 0,25$	$\alpha_1 = 0,25$ $\alpha_2 = 0,25$ $\alpha_3 = 0,50$	$\alpha_1 = 0,33$ $\alpha_2 = 0,33$ $\alpha_3 = 0,33$	
F*	0,139	1,842	0,214	0,016	0,010	0,046	0,537
TRC, долл./т.	14,32	16,92	14,79	14,52	14,90	14,32	14,53
I, млн. долл.	17,513	24,179	21,488	15,667	15,401	17,507	18,863
C, млн. долл.	8,029	11,261	9,573	7,338	7,497	8,025	8,642
Q, млн. т./год	0,561	0,665	0,647	0,505	0,503	0,560	0,595
DW, т	43442	55073	55699	36781	36563	43413	48034
N, кВт	6572	11866	8828	5675	6086	6564	7506
L, м	192,00	222,49	222,49	181,43	175,53	192	200,55
B, м	32,00	32,00	32,00	30,24	29,25	32,00	32,00
H, м	15,73	19,58	15,73	15,73	15,69	15,73	15,73
T, м	11,71	11,71	11,71	11,71	11,69	11,71	11,71
Vs, уз.	14,00	15,10	14,04	14,00	14,00	14,00	14,00
Cb	0,712	0,80	0,793	0,677	0,716	0,711	0,753

Анализ значений, приведенных в табл. 4, говорит о том, что методы равномерной оптимальности и аддитивной свертки (при равных значениях весовых коэффициентов α_j) дают близкие по значениям проектных характеристик и показателей

функциональной эффективности результаты. В обоих случаях получено минимальное значение показателя TRC , которое, тем не менее, на 2,0 % превышает значение критерия f_2 в табл. 1.

Минимальное значение критерия f_3 , полученное методом аддитивной свертки при $\alpha = \{0,25, 0,50, 0,25\}$, больше значения полученного при решении однокритериальной задачи поэтому же показателю на 12,7 %.

Максимальный грузооборот получен в результате применения метода справедливого компромисса, однако полученное значение на 7,3 % меньше соответствующего показателя в табл. 1 (критерий f_4).

В результате применения метода идеальной точки для решения многокритериальной задачи получены осредненные по отношению к данным табл. 1 результаты.

Обобщая результаты выполненного исследования, можно сделать следующий вывод. Применение методов многокритериальной оптимизации позволяет лучше понять роль каждого из рассматриваемых частных критериев оптимальности и оценить степень их влияния на результаты оптимизации, характеризующиеся значениями проектных переменных и показателей функциональной эффективности судна. В результате поиска компромисса значения частных критериев оптимальности и других показателей функциональной эффективности судна будут отличаться от их оптимальных значений, полученных при однокритериальной оптимизации (как правило в худшую сторону). Т.е. увеличивая один показатель, мы уменьшаем другой. Попытка найти компромисс требует от ЛПР четкого понимания роли и важности каждого частного критерия оптимальности в задаче проектирования судна.

Заключение

В статье рассмотрено применение методов одно- и многокритериальной оптимизации для решения задачи оптимизации проектных характеристик судна. Выполнен анализ влияния частных критериев оптимальности на значения проектных характеристик и элементов. Рассмотрено применение наиболее часто используемых методов многокритериальной оптимизации, выполнено сравнение результатов, полученных разными методами между собой и с результатами однокритериальной оптимизации. На численном примере показано, что в результате поиска компромисса значения частных критериев оптимальности изменяются и отличаются от их оптимальных значений, полученных при решении задачи однокритериальной оптимизации (как правило не в лучшую сторону). Применение методов многокритериальной оптимизации для решения задач проектирования судов позволяет лучше понять роль каждого частного критерия оптимальности и оценить степень его влияния на показатели функциональной эффективности и проектные характеристики судна. Наиболее полезными в этом плане являются методы, позволяющие учитывать и варьировать предпочтения ЛПР по отношению к частным критериям оптимальности.

Список литературы

1. Бреслав Л.Б. Техничко-экономическое обоснование средств освоения Мирового океана. Л.: Судостроение, 1982. - 240 с.
2. Краев В.И. Экономическое обоснование при проектировании морских грузовых судов. Л.: Судостроение, 1981. -280 с.
3. Соколов В.П. Постановка задач экономического обоснования судов. Л.: Судостроение, 1987. 162 с.
4. Benford H. A naval architect's guide to practical economics. Department of naval architectute and marine engineering University of Michigan. 1991. 134 p.

5. Buxton I.L. Engineering economics and ship design. 3rd ed. (University of Newcastle upon Tyne, Dept of Marine Technology). BSRA, 1987, 143 p. <https://doi.org/10.1080/00137917208902718>.
6. Кини Р., Райфа Х. Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения / Пер. с англ. М.: Радио и связь, 1981. – 560 с.
7. Подиновский В.В. Многокритериальные задачи принятия решений: теория и методы анализа: учебник для вузов. - Москва: Издательство Юрайт, 2022. — 486 с.
8. Rao S.S. Engineering optimization: theory and practice. 4th ed. – New York: Wiley, 2009. – 813 p.
9. Китаев М.В., Тюфтяев Д.В., Тортыжева Д.А. Математическая модель проектирования грузового судна // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2022. № 4 (53). С. 42-58. DOI: <https://doi.org/10.24866/2227-6858/2022-4/42-58>
10. Царев В.В. Внутрифирменное планирование. - СПб.: Питер, 2002. - 496 с.
11. Кузин Б.И., Юрьев В.Н., Шахдинаров Г.М. Методы и модели управления фирмой. - СПб.: Питер, 2001. - 432 с.
12. Подиновский, В. В. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач. - Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2007. - 256 с.
13. Курицкий Б.Я. Оптимизация вокруг нас. - Л.: Машиностроение, 1989. - 144 с.

References

1. Breslav L.B. Tekhniko-ehkonomicheskoe obosnovanie sredstv osvoeniya Mirovogo okeana [Feasibility study of means for the development of ocean resources]. L.: Sudostroenie, 1982. 240 p. (In Russ).
2. Kraev V.I. Ehkonomicheskoe obosnovanie pri proektirovanii morskikh gruzovykh sudov [Economic substantiation for the design of marine cargo vessels]. L.: Sudostroenie, 1981. 280 p. (In Russ).
3. Sokolov V.P. Postanovka zadach ehkonomicheskogo obosnovaniya sudov [Statement of the problem of economic substantiation of vessels design]. L.: Sudostroenie, 1987. 162 p. (In Russ).
4. Benford H. A naval architect's guide to practical economics. Department of naval architecture and marine engineering University of Michigan. 1991. 134 p.
5. Buxton I.L. Engineering economics and ship design. 3rd ed. (University of Newcastle upon Tyne, Dept of Marine Technology). BSRA, 1987, 143 p. <https://doi.org/10.1080/00137917208902718>.
6. Kini R., Raifa KH. Prinyatie reshenii pri mnogikh kriteriyakh: predpochteniya i zameshcheniya [Decision making under many criteria: preferences and substitutions] / Per. s angl. M.: Radio i svyaz', 1981. 560 p.
7. Podinovskii, V.V. Mnogokriterial'nye zadachi prinyatiya reshenii: teoriya i metody analiza [Multicriteria decision-making problems: theory and methods of analysis]. - Moskva: Izdatel'stvo Yurait, 2022. 486 p. (In Russ).
8. Rao S.S. Engineering optimization: theory and practice. 4th ed. – New York: Wiley, 2009. – 813 p.
9. Kitaev M.V., Tyufyayev D.V., Tortyzheva D.A. Matematicheskaya model' proektirovaniya gruzovogo sudna [Mathematical model for cargo vessel design] Vestnik Inzhenernoi shkoly Dal'nevostochnogo federal'nogo universiteta. 2022. № 4 (53). pp. 42-58. (In Russ). DOI: <https://doi.org/10.24866/2227-6858/2022-4/42-58>
10. Tsarev V.V. Vnutrifirmennoe planirovanie [Intracompany planning]. - SPb.: Piter, 2002. 496 p. (In Russ).
11. Kuzin B.I., Yur'ev V.N., Shakhdinarov G.M. Metody i modeli upravleniya firmoi [Methods and models of firm management]. - SPb: Piter, 2001. 432 p. (In Russ).
12. Podinovskii V.V. Pareto-optimal'nye resheniya mnogokriterial'nykh zadach [Pareto-optimal solutions to multiobjective problems]. - Moskva: FIZMATLIT, 2007. 256 p. (In Russ).
13. Kuritskii B.YA. Optimizatsiya vokrug nas [Optimization is all around us]. - L.: Mashinostroenie, 1989. 144 p. (In Russ).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Китаев Максим Владимирович, к.т.н., доцент, департамент Морской техники и транспорта, Политехнический институт (Школа), Дальневосточный федеральный университет (ФГАОУ ВО «ДФУ»), 690922, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс-10, E-mail: kitaev.mv@dvfu.ru

Maksim V. Kitaev, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, department of Marine Engineering and Transport, Polytechnic Institute (School), Far Eastern Federal University, 10 Ajax Bay, Russky Island, Vladivostok, 690922

Новосельцев Игорь Александрович, аспирант, ассистент департамента Морской техники и транспорта, Политехнический институт (Школа), Дальневосточный федеральный университет (ФГАОУ ВО «ДФУ»), 690922, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс-10, e-mail: novoseltcev.ia@dvfu.ru

Igor A. Novoseltcev, postgraduate student, assistant of the department of Marine Engineering and Transport, Polytechnic Institute (School), Far Eastern Federal University, 10 Ajax Bay, Russky Island, Vladivostok, 690922

Статья поступила в редакцию 09.02.2023; опубликована онлайн 20.06.2023.
Received 09.02.2023; published online 20.06.2023.