

<http://dx.doi.org/10.15589/jnn20150102>

УДК 629.5.012

ЛІ 55

APPLICATION OF INTERIOR POINT METHOD FOR OPTIMIZATION OF CHARACTERISTICS OF CARGO SHIP WITH RESTRICTED SERVICE AREA

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ВНУТРЕННЕЙ ТОЧКИ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ХАРАКТЕРИСТИК ГРУЗОВОГО СУДНА ОГРАНИЧЕННОГО РАЙОНА ПЛАВАНИЯ

Le Thanh Binh

thanhbinh_ua@yahoo.com

ORCID: 0000-0003-4194-8829

Ли Тхань Бин,

асп.

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv

Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, г. Николаев

Abstract. The application of one of the modifications of the penalty function method (the interior point method) combined with the Kuhn-Tucker condition for optimization of characteristics of the cargo ship with restricted service area has been discussed. The expediency of renunciation of the classical penalty function method and the application of the interior point method associated with the introduction of slack variables is proved. Various ways of transforming the initial constrained extremal problem into the unconstrained one (solving the barrier problem) are considered. To solve the unconstrained optimization problem, the Newton method is used. Methods of the approximate determination of the Hessian matrix are discussed. Recommendations based on a large number of numerical experiments are given regarding the choice of coefficients used in the optimization algorithm. Recommendations on transforming the Lagrangian function if it is necessary are also given. The results of optimization calculations are given and analyzed.

Keywords: optimization of ship characteristics, interior point method, Kuhn-Tucker condition.

Аннотация. Рассмотрено применение одной из модификаций метода штрафных функций (метода внутренней точки) в сочетании с условием Куна–Таккера для оптимизации характеристик грузового судна ограниченного района плавания.

Ключевые слова: оптимизация характеристик судна; метод внутренней точки; условие Куна–Таккера.

Анотація. Розглянуто застосування однієї з модифікацій методу штрафних функцій (методу внутрішньої точки) разом з умовою Куна–Таккера для оптимізації характеристики вантажного судна обмеженого району плавання.

Ключові слова: оптимізація елементів судна; метод внутрішньої точки; умова Куна–Таккера.

REFERENCES

- [1] Sorokin V.I. Nekotorye osobennosti algoritma optimizatsii glavnykh elementov konteynerovozov [Some special features of the algorithm of the optimization of the main elements of containerships]. *Proektirovanie i konstruktсии sudov: Sbornik nauchnykh trudov NKI* [Collection of scientific works of MSI «Ships design and construction»], 1982, pp. 3–10.
- [2] Waltz R.A., Morales J.L., Nocedal J., Orban D. An interior algorithm for nonlinear optimization that combines line search and trust region steps. *Mathematical Programming*, 2006, vol. 107, no. 3, pp. 391–408.
- [3] Byrd R.H., Gilbert J.C., Nocedal J. A Trust Region Method Based on Interior Point Techniques for Nonlinear Programming. *Mathematical Programming*, 2000, vol. 89, no. 1, pp. 149–185.
- [4] Byrd R.H., Gribar M.E., Nocedal J. An Interior Point Algorithm for Large-Scale Nonlinear Programming. *SIAM Journal on Optimization*, 1999, vol. 9, no. 4, pp. 877–900.
- [5] Byrd R.H., Marazzi M., Nocedal J. On the convergence of Newton iterations to non-stationary points. *Mathematical Programming*, 2004, Series A, 99, pp. 127–148.
- [6] El-Hallabi M. *A hybrid algorithm for nonlinear equality constrained optimization problems: global and local convergence theory*. Technical Report TR4-99, Mathematics and Computer Science Department, Institut National des Postes et Télécommunications, Rabat, Morocco, 1999.
- [7] Karmarkar N.K. A new polynomial time algorithm for linear programming. *Combinatorica*, 1984, vol. 4, pp. 373–395.

- [8] Nocedal S.J. *Wright. Numerical optimization, Springer Science + Business Media*. New-York, 2006, 683 p.
- [9] Waltz R.A., Morales J.L., Nocedal J., Orban D. An interior algorithm for nonlinear optimization that combines line search and trust region steps. *Mathematical Programming*, 2006, vol. 107, no. 3, pp. 391–408.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Задача оптимизации главных характеристик проектируемого судна решается с использованием численных нелинейных алгоритмов оптимизации в два этапа. Первый этап – преобразование оптимизационной задачи, содержащей ограничения, в задачу без ограничений. Для этой цели применяются методы внешних и внутренних штрафных функций, а также метод модифицированных функций Лагранжа. Метод внутренних штрафных функций предусматривает введение так называемых фиктивных переменных, тогда как разновидность этого метода носит название «метод внутренней точки» (Interior Point Method). Во всех перечисленных случаях полученная таким образом новая оптимизируемая функция включает в себя как исходную целевую функцию, так и все ограничения. Она строится с таким расчетом, чтобы нарушение ограничений в процессе оптимизации резко отдаляло ее значение от оптимума, и тогда оптимальное решение окажется одновременно и допустимым (удовлетворяющим всем ограничениям).

Второй этап представляет собой поиск точки оптимума в безусловной (не содержащей ограничений) оптимизационной задаче. Для этой цели, как известно, применяются три группы методов: методы нулевого, первого и второго порядка.

Методы внутренних штрафных функций, не предусматривающие введения фиктивных переменных, широко использовались в задачах нелинейного программирования в 1960-х годах. Однако их применение для линейного программирования даже не рассматривалось, поскольку здесь считалось единственно возможным применение симплекс-метода, который позволяет получить оптимальное решение линейной задачи в конечном виде. В 1970-х гг. методы внутренних штрафных функций были заменены более эффективным методом модифицированных функций Лагранжа. После этого до начала 1980-х годов методы внутренних штрафных функций считались в значительной степени потерявшими актуальность.

Однако в 1984 г. Кармаркар [7] применил для решения задачи линейного программирования модифицированный численный метод внутренних штрафных функций, связанный с введением фиктивных неизвестных (метод внутренней точки). Этот метод оказался во много раз быстрее симплекс-метода. Он стал использоваться и в задаче нелинейного программирования. В сочетании с применением методов второго порядка для решения задач безусловной оптимизации этот метод считается в настоящее время наиболее эффективным.

В то же время автору неизвестны примеры применения данных методов в задачах оптимального проектирования судов. Решение задачи оптимизации главных характеристик грузового судна ограниченного района плавания на основе метода внутренней точки в сочетании с применением методов второго порядка является решаемой в данной работе проблемой.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Пример применения стандартного метода штрафных функций для оптимизации характеристик судна-контейнеровоза приведен в [1]. Использование более эффективной в вычислительном отношении модификации метода штрафных функций – метода внутренней точки – для решения задачи линейного программирования рассмотрено в [7]. Применение этого же метода в задаче нелинейного программирования рассмотрено в [2–4, 8]. Однако автору неизвестны примеры практического использования этого метода в задаче оптимизации характеристик проектируемого судна.

ЦЕЛЬЮ РАБОТЫ является обоснование применения метода внутренней точки в задаче оптимизации главных характеристик судна.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Задача оптимального проектирования судов относится к классу задач нелинейного программирования и формулируется таким образом:

$$\bar{X}_0 = \arg \min_{\bar{X} \in \bar{X}_d} F(\bar{X});$$

$$\bar{X}_d : h_i(\bar{X}) = 0, i = 1, \dots, k; \quad (1)$$

$$g_j(\bar{X}) < 0, j = 1, \dots, m;$$

где \bar{X} – вектор оптимизируемых переменных; \bar{X}_d – допустимые (удовлетворяющие всем ограничениям) значения вектора оптимизируемых переменных; $F(\bar{X})$ – целевая функция (прибыль в течение срока службы); $h_i(\bar{X})$ и $g_j(\bar{X})$ – ограничения в виде равенств и неравенств, приведенные к безразмерному виду; k, m – количества ограничений типа равенств и типа неравенств соответственно.

В данной задаче $\{\bar{X}\} = L, B, T, H, \delta, v_s$, где L, B, T, H, δ, v_s – длина, ширина, осадка, высота борта, коэффициент общей полноты и скорость полного хода в узлах проектируемого грузового судна ограниченного района плавания. Суть метода штрафных функций состоит в том, что задача (1) трансформируется к виду

$$\bar{X}_0 = \arg \min_{\bar{X}} \{F(\bar{X}) + \Delta F[\bar{X}, h_i(\bar{X}), g_j(\bar{X})],$$

где $F(\bar{X})$ – то же, что и в (1), а $\Delta F[\bar{X}, h_i(\bar{X}), g_j(\bar{X})]$ есть и функция \bar{X} , $h_i(\bar{X})$, и $g_j(\bar{X})$ (штрафная надбавка).

В литературе известен ряд предложений по выбору штрафной надбавки $\Delta F[\bar{X}, h_i(\bar{X}), g_j(\bar{X})]$. Одно из таких предложений было использовано при оптимизации характеристик судов-контейнеровозов в [1]. В других случаях предлагалось принимать

$$\Delta F(\bar{X}, h_i(\bar{X}), g_j(\bar{X})) = -\mu \sum_{j=1}^m \ln g_j(\bar{X}),$$

где μ – штрафной коэффициент.

Иногда штрафная функция, принятая в этой форме, носит название барьерная функция [2, 3, 7], а задача поиска оптимального решения по этому методу – барьерная задача или барьерная проблема.

Однако такая модификация метода внутренних штрафных функций не является достаточно эффективной. Перейдем к такой модификации указанного метода, которая связана с введением фиктивных неизвестных и носит название метод внутренней точки. В этом случае в задаче (1) ограничения типа неравенств преобразуются в ограничения типа равенств путем введения вектора фиктивных неизвестных \bar{S} , $\{\bar{S}\} = (s_1, s_2, \dots, s_m)$ и вводится новый вектор подлежащих определению величин $\bar{Z} = \bar{X} \cup \bar{S}$. Тогда эта задача трансформируется к виду

$$\begin{aligned} \bar{Z}_0 &= \arg \min_{Z \in Z_d} \Phi(\bar{Z}); \\ \Phi(\bar{Z}) &= F(\bar{X}) - \mu \sum_{i=1}^m \ln s_i; \\ \bar{Z}_d : \quad h_i(\bar{X}) &= 0, \quad i = 1, \dots, k; \\ v_j(\bar{Z}) &= 0, \quad j = 1, \dots, m; \\ s_j &> 0, \quad j = 1, \dots, m; \\ \forall j \in 1, m : v_j(\bar{Z}) &= g_j(\bar{X}) + s_j. \end{aligned} \quad (2)$$

Далее задача (2) преобразуется в задачу безусловной оптимизации, когда минимизируется функция Лагранжа $L_F = L_F(\bar{Z}, \bar{\Lambda}, \mu)$ вида

$$\begin{aligned} Z_0 &= \arg \min_{Z \in Z_d} L_F(Z, \lambda, \mu); \\ L_F(Z, \lambda, \mu) &= \Phi(Z, \mu) + \langle H(Z), \lambda_H \rangle + \langle V(Z), \lambda_V \rangle; \\ \{\bar{H}(\bar{X})\} &= h_i(\bar{X}), \quad i = 1, \dots, k; \quad \{V(\bar{Z})\} = v_j(\bar{Z}), \quad j = 1, \dots, m, \end{aligned} \quad (3)$$

где $\bar{\Lambda} = \bar{\Lambda}_H \cup \bar{\Lambda}_V$ – вектор множителей Лагранжа; $\{\bar{\Lambda}_H\} = \lambda_{hi}, i = 1, \dots, k$ и $\{\bar{\Lambda}_G\} = \lambda_{gj}, j = 1, \dots, m$.

После преобразования в безусловную оптимизационную задачу для поиска оптимума будем использовать метод Ньютона.

Условие оптимума первого порядка (модифицированное условие Куна–Таккера) для барьерной проблемы (2) записывается в виде

$$\begin{aligned} \nabla F(X) + A_H(X)^T \Lambda_H + A_G(X)^T \Lambda_G &= 0; \\ S \Lambda_G - \mu e &= 0; \\ H(X) &= 0; \quad V(Z) = 0; \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} A_H(x) &= \begin{bmatrix} \frac{\partial h_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial h_1}{\partial x_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial h_k}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial h_k}{\partial x_n} \end{bmatrix}; \quad A_G(x) = \begin{bmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial g_1}{\partial x_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial g_m}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial g_m}{\partial x_n} \end{bmatrix}; \\ \Lambda_G &= \begin{bmatrix} \lambda_{g1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \lambda_{g2} & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \lambda_{gm} \end{bmatrix}; \quad S_S = \begin{bmatrix} s_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & s_2 & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & s_m \end{bmatrix}, \end{aligned}$$

где $\nabla F(\bar{X}) = \left(\frac{\partial F}{\partial x_1}, \frac{\partial F}{\partial x_2}, \dots, \frac{\partial F}{\partial x_n} \right)^T$ – матрица Якоби целевой функции (1); \bar{S} – диагональная матрица фиктивных переменных, элементы которой, отличные от 0 и расположенные на главной диагонали, есть компоненты вектора \bar{S} ; $\bar{\Lambda}_G$ – диагональная матрица множителей Лагранжа, элементы которой, отличные от 0 и расположенные на главной диагонали, есть компоненты вектора $\bar{\Lambda}_G$; $\{\bar{\Lambda}_H\} = (\lambda_{h1}, \dots, \lambda_{hk})^T$ – вектор множителей Лагранжа для ограничений типа равенств; $\bar{\Lambda}_G, \{\bar{\Lambda}_G\} = (\lambda_{g1}, \dots, \lambda_{gm})^T$ – вектор множителей Лагранжа для ограничений типа неравенств; \bar{I} – единичная матрица; $\bar{A}_H(\bar{X}), \bar{A}_G(\bar{X})$ – матрицы Якоби функций ограничений – равенств $h(\bar{X})$ и ограничений – неравенств $g(\bar{X})$.

Таким образом, применив условия оптимальности Куна–Таккера к задаче (3), получили систему нелинейных алгебраических уравнений (4) относительно компонент вектора искомых оптимальных главных неизвестных $\bar{X} = \bar{X}_0$, а также компонент сопутствующих векторов фиктивных неизвестных \bar{S} и множителей Лагранжа $\bar{\Lambda}_H, \bar{\Lambda}_G$. Эта система может быть решена одним из известных численных методов – например, методом Ньютона, которым и воспользуемся далее.

При использовании метода Ньютона на каждом шаге определяются компоненты вектора направления поиска $\bar{P}, \{\bar{P}\} = (p_x, p_s, p_h, p_g)$. Эти компоненты находят из соотношения вида:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \nabla_x^2 L_F & 0 & A_H^T(X) & A_G^T(X) \\ 0 & \Lambda_G & 0 & S_S \\ A_H(X) & 0 & 0 & 0 \\ A_G(X) & \bar{I} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_x \\ p_s \\ p_h \\ p_g \end{bmatrix} &= \\ = - \begin{bmatrix} \nabla F(X) + A_H^T(X) \lambda_H + A_G^T(X) \lambda_G \\ S_S \lambda_G - \mu e \\ H(X) \\ G(X) + S \end{bmatrix}; \end{aligned} \quad (5)$$

$$\nabla_{xx}^2 L_F = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 L_F}{\partial x_1 \partial x_1} & \frac{\partial^2 L_F}{\partial x_1 \partial x_2} & \dots & \frac{\partial^2 L_F}{\partial x_1 \partial x_n} \\ \frac{\partial^2 L_F}{\partial x_2 \partial x_1} & \frac{\partial^2 L_F}{\partial x_2 \partial x_2} & \dots & \frac{\partial^2 L_F}{\partial x_2 \partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial^2 L_F}{\partial x_n \partial x_1} & \frac{\partial^2 L_F}{\partial x_n \partial x_2} & \dots & \frac{\partial^2 L_F}{\partial x_n \partial x_n} \end{bmatrix}; e = (1, \dots, 1)^T,$$

где I – единичная матрица размерности $m \times m$; $\nabla_{xx}^2 L_F$ – матрица Гессе функции Лагранжа L_F (3).

Тогда следующая – $(i+1)$ -я итерация по каждой из компонент векторов \bar{X} , \bar{S} , $\bar{\Lambda}_H$, $\bar{\Lambda}_G$ определяется в зависимости от значений этих компонент на предыдущем (i -м) этапе в виде

$$\begin{aligned} \bar{X}^{(i+1)} &= \bar{X}^{(i)} + \alpha_s p_x; & \bar{S}^{(i+1)} &= \bar{S}^{(i)} + \alpha_s p_s; \\ \bar{\Lambda}_H^{(i+1)} &= \bar{\Lambda}_H^{(i)} + \alpha_\lambda p_h; & \bar{\Lambda}_G^{(i+1)} &= \bar{\Lambda}_G^{(i)} + \alpha_\lambda p_g. \end{aligned} \quad (6)$$

Шаги по переменным $s_j \in \bar{S}$ и $\lambda_{gj} \in \bar{\Lambda}_G$ – величины α_s , α_λ определяются в два этапа. На первом этапе вычисляются величины α_s^{\max} и α_λ^{\max} в виде

$$\begin{aligned} \alpha_s^{\max} &= \max\{\alpha \in (0,1]: s + \alpha p_s \geq (1-\tau)s\}; \\ \alpha_\lambda^{\max} &= \max\{\alpha \in (0,1]: \lambda_g + \alpha p_g \geq (1-\tau)\lambda_g\}. \end{aligned} \quad (7)$$

Здесь значение параметра τ , который определяется путем численного эксперимента и заключен в пределах $0 < \tau < 1$, будет 0,995.

На втором этапе для определения α_s^{\max} , α_λ^{\max} будем использовать рекуррентный алгоритм поиска в форме

$$\alpha_s \in (0, \alpha_s^{\max}], \quad \alpha_\lambda \in (0, \alpha_\lambda^{\max}]. \quad (8)$$

Условие (7) позволяет избежать быстрого приближения к нулю компонент векторов \bar{S} и $\bar{\Lambda}_G$.

Алгоритм метода внутренней точки представлен на блок-схеме рис. 1.

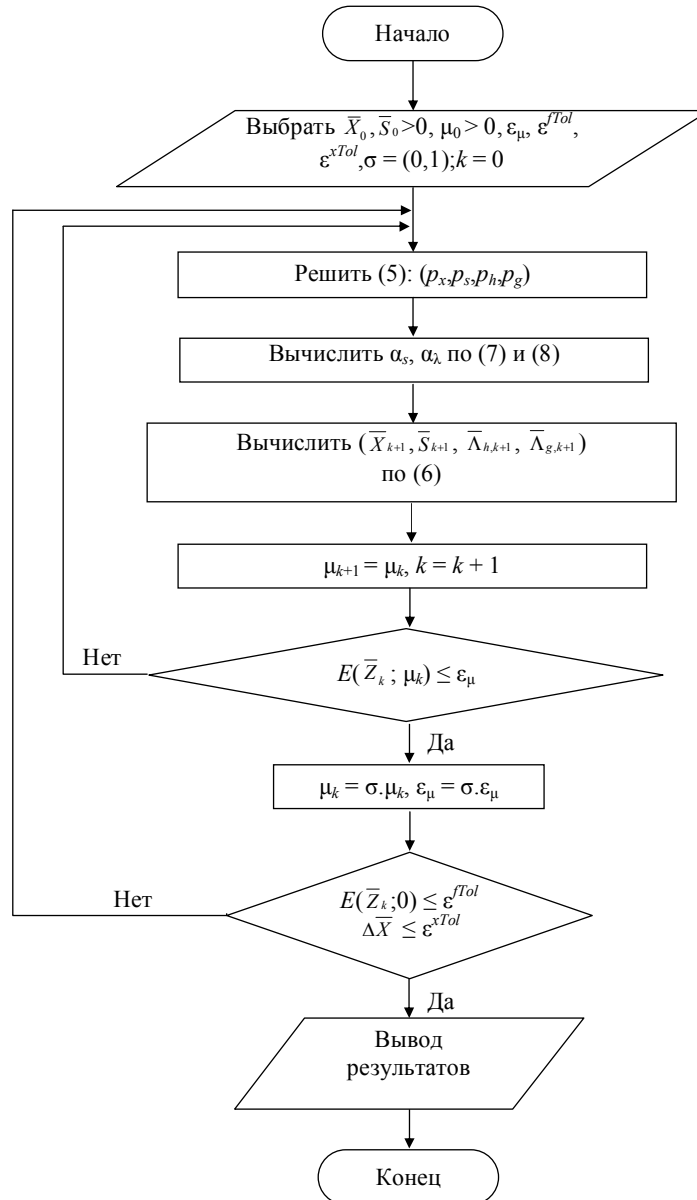


Рис. 1. Блок-схема реализации метода внутренней точки

В качестве критерия завершения процесса оптимизации используем соотношение вида

$$E(\bar{Z}; \mu) = \arg \max_{\mu} \left\{ \left\| \nabla f(\bar{X}) + \bar{A}_H^T(\bar{X}) \bar{\Lambda}_H + \bar{A}_G^T(\bar{X}) \bar{\Lambda}_G \right\|, \left\| \bar{S} \bar{\Lambda}_G - \mu e \right\|, \left\| \bar{H}(\bar{X}) \right\|, \left\| \bar{G}(\bar{X}) + \bar{S} \right\| \right\}.$$

Здесь через $\| \cdot \|$ обозначена евклидова норма.

Далее рассмотрим некоторые дополнительные вычислительные аспекты алгоритма метода внутренних точек, а именно:

- вычисление матрицы Гессе в каждой итерации;
- определение длины шага;
- схему выбора барьерных параметров.

Для решения системы (5) необходимо в каждой итерации вычислить матрицу Гессе функции Лагранжа. Такая операция связана со значительными затратами машинного времени. Вместо нее будем использовать приближенно аппроксимируемую матрицу Гессе, которая обновляется в каждой итерации.

Для обновления матрицы Гессе применяются методы *DFP* (Davidson-Fletcher-Powell), *BFGS* (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno). Метод *DFP* достаточно эффективен, но вскоре он был заменен методом *BFGS*, который в настоящее время считается самым эффективным из всех методов обновления матрицы Гессе [8].

В соответствии с методом *BFGS* обратная матрица Гессе аппроксимируется по формуле

$$H_{k+1} = (I_f - \rho_k \delta_k \delta_k^T) H_k (I_f - \rho_k \delta_k \delta_k^T) + \rho_k \delta_k \delta_k^T.$$

В этих формулах обозначено:

k – номер шага итерационного процесса при выполнении оптимизации;

B_k – матрица Гессе в предыдущей (k -й) итерации;

H_k – обратная матрица Гессе в предыдущей (k -й) итерации;

$\delta_k = x_{k+1} - x_k$ – приращение переменных при переходе от k -й к ($k+1$)-й итерации;

$y_k = \nabla F_{k+1} - \nabla F_k$ – приращение градиента целевой функции при переходе от k -й к ($k+1$)-й итерации;

I_f – единичная матрица размерностью $n \times n$.

Таблица 1. Результат оптимизации грузового судна дедвейтом 6500 т

Параметр	Прототип	Оптимальный вариант		
		№ 1	№ 2	№ 3
Длина между перпендикулярами L , м	95,900	102,114	104,325	107,237
Ширина B , м	17,000	14,588	14,904	15,32
Высота борта D , м	8,800	9,319	9,509	8,185
Осадка d , м	6,900	7,294	7,452	6,500
Коэффициент общей полноты δ	0,740	0,733	0,699	0,761
Эксплуатационная скорость V_s , уз	12,0	10,0	12,0	12,0
Водоизмещение Δ , т	8532,4	8165,5	8300,4	8331,3
Грузоподъемность, т	6414,7	6445,2	6424,2	6416,5
Мощность ГД, кВт	2114,6	988,7	1842,3	2062,9
Начальная метацентрическая высота h_0 , м	1,902	0,729	0,745	1,532
Период бортовой качки, с	9,576	12,814	12,919	9,434
Отношение h_0/B	0,112	0,050	0,050	0,100
Угол максимума, град	39,78	38,60	39,82	38,34

$E(\bar{Z}; \mu) < \varepsilon_{\mu}$, где $E(\bar{Z}; \mu)$ определяется по формуле

На втором этапе длина шага выбирается таким образом, чтобы обеспечить достаточное уменьшение так называемой «оценочной функции» $\varphi_v(v)$, где $v > 0$ – параметр штрафа. Аналитическое выражение для выбора длины шага на втором этапе есть

$$\varphi_i(\bar{Z}_k + \alpha_T \alpha_s^{\max} p_z) \leq \varphi_i(\bar{Z}_k) + \eta \alpha_T \alpha_s^{\max} D\varphi_i(\bar{Z}_k; p_z),$$

где $D\varphi_v(\bar{X}_k; p_z)$ – производная функции φ_v по направлению p_z , $p_z = \begin{bmatrix} p_x \\ p_s \end{bmatrix}$.

Оценочная функция $\varphi_v(v)$ определяется по формуле

$$\varphi_v(\bar{Z}) = \varphi_{\mu}(\bar{Z}) + v \left\| \frac{\bar{H}(\bar{X})}{\bar{G}(\bar{X}) + \bar{S}} \right\|.$$

При этом $\varphi_{\mu}(\bar{Z})$ есть барьерная (штрафная) функция в соотношении (2), а величина v обновляется в каждой итерации, чтобы p_z было направлением спуска для функции φ_v . Правило обновления v было рассмотрено в [6].

По результатам выполненных численных экспериментов можно принять $\alpha_T = 1$; $\eta = 10^{-4}$. Тогда длина шага определяется по формуле $\alpha_s = \alpha_T \alpha_s^{\max}$.

Выбор коэффициента штрафа. Правила выбора коэффициента штрафа для данного случая были рассмотрены в [5]. Однако в указанных работах используется ряд параметров, практический выбор которых затруднителен. Поэтому в данной работе вместо указанных рекомендаций была применена следующая схема: если последняя барьерная проблема была решена менее чем за три итерации, то $\mu_{k+1} = \mu_k/100$, в противном случае $\mu_{k+1} = \mu_k/5$.

Далее с использованием описанного выше алгоритма была разработана программа *RSAS/Ship* оптимизации главных характеристик грузовых судов ограниченного района плавания в среде языка программирования *MATLAB*.

Продолж. табл. 1

Параметр	Прототип	Оптимальный вариант		
		№ 1	№ 2	№ 3
Плечо при угле максимума, м	1,02	0,59	0,65	0,84
Угол заката, град	89,22	86,86	87,76	88,18
Площадь ДСО* от 0 до 40, м·рад	0,453	0,247	0,265	0,375
Площадь ДСО от 0 до 30, м·рад	0,278	0,145	0,155	0,231
Площадь ДСО от 30 до 40, м·рад	0,175	0,102	0,110	0,145
Критерий погоды	1,38	1,48	1,50	1,36
Число круговых рейсов в год	19,071	17,803	19,086	19,105
Ходовое время в одном круговом рейсе, дни	6,652	7,959	6,638	6,620
Стояночное время в одном круговом рейсе, дни	11,7	11,70	11,70	11,7
Стоимость постройки, млн долл. США	6,057	5,18	5,808	5,950
Ежегодные затраты, млн долл. США	2,288	1,863	2,201	2,272
Суммарная перевозимая масса груза за год, тыс. т	244,7	229,5	245,2	245,2
Приведенные затраты, долл./((т·миль)	5,50E-03	4,78E-03	5,28E-03	5,45E-03
Суммарная прибыль, млн долл. США	1,732	7,546	3,764	2,265

*ДСО – диаграмма статической остойчивости.

Результаты применения программы показаны в табл. 1. Первый оптимальный вариант соответствует случаю ограничения нижнего предела эксплуатационной скорости судна величиной 10 уз, второй вариант – 12 уз, а третий – введению ограничения на осадку, которая не должна быть более 6,5 м.

ВЫВОДЫ

1. Программа для оптимизации главных характеристик *RSAVShip* разработана на основе метода внутренней точки с применением метода модифицированных множителей Лагранжа и метода второго порядка.

2. Применение методов обновления матрицы Гессе функции Лагранжа путем замены этой функции ее приближенным значением позволило сократить объем и время вычислений.

3. Для определения необходимых для сходимости оптимизационного процесса коэффициентов штрафа рекомендуется: при решении барьерной проблемы менее чем за три итерации принимать значение коэффициента штрафа для следующей итерации $\mu_{k+1} = \mu_k/100$, в противном случае $\mu_{k+1} = \mu_k/5$.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Сорокин, В. И.** Некоторые особенности алгоритма оптимизации главных элементов контейнеровозов [Текст] / В. И. Сорокин // Проектирование и конструкция судов : сб. науч. трудов НКИ. – Николаев : НКИ, 1982. – С. 3–10.
- [2] An interior algorithm for nonlinear optimization that combines line search and trust region steps [Text] / R. A. Waltz, J. L. Morales, J. Nocedal and D. Orban // *Mathematical Programming*. – 2006. – Vol. 107, nr 3. – P. 391–408.
- [3] **Byrd, R. H.** A Trust Region Method Based on Interior Point Techniques for Nonlinear Programming [Text] / R. H. Byrd, J. C. Gilbert, J. Nocedal // *Mathematical Programming*. – 2000. – Vol. 89, nr 1. – P. 149–185.
- [4] **Byrd, R. H.** An Interior Point Algorithm for Large-Scale Nonlinear Programming [Text] / R. H. Byrd, M. E. Gribar, J. Nocedal // *SIAM Journal on Optimization*. – 1999. – Vol. 9, nr 4. – P. 877–900.
- [5] **Byrd, R. H.** On the convergence of Newton iterations to non-stationary points [Text] / R. H. Byrd, M. Marazzi, J. Nocedal // *Mathematical Programming, Series A*, 99. – 2004. – P. 127–148.
- [6] **El-Hallabi, M.** A hybrid algorithm for nonlinear equality constrained optimization problems: global and local convergence theory [Text] / M. El-Hallabi // *Technical Report TR4-99, Mathematics and Computer Science Department, Institut National des Postes et Télécommunications, Rabat, Morocco*, 1999.
- [7] **Karmarkar, N. K.** A new polynomial time algorithm for linear programming [Text] / N. K. Karmarkar // *Combinatorica*. – 1984. – Vol. 4. – P. 373–395.
- [8] **Nocedal, J.** Numerical optimization [Text] / J. Nocedal, S. J. Wright // *Springer Science + Business Media*. – New-York, 2006. – 683 p.
- [9] **Waltz, R. A.** An interior algorithm for nonlinear optimization that combines line search and trust region steps [Text] / R. A. Waltz, J. L. Morales, J. Nocedal, and D. Orban // *Mathematical Programming*. – 2006. – Vol. 107, nr 3. – P. 391–408.

© Лі Тхань Бін

Надійшла до редколегії 03.11.2014

Статтю рекомендує до друку член редколегії ЗНП НУК д-р техн. наук, проф. В. О. Некрасов