

## КОНЦЕПЦИЯ ОПТИМИЗАЦИИ ЦЕЛЕВОЙ ФУНКЦИИ ПАТРУЛЬНОГО СУДНА ТИПА SWATH

**Кондратьева Л. Ю.**, младший научный сотрудник Национального университета кораблестроения им. адм. Макарова, г. Николаев, e-mail: kondratieva@gmail.com, ORCID: 0000-0002-2788-9116

*Рассматриваются особенности выбора оптимальных проектных характеристик корабля береговой охраны. Приводится описание выбора оптимальных характеристик судна типа СМПВ, а также функциональных ограничений, связанных с оценкой работы патрульного корабля. В связи с введением в модель оптимизации патрульного корабля ограничений  $n$ -мерного евклидова поискового пространства внешними штрафными функциями, основанными на современных требованиях к мореходности, существенно повышается качество результата оптимизации в целом. Как следствие процесс оптимизации основывается не только на требованиях предъявляемым к классическим кораблям, но и позволяет выбрать главные размерения корабля типа СМПВ. Метод Пауэлла-Флэтчера-Давидона является эффективным методом поиска максимума (минимума) целевой функции и дает возможность решить поставленную задачу уже на ранних стадиях проектирования.*

*Ключевые слова:* корабль береговой охраны, метод Пауэлла, ограничения, целевая функция, оптимизация.

**Постановка проблемы.** Эффективность береговой охраны любой страны определяется многими факторами, один из которых – ее корабельный состав, содержащий разного типа и класса надводные корабли и катера в количестве и сочетаниях, соответствующие задачам, стоящим перед флотом. Эффективность корабля береговой охраны обуславливается его свойствами – вооруженностью, скрытностью, живучестью, надежностью, мореходность и т.д. Эти свойства количественно зависят от тактико-технических характеристик (ТТХ) корабля, тактико-технических элементов (ТТЕ), представляющая собой совокупность, и параметров технических решений (ПТР) [1]. Оптимизация выбора главных размерений таких судов на начальных стадиях проектирования с применением систем автоматизированного проектирования значительно снижает трудоемкость проектных работ и обеспечивает выбор наиболее рационального в практическом отношении судна.

**Анализ последних достижений и публикаций.** На основании [2], разработанная схема оптимизации. Методы, описанные в [7–9] позволяют смоделировать функционирование корабля в виртуальной среде. Графическое описание метода Пауэлла и основной алгоритм его применения [10].

В [11–12] подробно описаны техника статистических вычислений, а также теория Марковских процессов, которые являются универсальным инструментом при проектировании и оптимизации судов разных типов.

**Цель статьи** – формирование модели оптимизации корабля береговой охраны типа СМПВ.

**Изложение основного материала.** Для оценки эффективности корабля береговой охраны используется комплексный критерий «стоимость – эффективность» основными составляющими, которого являются показатели функциональной  $E$  и экономической эффективности  $S_i$  с учетом уровня надежности самого КБО и его систем:

$$f(X, U) = S_i/E \rightarrow \min, \quad (1)$$

где  $U$  – вектор параметров задачи проектирования;  $X$  – вектор независимых переменных. Определение этих показателей происходит с помощью компьютерного моделирования различных сценариев развития событий при решении той или иной задачи, которая возложена на КБО.

Все возможные функции КБО разделены на четыре группы (миссии): поисково-спасательная (SAR); соблюдение правового режима и предотвращения угроз (ELT); охрана окружающей среды, борьба с загрязнением моря (MEP); военное использование (MR).

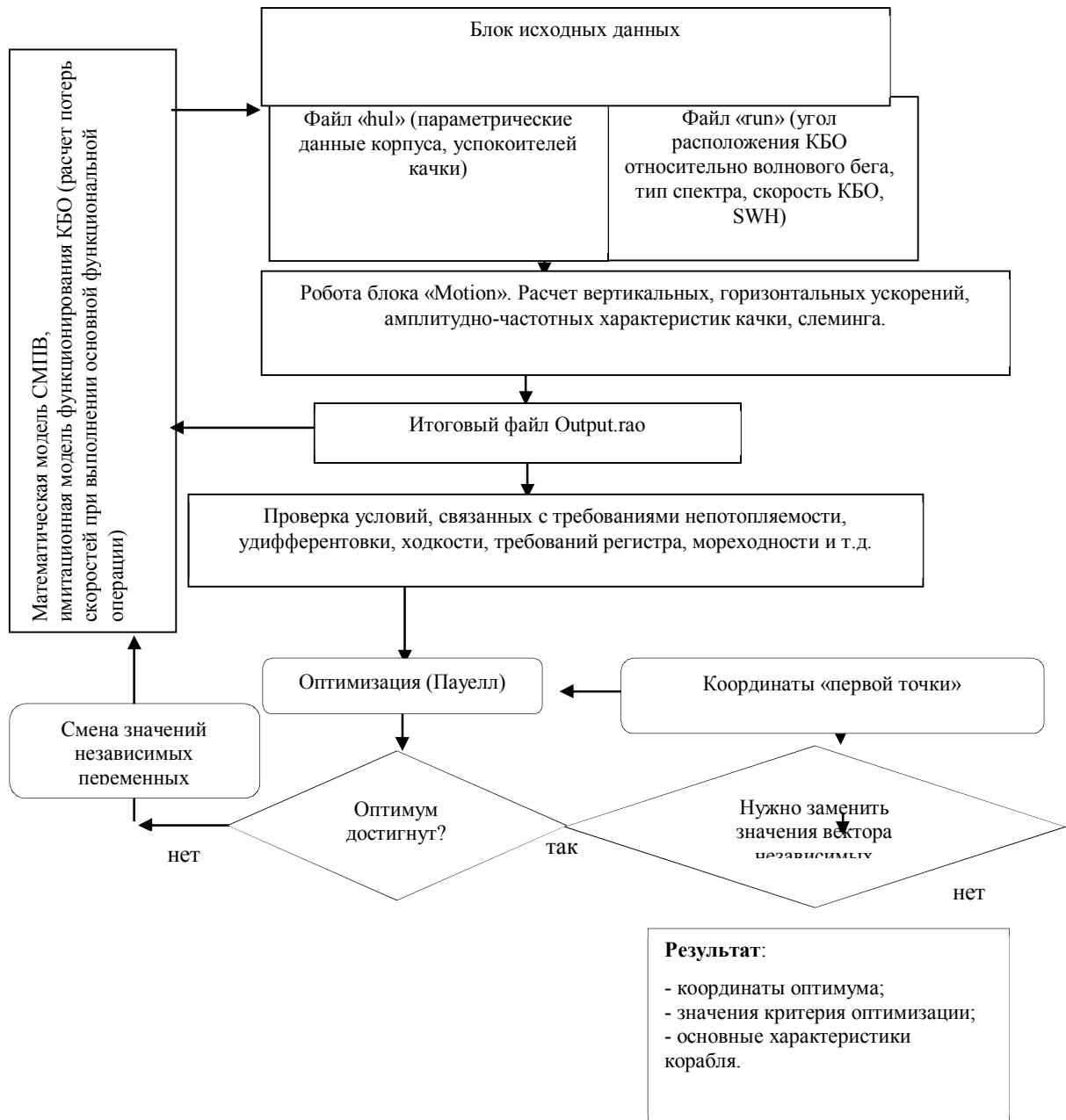


Рисунок 1 – Блок схема методики определения тактико-технических характеристик патрульного судна

Эффективность SAR функции определяется суммарной вероятностью успешного выполнения совокупности следующих основных элементов:

- поиска и спасения людей;
- тушения пожара;
- буксировка аварийного судна небольшого водоизмещения к месту ремонта или ближайшего порта.

Функция MEP предусматривает проведение:

- предупредительные меры: инспекции в порту и различные береговые функции, например, портовый надзор;

– мероприятий по ликвидации аварийных ситуаций по загрязнению окружающей среды: ограничения для предотвращения расширения зоны загрязнения, ликвидация загрязнения.

Корабли береговой охраны являются сложными, как правило, населенными инженерными сооружениями, предназначенными для автономного функционирования на поверхности водной среды. Поэтому основой предложенной концепции является системный подход [1–3] согласно которому, корабль рассматривается как единый комплекс разнородных по принципу действия и характера использования взаимодействующих (функционально) и взаимосвязанных сложных технических систем, включающих механизмы, оборудование, конструкции, личный состав, расположенных специальным образом внутри замкнутого трехмерного пространства, ограниченного внешним корпусом, и частично и на этом корпусе.

В предложенной концепции используются общенаучные методы исследований (методы математической статистики, исследования операций теории вероятности и т.д.), а также математический аппарат теории корабля теории надежности [5]. Моделирование функционирования корабля в виртуальной среде выполняется при помощи теории Марковских процессов [6–9] и имитационного моделирования. Имитационное моделирование основано на воспроизведении развернутого во времени процесса функционирования корабля береговой охраны с учетом взаимодействия с внешней средой с учетом гидро и метео условий. В результате такого моделирования фиксируются определенные события и состояния, по значениям которых рассчитываются характеристики эффективности системы. Обязательной предпосылкой моделирования процесса является возможность построения для него четкого формального описания, учитывающего главные закономерности процесса и действующие факторы. Метод имитационного моделирования состоит из следующих этапов:

- формулировка задачи;
- разработка модели исследования;
- программная реализация;
- проведение машинного эксперимента;
- анализ результатов моделирования.

Требования к надежности и безопасности корабля береговой охраны учитываются с помощью марковских процессов. В терминах теории надежности в течение жизненного цикла КБО может находиться в одном из следующих состояний: работоспособном, неработоспособном и опасном. Если корабль находится в работоспособном состоянии, то он может выполнять возложенные на него функции по охране морской границы государства. Функционирование корабля связано с определенными операциями. Для корабля береговой охраны это: переход к месту патрулирования, патрулирования, обнаружения нарушителя, преследования, задержка нарушителя и тому подобное.

Опыт научных школ кафедры теории и проектирования судов НУК свидетельствует о том, что все функциональные операции корабля береговой охраны можно формализовано представить марковскими случайными функциями.

Предполагается, что целевая функция подлежит минимизации. В этом случае, математическая формулировка задачи условной оптимизации имеет вид:

$$F(X) \rightarrow \min. \quad (2)$$

при ограничениях

$$G_j(X) \geq 0, (j=1, \dots, m); \quad (3)$$

$$(x_i)_{\min} \leq (x_i) \leq (x_i)_{\max}, (i=1, \dots, n), \quad (4)$$

где  $F(X)$  – целевая функция;  $G_j(X)$  – функциональные ограничения;  $(x_i)_{\min}$ ,  $(x_i)_{\max}$  – нижнее и верхнее допустимые значения  $i$ -ой независимой переменной.

Существуют различные методы преобразования задач с ограничениями в задачи без ограничений. Методы, основанные на преобразовании задачи с ограничениями в последовательность задач минимизации без ограничений называются методами последовательной безусловной минимизации (SUMT – Sequential Unconstrained Minimization Techniques). Это преобразование осуществляется при помощи соответствующей вспомогательной функции, которая определяет новую целевую функцию, имеющую безусловные минимумы. По мере увеличения влияния ограничений на вспомогательную функцию, строят последовательность задач без ограничений, решения которых сходятся к решению исходной задачи.

Среди методов SUMT, наиболее популярными стали методы штрафных функций. Принцип методов штрафных функций заключается в том что из задачи минимизации целевой функции  $F(X)$  с ограничениями получить задачу минимизации вспомогательной функции  $P(X, r_k) = F(X) + \Phi(X)$  без ограничений. В этой формуле  $r_k$  – коэффициент штрафа,  $\Phi(X)$  – функция штрафа. По сущности поиск минимума вспомогательной функции  $P(X, r_k)$  может быть осуществлен любым методом безусловной оптимизации. При этом безусловный минимум вспомогательной функции  $P(X, r_k)$  будет являться искомым условным минимумом целевой функции  $F(X)$ . Среди методов штрафных функций различают метод внутренних штрафных функций и метод внешних штрафных функций.

В методе внутренних штрафных функций начальная точка и траектория поиска могут находиться только внутри области допустимых решений, при этом штраф задает как бы барьер вдоль границы допустимой области вследствие неограниченного возрастания функции штрафа  $\Phi(X)$ . В методе внешних штрафных функций точки начальная точка и траектория поиска могут находиться вне области допустимых решений. При выходе из этой области, то есть при нарушении ограничений,  $P(X, r_k)$  становится существенно большей, чем функция  $F(X)$ . Другими словами, при нарушении ограничений налагается штраф, что приводит к ухудшению функции  $P(X, r_k)$ . В этих двух методах вспомогательные функции могут быть представлены в следующем виде:

- метод внутренних штрафных функций –  $P(X, r_k) = F(X) + r_k \sum_m \frac{1}{G_j(X)} 1$ ,
- метод внешних штрафных функций –  $P(X, r_k) = F(X) + r_k \sum_m \left| \left( \bar{G}_j(X) \right)^n \right|$ ,

где  $\bar{G}_j(X) = 0$  – в области допустимых значений и  $\bar{G}_j(X) = G_j(X)$  – вне области допустимых значений.

По сравнению с методом внутренних штрафных функций, метод внешних штрафных функций более универсален и применим для практических расчетов. Кроме того, метод внешних штрафных функций позволяет находить экстремум функции из любой начальной точки. Следовательно, в данной работе в качестве метода преобразования задач с ограничениями в задачи без ограничений используется метод внешних штрафных функций.

Таким образом, поиск оптимума целевой функции может осуществляться с использованием метода Пауэлла и метода внешних штрафных функций.

По характерным чертам все методы оптимизации можно разделить на две группы: прямые методы (методы, не использующие производных, методы поиска или методы нулевого порядка) и косвенные методы (методы, использующие производные).

В прямом методе направления движения точки поиска и шаги её движения полностью определяются на основе последовательных вычислений целевой функции. Наиболее распространенными из прямых методов являются метод покоординатного спуска, метод конфигураций, метод вращающихся координат и метод Пауэлла.

Метод Пауэлла (метод параллельных касательных) ориентирован на решение задач с квадратичными целевыми функциями и основывается на методе Хука и Дживса. Этот метод использует свойство параллельного подпространства: любая прямая, проходящая через точку экстремума квадратичной функции, пересекает под равными углами

касательные к поверхностям равных уровней этой функции в точках пересечения. В противном случае это свойство тоже действительно: прямая, соединяющая точки пересечения касательных под равными углами к поверхностям равных уровней этой функции проходит через точку экстремума. Можно доказать, что направление, определяемое вектором, сопряжено с направлением. Эти свойства могут быть распространены на  $n$ -мерную задачу. Таким образом, для того, чтобы достигать экстремума целевой функции необходимо строить систему сопряженных направлений. Эта задача решается с использованием метода Хука и Дживса.

Суть метода такова. Выбирается некоторая начальная точка  $x[0]$  и выполняется одномерный поиск вдоль произвольного направления, приводящий в точку  $x[1]$ . Затем выбирается точка  $x[2]$ , не лежащая на прямой  $x[0] - x[1]$ , и осуществляется одномерный поиск вдоль прямой, параллельной  $x[0] - x[1]$ . Полученная в результате точка  $x[3]$  вместе с точкой  $x[1]$  определяет направление  $x[1] - x[3]$  одномерного поиска, дающее точку минимума  $x^*$ . В случае квадратичной функции  $n$  переменных оптимальное значение находится за  $n$  итераций. Поиск минимума при этом в конечном счете осуществляется во взаимно сопряженных направлениях. В случае не квадратичной целевой функции направления поиска оказываются сопряженными относительно матрицы Гессе.

Алгоритм метода параллельных касательных состоит в следующем.

1. Задаются начальной точкой  $x[0]$ . За начальные направления поиска  $p[1], \dots, p[n]$  принимают направления осей координат, т. е.  $p[i] = e[i]$ ,  $i = 1, \dots, n$  (здесь  $e[i] = (0, \dots, 0, 1, 0, \dots, 0)^T$ ).

2. Выполняют  $n$  одномерных поисков вдоль ортогональных направлений  $p[i]$ ,  $i = 1, \dots, n$ . При этом каждый следующий поиск производится из точки минимума, полученной на предыдущем шаге. Величина шага  $a_k$  находится из условия:

$$f(x[k] + a_k p[k]) = \min_a f(x[k] + a p[k]). \quad (5)$$

Полученный шаг определяет точку:

$$x[k+1] = x[k] + a_k p[k]. \quad (6)$$

3. Выбирают новое направление  $p = -x[n] - x[0]$  и заменяют направления  $p[1], \dots, p[n]$  на  $p[2], \dots, p[n], p$ . Последним присваивают обозначения  $p[1], \dots, p[n]$ .

4. Осуществляют одномерный поиск вдоль направления  $p = p[n] = x[n] - x[0]$ . Заменяют  $x[0]$  на  $x[n+1] = x[n] + a_n p[n]$  и принимают эту точку за начальную точку  $x[0]$  для следующей итерации. Переходят к п. 1 [10].

Таким образом, в результате выполнения рассмотренной процедуры осуществляется поочередная замена принятых вначале направлений поиска. В итоге после  $n$  шагов они окажутся взаимно сопряженными. С теоретической точки зрения при решении задач нелинейного программирования косвенные методы сходятся быстрее, чем прямые методы. Но на практике при применении косвенных методов приходится сталкиваться с тем, что в задачах со многими переменными довольно трудно и во многих случаях даже невозможно получить производные в виде аналитических функций. Во всяком случае, прямые методы не требуют непрерывности целевой функции и существования производных. Вследствие этого, несмотря на то, что прямые методы иногда медленнее реализуются, но на практике оказываются более удовлетворительными, чем косвенные методы [12].

**Вывод.** В данной статье предложена методика оценки эффективности и надежности корабля береговой охраны, которая дает возможность учитывать требования к эффективности судов такого назначения на начальном этапе проектирования. В целом это позволяет значительно улучшить качество проектных разработок и повысить безопасность морских границ государства.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Томашевский, В. Т. Машиностроение. Энциклопедия / Ред. совет: К. В. Фролов (пред.) и др. – М. : Машиностроение; СПб. : Политехника. Расчет и конструирование машин. Раздел IV. Корабли и суда. Т. IV-20. Общая методология и теория кораблестроения. Кн. 1 [Текст] / В. Т. Томашевский, В. М. Пашин, И. Г. Захаров и др; Под ред. В. Т. Томашевского, В. М. Пашина. – СПб. : Политехника, 2003. – 744 с.
2. Пашин, В. М. Оптимизация судов / В. М. Пашин. – Л. : Судостроение, 1983. – 296 с.
3. Захаров, И. Г. Теория проектирования надводных кораблей / И. Г. Захаров, С. И. Постонен, В. И. Романьков. – СПб. : Военно-Морская Академия им. Адмирала Флота Советского Союза Н. Г. Кузнецова, 1997. – 678 с.
4. Supporting the US NAVY Fleet in any sea from design through in-life sustainment to modernization [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.navalengineers.org/ProceedingsDocs/FMMS/FMMS2013/FMMS Papers/Bozzelli\\_p aper.pdf](https://www.navalengineers.org/ProceedingsDocs/FMMS/FMMS2013/FMMS Papers/Bozzelli_p aper.pdf)
5. Рябинин, И. А. Надежность и безопасность структурно-сложных систем / И. А. Рябинин. – СПб.: Изд-во С.-Петербур. ун-та, 2007. – 276 с.
6. Абчук, В. А. Справочник по исследованию операций / В. А. Абчук, Ф. А. Матвейчук, Л. П. Томашевский. – М. : Воениздат, 1979. – 368 с.
7. Волгин, Н. С. Исследование операций. Часть I [Текст] / Н. С. Волгин, Н. В. Махров, В. А. Юровский. – Л. : ВМА им. Н. Г. Кузнецова, 1978. – 400 с.
8. Волгин, Н. С. Исследование операций. Часть II [Текст] / Н. С. Волгин, Н. В. Махров, В. А. Юровский. – Л. : ВМА им. Н. Г. Кузнецова, 1979. – 110 с.
9. Тихонов В. И., Миронов М. А. Марковские процессы. – М.: Сов. радио, 1977. – 488 с.
10. Трифонов А. Г. Постановка задачи оптимизации и численные методы ее решения [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://matlab.exponenta.ru/optimiz/book\\_2/index.php](http://matlab.exponenta.ru/optimiz/book_2/index.php), свободный. Яз. рус. (дата обращения 25.01.2015)
11. Митропольский, А. К. Техника статистических вычислений [Текст] / А. К. Митропольский. – М. : Наука, 1971. – 412 с.
12. Химмельблау, Д. Прикладное нелинейное программирование [Текст] / Д. Химмельблау. – М. : Мир, 1975. – 534 с.

## REFERENCES

1. Tomashevskyy, V. T. Mashynobuduvannya. Entsyklopediya / Red. sovet: K. V. Frolov (pred.) I dr. - M. : Mashynobuduvannya; SPb. : Politekhnika. Rozrakhunok i konstruyuvannya mashyn. Rozdil IV. Korabli ta suda. T. IV-20. Zahal'na metodolohiya i teoryya korablestroennyu. Kn. 1 [Tekst] / V. T. Tomashevskyy, V. M. Pashyn, I. H. Zakharov i dr; Pid red. V. T. Tomashevs'koho, V. M. Pashyna. - SPb. : Politekhnika, 2003. - 744 s.
2. Pashyn, V. M. Optymyzatsyya sudiv [Tekst] / V. M. Pashyn. - L. : Sudostroeny, 1983. - 296 s.
3. Zakharov, I. H. Teoryya proektyrovannya nadvodnykh korabliv [Tekst] / I. H. Zakharov, S. Y. Postonen, V. I. Roman'kiv. - SPb. : Voenno-Morskaya Akademiya im. Admirala Flota SSSR N. H. Kuznetsova, 1997. - 678 s.
4. Supporting the US NAVY Fleet in any sea from design through in-life sustainment to modernization. – Retrived from: [https://www.navalengineers.org/ProceedingsDocs/FMMS/FMMS2013/FMMS Papers/Bozzelli\\_p aper.pdf](https://www.navalengineers.org/ProceedingsDocs/FMMS/FMMS2013/FMMS Papers/Bozzelli_p aper.pdf)
5. Ryabynyn, I. A. Nadiynist' ta bezpeka strukturno-skladnykh system [Tekst] / I. A. Ryabynin. - SPb. : Yzd-vo S.-Peterb. Un-ta, 2007. - 276 s.
6. Abchuk, V. A. Spravochnyk po doslidzhennyu operatsiy [Tekst] / V. A. Abchuk, F. A. Matveychuk, L. P. Tomashevs'kyy - M. : Voenyndat, 1979. - 368 s.

7. Volhyn, N.S. Issledovanye operatsiy. Chast' I [Tekst] / N.S. Volhyn, N.V. Makhrov, V.A. Yurovskyy. - L. : VMA im. N.H. Kuznetsova, 1978. - 400 s.
8. Volhyn, N.S. Issledovanye operatsiy. Chast' II [Tekst] / N.S. Volhyn, N.V. Makhrov, V.A. Yurovskyy. - L. : VMA im. N.H. Kuznetsova, 1979. - 110 s.
9. Tykhonov V.I., Myronov M.A. Markovskyye protsesy. - M. : Sov. radio, 1977. - 488 s.
10. Tryfonov A.H. Postanovka zavrannyya optymizatsiyi ta chyslenni metody yiyi vyrishennya [Elektronnyy resurs]. Rezhym dostupa: [http://matlab.exponenta.ru/optimiz/book\\_2/index.php](http://matlab.exponenta.ru/optimiz/book_2/index.php), vil'ne. Yaz. rus. (data zvernennya, 25.01.2015 r.)
11. Mytropol'skyy, A.K. Tekhnika statystycheskykh vychyslenyy [Tekst] / A.K. Mytropol'skyy. - M. : Nauka, 1971. - 412 s.
12. Khimmeljblau, D. Prikladnoe nelineynoe programmirovaniye [Tekst] / D. Khimmeljblau. - M. : Mir, 1975. - 534 s.

**Кондратьева Л. Ю. КОНЦЕПЦІЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ЦІЛЬОВОЇ ФУНКЦІЇ ПАТРУЛЬНОГО СУДНА ТИПУ SWATH**

*Розглядаються особливості вибору оптимальних проектних характеристик патрульних суден. Наводиться опис вибору оптимальних характеристик суден типу СМПВ, а також функціональні обмеження, пов'язані з оцінкою роботи патрульного корабля. У зв'язку з введенням в модель оптимізації патрульного корабля обмежень n-мірного евклідового пошукового простору зовнішніми штрафними функціями, заснованими на сучасних вимогах до мореплавства, істотно підвищується якість результату оптимізації в цілому. Як наслідок процес оптимізації ґрунтується не тільки на вимогах пред'являються до класичних кораблів, а й дозволяє вибрати головні розміри корабля типу СМПВ. Метод Пауелла-Флетчера-Давідона є ефективним методом пошуку максимуму (мінімуму) цільової функції і дає можливість вирішити поставлене завдання вже на ранніх стадіях проектування.*

**Ключові слова:** патрульне судно, метод Пауелла, обмеження, цільова функція, оптимізація.

**Kondratieva L. Yu. THE CONCEPT OF OPTIMIZATION OF GOAL FUNCTION OF SWATH COAST GUARD**

*The main features of selection of optimal design characteristics of the patrol ship are considered. The paper describes the process of choosing of optimal characteristic related with estimation of coast guard's work quality. Relatively to entrance in optimization model of craft limitation of multidimensional Euclid searching space by outside penalty function, based on today's requirements to sea keeping, significant increasing the quality of optimization results generally. As result, the optimization process became to process based not only on typical requirements presented to standards vessels, but it let us to choose the main dimensions of SWATH. The method of Paul-Fletcher-Davidon is the most efficiency method of maximum (minimum) of goal function searching and give an opportunity to decide delivered task yet vat early stages of design.*

**Keywords:** patrol ship, Paul method, restrictions, goal function, optimization.

© Кондратьева Л. Ю.

Статтю прийнято  
до редакції 5.11.17