

УДК 519.8

DOI: 10.26467/2079-0619-2019-22-2-96-108

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ МУЛЬТИАГЕНТНЫХ МЕТОДОВ ОПТИМИЗАЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

А.В. ПАНТЕЛЕЕВ¹, М.М.С. КАРАНЭ¹

*¹Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
г. Москва, Россия*

В статье рассмотрено применение трех мультиагентных методов для оптимизации элементов конструкций летательных аппаратов. Описаны стратегии поиска решения с использованием трех мультиагентных метаэвристических алгоритмов: метода, имитирующего поведение стаи рыб; метода, имитирующего поведение стаи криля, и метода, имитирующего империалистическую конкуренцию. Работа этих методов основана на процессах, происходящих в среде, имеющей множество агентов. Агенты имеют возможность обмениваться информацией для того, чтобы найти решение задачи. Эти методы позволяют найти лишь приближенное решение, но тем не менее с большим успехом используются на практике. Описанные метаэвристические алгоритмы применены для задач оптимизации элементов конструкций летательных аппаратов, таких как сварная балка, сосуд высокого давления, редуктор и натяжная пружина. В работе приведены постановки этих задач: указана целевая функция, набор ограничений и множество допустимых решений, даны рекомендации по выбору параметров применяемых методов. Для решения задач оптимизации элементов конструкций летательных аппаратов был сформирован комплекс программ в среде разработки Microsoft Visual Studio на языке C#. Данный комплекс программ позволяет решать приведенные задачи каждым из описанных мультиагентных методов. Программное обеспечение позволяет выбирать задачу и применяемый метод, подбирать его параметры и значения коэффициентов штрафной функции. Результаты решения сравнивались между собой и с известными решениями. По полученным численным результатам можно сделать вывод о том, что созданное алгоритмическое и программное обеспечение позволяет найти близкое к точному решение за приемлемое время.

Ключевые слова: глобальный экстремум, мультиагентные методы оптимизации, метаэвристические методы оптимизации, элементы конструкций летательных аппаратов.

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день в сфере авиации и других технических отраслях возникает необходимость решать все более сложные задачи оптимизации, требующие больших вычислительных ресурсов. В таких задачах целевая функция является нелинейной, зависит от многих переменных, имеет сложную структуру поверхностей уровня, а искомое решение должно удовлетворять некоторому заданному набору ограничений. Классические методы оптимизации, как правило, не справляются с упомянутыми задачами из-за сложности целевых функций. В связи с этим постоянно разрабатываются и модифицируются новые метаэвристические методы [1], позволяющие решать подобные задачи эффективнее, с более высокой точностью и с меньшими затратами вычислительных ресурсов.

В работе рассмотрены три мультиагентных метаэвристических метода [2]. На основе этих методов сформирован комплекс программ, с помощью которого были решены задачи оптимизации элементов конструкций летательных аппаратов [3, 10], а также продемонстрирована эффективность мультиагентных методов.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Дана целевая функция $f(x) = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$, определенная на множестве допустимых решений $D \subseteq R^n$.

Требуется найти условный глобальный максимум функции $f(x)$ на множестве D , т. е. такую точку $x^* \in D$, что $f(x^*) = \max_{x \in D} f(x)$, где $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$, $D = \{x \mid x_i \in [a_i, b_i], i = 1, 2, \dots, n\}$.

Задача поиска минимума функции $f(x)$ сводится к задаче поиска максимума путем замены знака перед функцией на противоположный.

В задачах оптимизации элементов конструкции летательных аппаратов рассматриваются объекты, описываемые вектором $x = (x_1, \dots, x_n)^T$, где x_i – выбираемые параметры, например, размеры составных частей конструкций. Каждый объект должен удовлетворять ограничениям $g^j(x) \leq 0, j = 1, \dots, m$, характеризующим физические свойства конструкции (например, ограничения по напряжению на отдельные детали). Требуется минимизировать стоимость или вес конструкции при выполнении всех ограничений.

Стратегия решения таких задач заключается в переходе от исходной задачи к задаче поиска глобального экстремума вспомогательной функции $F(x_1, \dots, x_n)$, полученной с помощью

применения метода внешних штрафов, которая имеет вид $F(x) = f(x) + \sum_{j=1}^m c_j \cdot [\max\{0, g^j(x)\}]^2$,

где c_j – параметры штрафа.

СТРАТЕГИЯ ПОИСКА РЕШЕНИЯ МЕТОДОМ, ИМИТИРУЮЩИМ ПОВЕДЕНИЕ СТАИ РЫБ

В алгоритме, имитирующем поведение стаи рыб (Fish School Search Algorithm, FSS) [2–4], используются результаты изучения особенностей поведения некоторых сортов рыб, которые могут существовать только в пределах стаи, что уменьшает индивидуальную свободу их передвижений, но увеличивает интенсивность соревнования за пищу. Такое объединение рыб, как показывают наблюдения за ними в океанах и реках, подтверждает, что преимущества существенно превышают недостатки.

В алгоритме используются следующие основные черты поведения стай рыб:

1) питание (производится имитация естественного инстинкта рыб, заключающегося в поиске пищи). Оно необходимо, так как рыбы должны питаться, для того чтобы вырасти сильными и способными к размножению. Получая пищу, рыбы набирают вес, а плавая – теряют;

2) плавание (эта функция реализуется коллективно всеми рыбами стаи с целью поиска пищи);

3) размножение (производится имитация естественного механизма селекции, порождая новые объекты для поддержания процесса поиска).

Каждая рыба из стаи имеет внутреннюю «память» о случившемся успехе в поиске пищи (приближении к точке экстремума), заключенную в весе рыбы. Стая эволюционирует путем обмена информацией между родителями в результате размножения, а также вследствие коллективного движения. Аквариум представляет собой множество допустимых решений D . Наличие пищи показывает рыбам области аквариума, которые определяют хорошие регионы для поиска решения. В процессе плавания реализуется идея глобального перенаправления всех рыб в ту часть аквариума, которая рассматривается всеми рыбами стаи как наиболее

предпочтительная с точки зрения поиска пищи. Размножение рыб, в свою очередь, позволяет перейти от сравнительного исследования областей аквариума к процессу, уточняющему решение в рамках найденной области. К процессу размножения допускаются рыбы только с наибольшим весом.

СТРАТЕГИЯ ПОИСКА РЕШЕНИЯ МЕТОДОМ, ИМИТИРУЮЩИМ ПОВЕДЕНИЕ СТАИ КРИЛЯ

Метод (Krill Herd – KH) [2, 5, 6] относится к биоинспирированным, поскольку основан на результатах анализа поведения стай криля – рачков, внешне напоминающих креветок. Их позиции меняются под действием трех факторов: присутствия других членов популяции, необходимости поиска пищи, случайных блужданий. Обычно движение популяции криля определяется двумя целями: увеличением плотности криля и достижением пищи.

В начале процесса генерируется популяция из NP особей на множестве D с помощью равномерного распределения. Предполагается, что движение j -го члена популяции происходит согласно уравнению

$$\frac{dx^j}{dt} = V^j,$$

где x^j – положение, V^j – скорость, которая складывается из трех составляющих. Первая составляющая определяется влиянием соседей (членов популяции, входящих в некоторую окрестность j -го элемента определенного радиуса), наилучшего элемента во всей популяции и информации о своей старой скорости. Вторая составляющая определяется движением в сторону источника пищи (за него принимается «центр масс» популяции), информацией о старой скорости в поисках пищи, памятью своего наилучшего результата за все итерации. Третья составляющая имитирует случайные блуждания особи, уменьшающиеся с ростом числа итераций. Для оживления процесса поиска применяются операции скрещивания и мутации, используемые в других эволюционных методах и методе дифференциальной эволюции. Процедура поиска завершается при достижении заданного числа итераций.

СТРАТЕГИЯ ПОИСКА РЕШЕНИЯ МЕТОДОМ, ИМИТИРУЮЩИМ ИМПЕРИАЛИСТИЧЕСКУЮ КОНКУРЕНЦИЮ

В стратегии (Imperialist Competitive Algorithm – ICA) [2, 7, 8] используются наблюдения за поведением империй в борьбе за сферы влияния. Империализм – это политика расширения управляющего воздействия правительства за пределы границ страны, реализуемая как с помощью непосредственного управления, так и косвенного, через влияние на рынки продовольствия, товаров, материалов и т. д. Таким образом, все страны делятся на империи и колонии. Империи стремятся использовать ресурсы других стран или просто влиять на их политику, противодействуя другим империям. Вне зависимости от побуждающих причин империи стремятся увеличить число своих колоний и распространить свое влияние на весь мир. Для этого может использоваться политика ассимиляции (внедрение своего языка, системы образования, культуры, религии), что неизбежно сближает колонию и империю.

Метод использует идеи как эволюционных алгоритмов, так и методов «роевого интеллекта». Он начинается с формирования начальной популяции – стран в мире (решений на множестве допустимых решений). Несколько лучших стран (по величине целевой функции) отбираются на роль империалистических стран, а остальные образуют колонии. Все колонии за-

крепляются за империалистическими государствами, причем их количество определяется силой такого государства, обратно пропорциональной величине целевой функции. Так образуются империи: империалистическое государство и его колонии. Наиболее сильному империалистическому государству соответствует наибольшее число колоний. Затем каждая колония начинает движение к своему империалистическому государству. Сила империи определяется силой империалистического государства и его колоний (к силе государства добавляется доля от средней силы колоний). Конкуренция между империями приводит либо к возрастанию (по крайней мере, неубыванию) силы империи, либо к ее уменьшению. Слабые империи со временем исчезают. Описанные механизмы должны привести к ситуации, когда остается только одна империя в мире, а все остальные страны – ее колонии (это является условием окончания процесса). Положение империалистического государства принимается за приближенное решение задачи.

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ОПТИМИЗАЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

В задаче определения параметров сварной балки [3, 10] требуется найти высоту сварного шва x_1 , длину сварного шва x_2 , высоту балки x_3 и ширину балки x_4 таким образом, чтобы стоимость конструкции балки была минимальной. Также конструкция балки должна удовлетворять ограничениям по напряжению сдвига τ , изгиба σ , продольной нагрузке P_c и отклонению края балки δ . Задача может быть формализована следующим образом:

$$\begin{aligned} f(x) &= 1,10471 \cdot x_1^2 \cdot x_2 + 0,04811 \cdot x_3 \cdot x_4 \cdot (14 + x_2), \\ g^1(x) &= \tau(x) - 13600 \leq 0, \quad g^2(x) = \sigma(x) - 30000 \leq 0, \quad g^3(x) = x_1 - x_4 \leq 0, \\ g^4(x) &= 0,10471 \cdot x_1^2 + 0,04811 \cdot x_3 \cdot x_4 \cdot (14 + x_2) - 5 \leq 0, \\ g^5(x) &= 0,125 - x_1 \leq 0, \quad g^6(x) = \delta(x) - 0,25 \leq 0, \quad g^7(x) = 6000 - P_c(x) \leq 0, \\ D &= [0, 1; 2, 0] \times [0, 1; 10, 0] \times [0, 1; 10, 0] \times [0, 1; 2, 0], \end{aligned}$$

$$\text{где } \tau(x) = \sqrt{(\tau')^2 + (2 \cdot \tau' \cdot \tau'') \cdot \frac{x_2}{2 \cdot R} + (\tau'')^2}, \quad \tau' = \frac{6000}{\sqrt{2} \cdot x_1 \cdot x_2}, \quad \tau'' = \frac{M \cdot R}{J},$$

$$M = 6000 \cdot \left(14 + \frac{x_2}{2}\right), \quad R = \sqrt{\frac{x_2^2}{4} + \left(\frac{x_1 + x_3}{2}\right)^2}, \quad J = 2\sqrt{2} \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot \left(\frac{x_2^2}{12} + \left(\frac{x_1 + x_3}{2}\right)^2\right),$$

$$\sigma(x) = \frac{504000}{x_3^2 \cdot x_4}, \quad \delta(x) = \frac{65,856}{30 \cdot x_3^3 \cdot x_4}, \quad P_c(x) = \frac{4,013 \cdot 5 \cdot 10^6 \cdot \sqrt{x_3^2 \cdot x_4^6}}{196} \cdot \left(1 - \frac{x_3 \cdot \sqrt{5}}{28}\right).$$

Зададим параметры методов и значения коэффициентов штрафной функции.

Параметры метода, имитирующего поведение стаи рыб: размер популяции $NP = 30$, максимальное количество итераций $ITER = 500$, максимальный вес $W_{scale} = 100$, индивидуальные шаги $step_{vol} = 0,1$ и $step_{ind} = 0,01$, пороговый вес $W = 70$. Коэффициенты штрафной функции: $c_1 = 0,001$, $c_2 = 0,001$, $c_3 = 10$, $c_4 = 1$, $c_5 = 1$, $c_6 = 1$, $c_7 = 0,001$.

Параметры метода, имитирующего поведение стаи криля: размер популяции $NP = 40$, максимальное количество итераций $ITER = 1000$, максимальная скорость движения криля $N_{max} = 0,01$, максимальная скорость передвижения к источнику пищи $V_f = 0,02$, максимальная скорость диффузии криля $D_{max} = 0,005$, малое положительное число $\mu = 3$, параметр $c_i = 0,02$. Коэффициенты штрафной функции: $c_1 = 0,001$, $c_2 = 0,001$, $c_3 = 10$, $c_4 = 1$, $c_5 = 1$, $c_6 = 1$, $c_7 = 0,001$.

Параметры метода, имитирующего империалистическую конкуренцию: число стран $N_{pop} = 150$, число империалистических стран $N_{imp} = 15$, число итераций $ITER = 500$, параметры сдвига колоний $\beta = 0,6$ и $\gamma = 0,06$, параметр учета влияния колоний $\xi = 0,01$. Коэффициенты штрафной функции: $c_1 = 0,001$, $c_2 = 0,001$, $c_3 = 10$, $c_4 = 1$, $c_5 = 1$, $c_6 = 1$, $c_7 = 0,001$.

Результат работы мультиагентных алгоритмов приведен в табл. 1 и сравнивался с решением, приведенным в [10].

Таблица 1
Table 1

Результаты решения задачи определения параметров сварной балки
Results of solving the problem of optimizing the parameters of the welded beam

	Метод, имитирующий поведение стаи рыб (fish school search)	Метод, имитирующий поведение стаи криля (krill herd)	Метод, имитирующий империалистическую конкуренцию (imperialist competitive algorithm)	Известное решение (known solution) [10]
x_1^*	0,3	0,23	0,36	0,2
x_2^*	3,82	3,6	2,7	3,47
x_3^*	9,36	9,07	9,03	9,03
x_4^*	0,17	0,21	0,71	0,2
$f(x^*)$	1,7439	1,8232	5,5376	2,1924
$g^1(x^*)$	-5262,61	-100,19	-4182,615	-0,02
$g^2(x^*)$	3839,97	-246,33	-21294,44	0,09
$g^3(x^*)$	0,1299	-0,005	-0,35	10^{-6}
$g^4(x^*)$	-3,6264	-3,413	0,1646	-3,43
$g^5(x^*)$	-0,175	-0,076	-0,235	-0,08
$g^6(x^*)$	-0,2343	-0,236	-0,2458	-0,23
$g^7(x^*)$	2536,46	-47,169	-240505,307	0,05

Результат, полученный методом, имитирующим поведение стаи рыб и стаи криля, близок к решению, получившемуся в [10]. Метод, имитирующий империалистическую конкуренцию, показал результат хуже, но ограничения выполняются лучше, чем в [10]. По сравнению с результатами, полученными с помощью методов роевого интеллекта, рассмотренные методы показали хорошую эффективность, и результат оказался близок к полученному в [3] решению. Метод, имитирующий империалистическую конкуренцию, показал результат хуже, чем в [3].

В задаче определения параметров сосуда для хранения сжатого газа [3, 10] требуется определить толщину головки x_1 , толщину сосуда x_2 , внутренний радиус x_3 и длину цилиндрической части x_4 так, чтобы стоимость конструкции сосуда была минимальной. Кроме того, толщина сосуда и толщина головки являются дискретными величинами (описывающими кратность параметра величине 0,0625). Задача может быть формализована следующим образом:

$$f(x) = 0,6224 \cdot \tilde{x}_1 \cdot x_3 \cdot x_4 + 1,7781 \cdot \tilde{x}_2 \cdot x_3^2 + 3,1661 \cdot \tilde{x}_1^2 \cdot x_4 + 19,84 \cdot \tilde{x}_1^2 \cdot x_3,$$

$$g^1(x) = -\tilde{x}_1 + 0,0193 \cdot x_3 \leq 0, \quad g^2(x) = -\tilde{x}_2 + 0,00954 \cdot x_3 \leq 0,$$

$$g^3(x) = -\pi \cdot x_3^2 \cdot x_4 - \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot x_3^3 + 1296000 \leq 0, \quad g^4(x) = x_4 - 240 \leq 0,$$

$$D = [1; 99, 99] \times [1; 99, 99] \times [10; 200] \times [10; 200],$$

где $\tilde{x}_1 = 0,0625 \cdot \langle x_1 \rangle$, $\tilde{x}_2 = 0,0625 \cdot \langle x_2 \rangle$, $\langle \cdot \rangle$ – целая часть числа.

Параметры метода, имитирующего поведение стаи рыб: размер популяции $NP = 30$, максимальное количество итераций $ITER = 10000$, максимальный вес $W_{scale} = 5000$, индивидуальные шаги $step_{vol} = 0,3$ и $step_{ind} = 0,03$, пороговый вес $W = 4500$. Коэффициенты штрафной функции: $c_1 = 40000$, $c_2 = 35000$, $c_3 = 1000$, $c_4 = 900$.

Параметры метода, имитирующего поведение стаи криля: размер популяции $NP = 60$, максимальное количество итераций $ITER = 1000$, максимальная скорость движения криля $N_{max} = 0,01$, максимальная скорость передвижения к источнику пищи $V_f = 0,02$, максимальная скорость диффузии криля $D_{max} = 0,005$, малое положительное число $mi = 3$, параметр $c_i = 0,02$. Коэффициенты штрафной функции: $c_1 = 40000$, $c_2 = 35000$, $c_3 = 1000$, $c_4 = 900$.

Параметры метода, имитирующего империалистическую конкуренцию: число стран $N_{pop} = 150$, число империалистических стран $N_{imp} = 15$, число итераций $ITER = 500$, параметры сдвига колоний $\beta = 0,9$ и $\gamma = 0,09$, параметр учета влияния колоний $\xi = 0,01$. Коэффициенты штрафной функции: $c_1 = 40000$, $c_2 = 35000$, $c_3 = 1000$, $c_4 = 900$.

Результат работы мультиагентных алгоритмов приведен в табл. 2 и сравнивался с решением, приведенным в [10].

Таблица 2
Table 2

Результаты решения задачи определения параметров сосуда для хранения сжатого газа
Results of solving the problem of optimizing the parameters of the vessel
for storing compressed gas

	Метод, имитирующий поведение стаи рыб (fish school search)	Метод, имитирующий поведение стаи криля (krill herd)	Метод, имитирующий империалистическую конкуренцию (imperialist competitive algorithm)	Известное решение (known solution) [10]
x_1^*	11,74	11,71	11,07	13
x_2^*	5,73	5,73	6,93	7
x_3^*	42,3	42,1	42,51	42,09
x_4^*	174,14	176,65	179,35	176,63

Продолжение таблицы 2
Continuance of Table 2

$f(x^*)$	5252,06	5263,29	5350,41	6059,71
$g^1(x^*)$	0,083	0,081	0,1285	0
$g^1(x^*)$	0,083	0,081	0,1285	-0,03
$g^3(x^*)$	83,868	-181,88	-43983,001	-0,02
$g^4(x^*)$	-65,86	-63,349	-60,65	-63,36

Результат близок к решению, найденному в [10]. Но, несмотря на то, что значения целевой функции, найденные каждым методом, лучше значений из [10], ограничения выполняются хуже. Результат, полученный описанными методами, оказался близок к решению, полученному с помощью методов роевого интеллекта [3], а ограничения выполняются чуть хуже.

В задаче определения параметров редуктора [3, 10] требуется найти ширину лицевой стороны x_1 , длину зубцов x_2 , число зубцов на шестерне x_3 , длину первого x_4 и второго x_5 валов, диаметр первого x_6 и второго x_7 валов так, чтобы вес конструкции был минимальным. Кроме того, конструкция редуктора должна удовлетворять ограничениям по напряжению изгиба зубцов шестерни, поверхностному напряжению, поперечным отклонениям валов и напряжению на валах. Задача может быть формализована следующим образом:

$$f(x) = 0,7854 \cdot x_1 \cdot x_2^2 \cdot (3,3333 \cdot \langle x_3 \rangle^2 + 14,9334 \cdot \langle x_3 \rangle - 43,0934) - 1,508 \cdot x_1 \cdot (x_6^2 + x_7^2) + 7,4777 \cdot (x_6^3 + x_7^3) + 0,7854 \cdot (x_4 \cdot x_6^2 + x_5 \cdot x_7^2),$$

$$g^1(x) = \frac{27}{x_1 \cdot x_2^2 \cdot \langle x_3 \rangle} - 1 \leq 0, \quad g^2(x) = \frac{397,5}{x_1 \cdot x_2^2 \cdot \langle x_3 \rangle^2} - 1 \leq 0, \quad g^3(x) = \frac{1,93 \cdot x_4^3}{x_2 \cdot \langle x_3 \rangle \cdot x_6^4} - 1 \leq 0,$$

$$g^4(x) = \frac{1,93 \cdot x_5^3}{x_2 \cdot \langle x_3 \rangle \cdot x_7^4} - 1 \leq 0, \quad g^5(x) = \frac{1}{110 \cdot x_6^3} \cdot \sqrt{\left(\frac{745 \cdot x_4}{x_2 \cdot \langle x_3 \rangle}\right)^2 + 16,9 \cdot 10^6} - 1 \leq 0,$$

$$g^6(x) = \frac{1}{85 \cdot x_7^3} \cdot \sqrt{\left(\frac{745 \cdot x_5}{x_2 \cdot \langle x_3 \rangle}\right)^2 + 157,5 \cdot 10^6} - 1 \leq 0, \quad g^7(x) = \frac{x_2 \cdot \langle x_3 \rangle}{40} - 1 \leq 0, \quad g^8(x) = \frac{5 \cdot x_2}{x_1} - 1 \leq 0,$$

$$g^9(x) = \frac{x_1}{12 \cdot x_2} - 1 \leq 0, \quad g^{10}(x) = \frac{1,5 \cdot x_6 + 1,9}{x_5} - 1 \leq 0, \quad g^{11}(x) = \frac{1,1 \cdot x_7 + 1,9}{x_5} - 1 \leq 0,$$

$$D = [2,6;3,6] \times [0,7;0,8] \times [17;28,99] \times [7,3;8,3] \times [7,8;8,3] \times [2,9;3,9] \times [5,0;5,5],$$

где $\langle \cdot \rangle$ – целая часть числа.

Параметры метода, имитирующего поведение стаи рыб: размер популяции $NP = 30$, максимальное количество итераций $ITER = 10000$, максимальный вес $W_{scale} = 5000$, индивидуальные шаги $step_{vol} = 0,1$ и $step_{ind} = 0,01$, пороговый вес $W = 4500$. Коэффициенты штрафной

функции: $c_1 = 0,1$, $c_2 = 0,1$, $c_3 = 0,1$, $c_4 = 0,1$, $c_5 = 0,1$, $c_6 = 0,1$, $c_7 = 0,1$, $c_8 = 0,1$, $c_9 = 0,1$, $c_{10} = 0,1$, $c_{11} = 0,1$.

Параметры метода, имитирующего поведение стаи криля: $NP = 40$, максимальное количество итераций $ITER = 1000$, максимальная скорость движения криля $N_{max} = 0,01$, максимальная скорость передвижения к источнику пищи $V_f = 0,02$, максимальная скорость диффузии криля $D_{max} = 0,005$, малое положительное число $mi = 3$, параметр $c_i = 0,02$. Коэффициенты штрафной функции: $c_1 = 1$, $c_2 = 1$, $c_3 = 1$, $c_4 = 1$, $c_5 = 1$, $c_6 = 1$, $c_7 = 1$, $c_8 = 1$, $c_9 = 1$, $c_{10} = 1$, $c_{11} = 1$.

Параметры метода, имитирующего империалистическую конкуренцию: число стран $N_{pop} = 150$, число империалистических стран $N_{imp} = 15$, $ITER = 500$, параметры сдвига колоний $\beta = 0,4$ и $\gamma = 0,04$, параметр учета влияния колоний $\xi = 0,01$. Коэффициенты штрафной функции: $c_1 = 1$, $c_2 = 1$, $c_3 = 1$, $c_4 = 1$, $c_5 = 1$, $c_6 = 1$, $c_7 = 1$, $c_8 = 1$, $c_9 = 1$, $c_{10} = 1$, $c_{11} = 1$.

Результат работы мультиагентных алгоритмов приведен в табл. 3 и сравнивался с решением, приведенным в [10].

Таблица 3
Table 3

Результаты решения задачи определения параметров редуктора
Results of solving the problem of optimizing the parameters of the reducer

	Метод, имитирующий поведение стаи рыб (fish school search)	Метод, имитирующий поведение стаи криля (krill herd)	Метод, имитирующий империалистическую конкуренцию (imperialist competitive algorithm)	Известное решение (known solution) [10]
x_1^*	3	3,2	2,6	3,5
x_2^*	0,2	0,7	0,8	0,7
x_3^*	17	18	18	17
x_4^*	7,4	7,4	7,6	7,3
x_5^*	7,8	7,8	8,3	7,8
x_6^*	3,5	3,1	3	3,35
x_7^*	5,3	5,3	5,3	5,29
$f(x^*)$	1605,301	2990,011	3112,991	2996,3
$g^1(x^*)$	12,235	-0,04	-0,0986	-0,07
$g^2(x^*)$	10,462	-0,217	-0,2627	-0,197
$g^3(x^*)$	0,533	-0,327	-0,2736	-0,499
$g^4(x^*)$	-0,659	-0,91	-0,9029	-0,9
$g^5(x^*)$	-0,063	0,262	0,3905	$6 \cdot 10^{-7}$
$g^6(x^*)$	0,00089	-0,008	-0,0077	$1,3 \cdot 10^{-7}$
$g^7(x^*)$	-0,915	-0,69	-0,64	-0,7
$g^8(x^*)$	-0,666	0,09	0,5385	0

Продолжение таблицы 3
Continuance of Table 3

$g^9(x^*)$	0,2499	-0,619	-0,7292	-0,583
$g^{10}(x^*)$	-0,0833	-0,16	-0,2289	-0,112
$g^{11}(x^*)$	-0,0089	-0,009	-0,0687	-0,011

Несмотря на большое количество и сложную структуру ограничений, методы смогли достаточно эффективно решить поставленную задачу. Полученный результат близок к решению, найденному в [10].

По сравнению с результатами, полученными методами роевого интеллекта [3], метод, имитирующий поведение стаи криля, показал лучший результат. Остальные методы достаточно эффективно справились с поставленной задачей.

В задаче определения параметров пружины [3, 10] требуется определить диаметр проволоки x_1 , средний диаметр витка x_2 и число активных витков x_3 таким образом, чтобы вес конструкции пружины был минимальным. Помимо этого, конструкция пружины должна удовлетворять ограничениям по минимальному отклонению, напряжению сдвига, частоте колебаний и ограничениям на внешний диаметр. Задача может быть формализована следующим образом:

$$f(x) = (x_3 + 2) \cdot x_1^2 \cdot x_2,$$

$$g^1(x) = 1 - \frac{x_2^3 \cdot x_3}{71875 \cdot x_1^4} \leq 0, \quad g^2(x) = \frac{4 \cdot x_2^2 - x_1 \cdot x_2}{12566 \cdot (x_1^3 \cdot x_2 - x_1^4)} + \frac{2,46}{12566 \cdot x_1^2} - 1 \leq 0,$$

$$g^3(x) = 1 - \frac{140,54 \cdot x_1}{x_2^2 \cdot x_3} \leq 0, \quad g^4(x) = \frac{x_1 + x_2}{1,5} - 1 \leq 0,$$

$$D = [0,05; 2,0] \times [0,25; 1,3] \times [2,0; 15,0].$$

Параметры метода, имитирующего поведение стаи рыб: размер популяции $NP = 30$, максимальное количество итераций $ITER = 10000$, максимальный вес $W_{scale} = 5000$, индивидуальные шаги $step_{vol} = 0,1$ и $step_{ind} = 0,01$, пороговый вес $W = 4500$. Коэффициенты штрафной функции: $c_1 = 6$, $c_2 = 1$, $c_3 = 1$, $c_4 = 0,5$.

Параметры метода, имитирующего поведение стаи криля: размер популяции $NP = 40$, $ITER = 1000$, максимальная скорость движения криля $N_{max} = 0,01$, максимальная скорость передвижения к источнику пищи $V_f = 0,02$, максимальная скорость диффузии криля $D_{max} = 0,005$, малое положительное число $tu = 3$, параметр $c_i = 0,02$. Коэффициенты штрафной функции: $c_1 = 6$, $c_2 = 1$, $c_3 = 1$, $c_4 = 0,5$.

Параметры метода, имитирующего империалистическую конкуренцию: число стран $N_{pop} = 150$, число империалистических стран $N_{imp} = 15$, число итераций $ITER = 500$, параметры сдвига колоний $\beta = 0,6$ и $\gamma = 0,06$, параметр учета влияния колоний $\xi = 0,01$. Коэффициенты штрафной функции: $c_1 = 6$, $c_2 = 1$, $c_3 = 1$, $c_4 = 0,5$.

Результат работы мультиагентных алгоритмов приведен в табл. 4 и сравнивался с решением, приведенным в [10].

Таблица 4
Table 4

Результаты решения задачи определения параметров пружины
Results of solving the problem of optimizing the parameters of the spring

	Метод, имитирующий поведение стаи рыб (fish school search)	Метод, имитирующий поведение стаи криля (krill herd)	Метод, имитирующий империалистическую конкуренцию (imperialist competitive algorithm)	Известное решение (known solution) [10]
x_1^*	0,05	0,05	0,06	0,05
x_2^*	0,36	0,37	0,49	0,35
x_3^*	10,93	10,37	10,28	11,28
$f(x^*)$	0,0114	0,0114	0,0216	0,0126
$g^1(x^*)$	-0,169	-0,169	-0,2983	-9,0
$g^2(x^*)$	0,1309	0,1309	-0,1479	0,00002
$g^3(x^*)$	-3,949	-3,949	-2,4164	-4,057
$g^4(x^*)$	-0,72	-0,72	-0,6333	-0,727

Полученные результаты близки к решению, найденному в [10], что говорит об эффективности применения рассматриваемых методов. В методе, имитирующем империалистическую конкуренцию, значение целевой функции чуть хуже, чем в [10], но выполняются все ограничения. Результаты, приведенные в табл. 1, оказались близки к результатам, представленным в [3]. Значение целевой функции в методе, имитирующем империалистическую конкуренцию, оказалось чуть хуже по сравнению с результатами из [3].

ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработано алгоритмическое и программное обеспечение метаэвристических методов условной глобальной оптимизации: «имитирующего поведение стаи рыб», «имитирующего популяцию криля», «имитирующего империалистическую конкуренцию» для задач оптимизации элементов конструкций летательных аппаратов: задачи определения элементов сварной балки; задачи определения элементов сосуда высокого давления; задачи определения элементов редуктора задачи определения элементов натяжной/компрессионной пружины.

Продемонстрирована эффективность решения этих задач с помощью рассмотренных метаэвристических методов и созданного алгоритмического и программного обеспечения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пантелеев А.В., Метлицкая Д.В., Алешина Е.А. Методы глобальной оптимизации. Метаэвристические стратегии и алгоритмы. М.: Вузовская книга, 2013. 244 с.
2. Каранэ М.М.С. Сравнительный анализ мультиагентных методов условной глобальной оптимизации // Материалы IV международной научно-практической конференции «Информатизация инженерного образования» (ИНФОРИНО-2018). Москва, 23–26 октября, 2018 г. 2018. С. 128–133.

3. **Пантелеев А.В., Евдокимова М.Д.** Методы «роевого» интеллекта в задачах оптимизации параметров технических систем // Научный Вестник МГТУ ГА. 2017. Т. 20, № 2. С. 6–15. DOI: 10.26467/2079-0619-2017-20-2-6-15
4. **Bastos-Filho C.J.A.** A novel search algorithm based on fish school behavior / F.B. de Lima Neto, A.J.C.C. Lins, A.I.S. Nascimento, M.P. Lima // 2008 IEEE Int. Conf. on Systems, Man and Cybernetics. 2008. Pp. 2646–2651.
5. **Bastos-Filho C.J.A.** Fish school search: overview / F.B. de Lima Neto, A.J.C.C. Lins, A.I.S. Nascimento, M.P. Lima // Nature-Inspired Algorithms for Optimisation / Ed. R. Chiong. Heidelberg: Springer, 2009. Part of the Studies in Computational Intelligence book series (SCI). Vol. 193. Pp. 261–277.
6. **Bacanin N., Pelevic B., Tuba M.** Krill herd (KH) algorithm for portfolio optimization // Mathematics and computers in business, manufacturing and tourism. Proceedings of the 14th International Conference on Mathematics and Computers in Business and Economics (MCBE '13). Proceedings of the 2nd International Conference on Applied Manufacturing, Commerce, Tourism and Services (MCTS '13). Baltimore, MD, USA, September 17–19 2013. 2013. P. 39.
7. **Gandomi A.H., Alavi A.H.** Krill herd: A new bio-inspired optimization algorithm // Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation. 2012. Vol. 17, Iss. 12, Dec. Pp. 4831–4845.
8. **Atashpaz-Gargari E., Lucas C.** Imperialist competitive algorithm: an algorithm for optimization inspired by imperialist competition // Proceedings of IEEE Congress on Evolutionary Computation, 25–28 Sept. 2007. Pp. 4661–4667.
9. **Kaveh A., Talatahari S.** Imperialist competitive algorithm for engineering design problems // Asian Journal of Civil Engineering. 2010. Vol. 11, № 6. Pp. 675–697.
10. **Cagnina L.C., Esquivel S.C.** Solving engineering optimization problems with the simple constrained particle swarm optimizer // Informatica. 2008. Vol. 32, № 3. Pp. 319–326.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Пантелеев Андрей Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой математической кибернетики факультета «Информационные технологии и прикладная математика» Московского авиационного института (национального исследовательского университета), avpanteleev@inbox.ru.

Каранэ Мария Магдалина Сергеевна, магистрант факультета «Информационные технологии и прикладная математика» Московского авиационного института (национального исследовательского университета), mmarselina@mail.ru.

THE EFFICIENCY ANALYSIS OF MULTI-AGENT OPTIMIZATION METHODS OF AIRCRAFT DESIGNS ELEMENTS

Andrei V. Panteleev¹, Maria M.S. Karane¹

¹*Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia*

ABSTRACT

The article considers the use of three multi-agent methods for optimizing structural elements of aircraft. The research describes strategies for finding solutions to multi-agent metaheuristic algorithms, such as: fish school search, krill herd, and imperialist competition algorithm. The work of these methods is based on the processes occurring in an environment that features many agents. Agents have the opportunity to exchange information in order to find a solution to the problem. These methods allow you to

find an approximate solution, but, nevertheless, with great success are used in practice. In this regard, the described metaheuristic algorithms were applied to the optimization problems of structural elements of aircraft such as: welded beam, high pressure vessel, gearbox and tension spring. The article adduces the formulation of these problems: the objective function, a set of constraints and a set of admissible solutions are indicated, recommendations on the choice of parameters of the methods used are given. To solve the problems of optimizing the elements of aircraft construction, a set of software elements was formed in the development environment of Microsoft Visual Studio in C#. This complex of programs allows you to solve the given problems by each of the described multi-agent methods. The software allows you to select a method, a task and select the method parameters and the penalty function coefficients in the best possible way. The results of the solution were compared with each other and with the well-known solution. According to the numerical results of solving these tasks, we can conclude that the algorithmic and software created allow us to find a solution close to the exact one in a reasonable time.

Key words: global extremum, multi-agent optimization methods, metaheuristic optimization methods, structural elements of aircraft.

REFERENCES

1. **Panteleev, A.V., Metlitskaya, D.V. and Aleshina, E.A.** (2013). *Metody globalnoy optimizatsii. Metaevristicheskiye strategii i algoritmy* [Methods of global optimization. Metaheuristic strategies and algorithms]. Moscow: Vuzovskaya kniga, 244 p. (in Russian)
2. **Karane, M.M.S.** (2018). *Sravnitelnyy analiz multiagentnykh metodov uslovnoy globalnoy optimizatsii* [Comparative analysis of multi-agent methods for constrained global optimization]. *Materialy IV Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Informatizatsiya inzhenerenogo obrazovaniya» (INFORINO-2018), Moskva, 23–26 oktyabrya, 2018* [IV International conference on information technologies in engineering education, Moscow, 23–26 October 2018], pp. 128–133. (in Russian)
3. **Panteleev, A.V. and Evdokimova, M.D.** (2017). *Metody «royevogo» intellekta v zadachakh optimizatsii parametrov tekhnicheskikh sistem* [Solving engineering optimization problems with the swarm intelligence methods]. *The Civil Aviation High Technologies*, vol. 20, no. 2, pp. 6–15. DOI: 10.26467/2079-0619-2017-20-2-6-15 (in Russian)
4. **Bastos-Filho, C.J.A., de Lima Neto, F.B., Lins, A.J.C.C., Nascimento, A.I.S. and Lima, M.P.** (2008). *A novel search algorithm based on fish school behavior*. 2008 IEEE Int. Conf. on Systems, Man and Cybernetics, pp. 2646–2651.
5. **Bastos-Filho, C.J.A., de Lima Neto, F.B., Lins, A.J.C.C., Nascimento, A.I.S. and Lima, M.P.** (2009). *Fish school search: overview*. In: Chiong, R. (ed.) *Nature-Inspired Algorithms for Optimisation*. Part of the Studies in Computational Intelligence book series (SCI), vol. 193. Heidelberg: Springer, pp. 261–277.
6. **Bacanin, N., Pelevic, B. and Tuba, M.** (2013). *Krill herd (KH) algorithm for portfolio optimization*. *Mathematics and computers in business, manufacturing and tourism. Proceedings of the 14th International Conference on Mathematics and Computers in Business and Economics (MCBE '13). Proceedings of the 2nd International Conference on Applied Manufacturing, Commerce, Tourism and Services (MCTS '13). Baltimore, MD, USA, September 17–19 2013*, pp. 39.
7. **Gandomi, A.H. and Alavi, A.H.** (2012). *Krill herd: A new bio-inspired optimization algorithm*. *Commun Nonlinear Sci Numer Simulat*, vol. 17, iss. 12, Dec., pp. 4831–4845.
8. **Atashpaz-Gargari, E. and Lucas, C.** (2007). *Imperialist competitive algorithm: an algorithm for optimization inspired by imperialist competition*. *Proceedings of IEEE Congress on Evolutionary Computation*, 25–28 Sept. 2007, pp. 4661–4667.
9. **Kaveh, A. and Talatahari, S.** (2010). *Imperialist competitive algorithm for engineering design problems*. *Asian Journal of Civil Engineering*, vol. 11, no. 6, pp. 675–697.
10. **Cagnina, L.C. and Esquivel, S.C.** (2008). *Solving engineering optimization problems with the simple constrained particle swarm optimizer*. *Informatica*, vol. 32, no. 3, pp. 319–326.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Andrei V. Pantelev, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of the Mathematics and Cybernetics Chair, Department of “Information Technologies and Applied Mathematics”, Moscow Aviation Institute (National Research University), avpantelev@inbox.ru.

Maria M.S. Karane, Master Degree student of the Department of “Information Technologies and Applied Mathematics”, Moscow Aviation Institute (National Research University), mmarselina@mail.ru.

Поступила в редакцию 13.11.2018

Принята в печать 21.03.2019

Received 13.11.2018

Accepted for publication 21.03.2019