

Сравнение характеристик генетического алгоритма и метода координатного поиска для оптимизации температурного режима помещений

А.П. Шуравин¹, С.В. Вологдин¹

¹Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова, Студенческая 7, Ижевск, Россия, 426069

Аннотация. В статье обосновывается актуальность исследований алгоритмов оптимизации как для решения различных прикладных задач, так и для науки об искусственном интеллекте в целом. Поясняется необходимость решения задач оптимизации теплогидравлических режимов зданий в рамках проекта «Умный город». В статье приводится математическая постановка задачи оптимизации температурного режима помещений с помощью регулируемых устройств, а также два метода решения поставленной задачи: метод покоординатного поиска и генетический алгоритм. Приводится описание вышеназванных алгоритмов, включая используемый математический аппарат. Представлены результаты численного эксперимента для рассматриваемых методов оптимизации. В заключении сделан вывод о том, что генетический алгоритм показывает лучшие результаты оптимизации, чем метод покоординатного поиска, но имеет большую вычислительную стоимость. Подтверждена гипотеза о том, что для повышения эффективности решения рассматриваемого класса задач необходимо объединение генетического алгоритма и градиентных методов.

1. Введение

В настоящее время работы в области разработки и внедрения энергоэффективных технологий являются весьма актуальными. Основные положения, определяющие необходимость проведения работ по повышению энергоэффективности отопительной системы зданий закреплены Федеральным Законом № 261-ФЗ «Об энергосбережении...», а также постановлением Правительства Российской Федерации от 13.11.09г. № 1234-р «Энергетическая стратегия России на период до 2020 года». В частности, в работе [1] рассмотрен системный подход к оптимизации центральной системы теплоснабжения на разных уровнях организации (района, города, отдельных зданий), а также представлена Информационная система «ИАСТС», предназначенная для автоматизированного расчета тепловых сетей и хранения информации о рассчитываемой сети. Вопросы энергоэффективности поднимаются в программе «Умный город» [2]. Исследование совместной работы двух источников тепловой энергии для оптимизации работы тепловой сети рассмотрены в [3]. В работе [4] рассмотрена технология «Умный дом», выступающая как энергосберегающая технология будущего. Автор приходит к выводу, что в настоящее время технология «Умный дом» не получила широкого распространения в России, но постепенно завоевывает популярность. Влияние энергосберегающих технологий на экономику и будущее рассмотрены в работах [5,6], новые достижения в области энергосбережения рассмотрены в [7].

Один из методов энергосбережения – это оптимизация потребления энергии, в том числе с использованием технологий искусственного интеллекта [8,9]. Одним из важных направлений исследования в области энергосбережения является оптимизации теплогидравлических режимов систем централизованного отопления [1]. Вопросы исследования задач и методов оптимизации теплогидравлических режимов в многоконтурных тепловых сетях рассматривались в работах многих авторов [1, 8-12]. В частности в [8] был произведен обзор оптимизационных задач центральных теплосетей и обоснована необходимость автоматизации решения данных задач. В [9] было предложено использование генетического алгоритма для оптимизации теплогидравлических режимов зданий. В [10] рассмотрены задачи многокритериальной оптимизации, которые, как правило, возникают перед началом отопительного сезона. В [11] приводится математическая модель оптимизации тепловой мощности теплоисточников, работающих в системе централизованного теплоснабжения. Рассмотрена новая методика решения поставленной задачи, представлены результаты расчетов тестовых задач. Математическая модель оптимизации тепловых потоков между абонентами тепловой сети с целью снижения дисбаланса системы теплоснабжения, включая методику решения подобных задач, рассмотрена в [12].

Разработка новых алгоритмов оптимизации и исследование уже существующих алгоритмов является актуальным [13,14], поскольку каждый из алгоритмов оптимизации имеет те или иные недостатки, например, отсутствие гарантии достижения глобального экстремума целевой функции, большая вычислительная стоимость и т. д. [15,16].

Исходя из вышесказанного, целью данной работы является экспериментальное исследование и сравнительный анализ различных подходов к оптимизации теплогидравлических режимов зданий. Работы по данному исследованию выполнены при финансовой поддержке гранта для учёных ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М.Т. Калашникова №27.06.01/18ВСВ».

2. Задача оптимизации температурного режима помещений

Избыточное энергопотребление системы теплоснабжения зданий возникает по следующим причинам:

- неэффективная тепловая защита помещений;
- неоптимальная схема теплоснабжения здания;
- из-за температурного дисбаланса помещений отапливаемых зданий (чтобы температуру «холодных» комнат довести до норматива, приходится увеличивать температуру теплоносителя, при этом в комнатах, где была нормальная температура, становится слишком жарко, и потребители вынуждены открывать окна, «отапливая улицу»).

Снизить температурный дисбаланс помещений можно несколькими способами:

- подбор оптимальной мощности отопительных приборов помещений здания, обеспечивающих нормативную температуру в каждом помещении с учетом фактического состояния ограждающих конструкций (как правило, данный подход осуществляется на этапе проектирования зданий или реконструкции зданий);
- посредством регулирования балансировочных клапанов стояков, данный вопрос рассматривался в [9] (применяется для действующих и проектируемых зданий);
- посредством регулирования регулировочных клапанов отопительных приборов (применяется для действующих зданий), данный вопрос рассмотрен в настоящей статье.

Стоит заметить, что посредством регулирования балансировочных клапанов стояков невозможно устранить дисбаланс тех помещений, которые подключены к одному и тому же стояку. Рабочая гипотеза исследования, проведенного в рамках данной статьи, состоит в том, что регулирование клапанов отопительных приборов, а также совместное регулирование и клапанов отопительных приборов и балансировочных клапанов стояков должно дать лучшие результаты оптимизации.

Целевая функция задачи оптимизации температурного дисбаланса – минимум среднеквадратичного отклонения температуры помещений от нормативной величины:

$$\Phi(s_1, s_2, \dots, s_z) = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (t_i(s_1, s_2, \dots, s_z) - t_{onm})^2 \right]^{1/2} \rightarrow \min, \quad (1)$$

где z – количество регулировочных клапанов отопительных приборов и балансировочных клапанов стояков, i – номер помещения, N – количество помещений, t_i – расчетная температура в помещении, t_{onm} – температура в помещении, которой планируется достичь (в статье применено два варианта оптимизации: относительно нормативной температуры и средней температуры помещений по зданию), s_j – сопротивление j -ого клапана.

В связи с тем, что регулировочные клапаны имеют свой диапазон значений сопротивлений, то введем ограничение:

$$s_j^{\min} \leq s_j \leq s_j^{\max}, \quad (2)$$

где $s_j^{\min}$ и $s_j^{\max}$ минимальное и максимальное сопротивление соответственно [9].

Температура воздуха внутри отапливаемых помещений рассчитывается из уравнения теплового баланса[1], которое учитывает тепловой приток от теплоносителя в приборах отопления и тепловые потери через ограждающие конструкции (стены, окна, двери, пол и прочие):

$$Q_{ct}^T + Q_{пол}^T + Q_{пот}^T + Q_{дв}^T + Q_{дв}^H + Q_{окн}^T + Q_{окн}^H + Q_{возд}^H = Q_{пр} + Q_{тр}, \quad (3)$$

где Q_{ct}^T – теплообмен со стенами, $Q_{пол}^T$ – теплообмен с полом, $Q_{пот}^T$ – теплообмен с потолком, $Q_{дв}^T$ – теплообмен с дверями, $Q_{дв}^H$ – инфильтрация через двери, $Q_{окн}^T$ – теплообмен с окнами, $Q_{окн}^H$ – инфильтрация через окна, $Q_{возд}^H$ – инфильтрация воздуха, $Q_{пр}$ – приход тепла от отопительных приборов, $Q_{тр}$ – приход тепла от труб.

Уравнение (3) записывается и решается отдельно для каждого помещения из N помещений здания.

Теплообмен через стены (аналогично пол, потолок, оконные и балконные конструкции) зависит от площади стен, их материала, толщины и разницы температур:

$$Q_{ct}^T = \frac{F_{cm}}{R_{cm}} (t_e - t_n) n \beta, \quad (4)$$

где F_{cm} – площадь стен, R_{cm} – приведенное сопротивление теплопередачи стенового ограждения; t_e – температура воздуха внутри помещения; t_n – температура наружного воздуха; n – табличный поправочный коэффициент, зависящий от типа поверхности ограждения; β – поправочный коэффициент, учитывающий ориентацию стены относительно сторон света.

Теплопотери на нагревание наружного воздуха, поступившего путем инфильтрации через окна (аналогично входные двери), вычисляется по формуле:

$$Q_{окн}^H = A_{окн}^H G_{окн}^H F_{окн} c (t_e - t_n), \quad (5)$$

где $A_{окн}^H$ – поправочный коэффициент, учитывающий тип окон; $F_{окн}$ – расчетная площадь окон; $G_{окн}^H$ – количество воздуха, поступившего путем инфильтрации; c – удельная массовая плотность воздуха.

Теплообмен через двери определяется формулой

$$Q_{дв}^T = k \frac{F_{дв.кв}}{R_{дв.кв}} (t_e - t_n), \quad (6)$$

где k – количество дверей (квартир) в подъезде; $F_{дв.кв}$ – площадь квартирной двери; $R_{дв.кв}$ – приведенное сопротивление теплопередачи квартирной двери; t_n – температура в подъезде.

Теплоотдача определяется исходя из его теплопотока на единицу площади. Тепловой поток зависит от расхода воды:

$$q_{np} = q_{ном} \left(\frac{\Delta t_{cp}}{70} \right)^{n+1} \left(\frac{X_{np}}{360} \right)^p c_{np}, \quad (7)$$

где X_{np} – действительный расход воды в приборе, кг/ч; n, p – эмпирические коэффициенты, c_{np} – коэффициент, учитывающий схему присоединения отопительного прибора; Δt_{cp} – температурный напор, равный разности полусуммы входной и выходной температуры и температуры воздуха в помещении.

Для определения расходов теплоносителя решается система гидравлических уравнений:

$$\begin{cases} Ax = q_0, \\ By = 0, \\ y + h_0 = SXx, \end{cases} \quad (8)$$

где A – матрица соединений узлов и ветвей, B – матрица контуров, построенная на исходном графе, x и y – вектора неизвестных, S – матрица гидравлических сопротивлений, X – матрица расходов, h_0 – вектор гидравлических напоров, q_0 – вектор расходов теплоносителя в узлах.

Отопительный прибор соединен параллельно с перемычкой, гидравлическое сопротивление такой системы выражается формулой [1]:

$$S_{общ} = \frac{1}{\left[\left(\sqrt{S_{приб}} \right)^{-1} + \left(\sqrt{S_{пер}} \right)^{-1} \right]^2}. \quad (9)$$

Сопротивление отопительного прибора складывается из сопротивления радиатора и регулировочного клапана

$$S_{приб} = S_{рад} + S_{клап}. \quad (10)$$

3. Описание используемых алгоритмов

В общем виде работа алгоритма оптимизации температурного дисбаланса зданий происходит по следующей схеме [9]:

1. Задаются начальные значения сопротивлений клапанов ветвей и отопительных приборов. Способ задания: случайное значение из допустимого диапазона.
2. Чтение из базы данных структуры отопительной сети и характеристик помещений, включая ограждающие конструкции.
3. Рассчитывается термгидравлический баланс отопительной системы.
4. Рассчитывается температура воздуха в помещениях методом расчета равновесных температур здания [1].
5. Вычисляется целевая функция.
6. Если достигнуто условие останова (в данном исследовании – заданное количество итераций) то выход из цикла.
7. Подбираются сопротивления клапанов ветвей и отопительных приборов. Метод подбора зависит от алгоритма оптимизации (подробнее будет описано ниже).
8. Переход к п. 2.

При использовании генетического алгоритма подбор осуществляется путем случайных мутаций (случайных изменений согласно формуле) [17]:

$$\Delta S_j = \sigma \sqrt{-2 \ln(x_1)} \cdot \cos(2\pi x_2), \quad (11)$$

где σ – шаг мутации (выбирается эмпирическим путем), x_1 и x_2 – случайные величины в пределах $[0;1]$, имеющие равномерное распределение (генераторы таких чисел встроены во многие языки программирования).

Также наборы значений сопротивлений клапанов могут скрещиваться (перемешиваться случайным образом) [9]. Вероятность скрещивания вычисляется по формуле:

$$p_{cross} = \frac{2n - k_1 - k_2}{2n - 1}, \quad (12)$$

где n – количество наборов в выборке («особей» в «популяции»), k_1 и k_2 – соответственно первый и второй набор из пары, которая проверяется на возможность скрещивания, принимают значения от 0 до $n-1$. Удаление наборов из выборки при селекции также происходит случайным образом, вероятность удаления тем больше, чем хуже целевая функция. Данная вероятность выражена формулой:

$$p_{del} = \frac{m}{n}, \quad (13)$$

где m – номер удаляемого набора (начиная с нуля). Для набора с лучшей целевой функцией данный номер равен 0, то есть, он никогда не будет удален. Цикл удаления может повторяться несколько раз, пока количество наборов не станет меньше максимально допустимого количества. Если количество набора становится меньше минимально допустимого количества, то на данной итерации селекция не производится.

В методе покоординатного поиска значение сопротивления клапанов на следующей итерации изменяется на приращение ΔS , вычисленное по формуле [1]:

$$\Delta S_j^{(k)} = \frac{(s_j^{(k)} - s_j^{(k-1)})(t_{\theta}^p - t_{\theta_j}^{(k)})}{(t_{\theta_j}^{(k)} - t_{\theta_j}^{(k-1)})}, \quad (14)$$

где $j=1, \dots, z$ – номер клапана, k – номер итерации, t_{θ}^p – требуемая температура в помещении, $t_{\theta_j}^{(k)}$ – средняя расчетная температура помещений по ветви j на k -ой итерации.

4. Результаты эксперимента

В данном исследовании в целях сравнения минимумов достижения целевой функции были проведены следующие эксперименты:

- оптимизация гидравлических сопротивлений клапанов отопительных приборов;
- оптимизация гидравлических сопротивлений балансировочных клапанов отопительных стояков;
- совместная оптимизация гидравлических сопротивлений клапанов отопительных приборов и балансировочных клапанов.

Для оптимизации был использован генетический алгоритм, в котором шаг мутации σ [9] был взят 5 и 20 в единицах $\text{Па}/(\text{Кг}/\text{час})^2$ и алгоритм покоординатного поиска. Рассчитывалось типовое здание при средних расчетных условиях г. Ижевска для фактического состояния ограждающих конструкций и отопительных приборов помещений. Оптимизация была произведена в двух вариантах:

- относительно нормативной температуры, которая была принята 20 °С;
- относительно средней температуры по помещениям.

Начальное приближение – случайное значение из диапазона формулы (2). Сравнение результатов приведено в таблицах 1-4.

Как видно из таблиц 1 и 2, оптимизация посредством регулирования клапанов отопительных приборов превзошла оптимизацию посредством регулирования клапанов стояков только в случае использования метода покоординатного поиска. Однако, если после оптимизации методом координатного поиска еще раз оптимизировать сопротивление клапанов генетическим алгоритмом (таблицы 3 и 4), это дает дополнительную оптимизацию, в этом случае совместная оптимизация как балансировочных клапанов стояков, так и клапанов отопительных приборов позволяет получить наилучший результат. Данный эффект подтверждает теоретическое положение, что градиентные методы не гарантируют достижения глобального экстремума [9,15,16].

Различные достоинства и недостатки генетического алгоритма и координатного поиска, очень хорошо иллюстрирует рисунок 1, в котором видно, что координатный поиск работает быстрее, но генетический алгоритм позволяет, за счет постепенного приближения, достичь больше глубин оптимизации, хотя и работает медленнее.

Таблица 1. Сравнение результатов оптимизации (значения целевой функции относительно нормативной температуры).

	Регулирование только клапанов стояков	Регулирование только клапанов батарей	Регулирование и клапанов батарей и клапанов стояков
Метод покоординатного поиска	3.46	3.25	2.74
Генетический алгоритм с шагом 5	3.08	3.68	3.51
Генетический алгоритм с шагом 20	2.85	3.68	3.40
Без регулировки (все клапаны открыты)	5.14	5.14	5.14

Таблица 2. Сравнение результатов оптимизации (значения целевой функции относительно средней температуры).

	Регулирование только клапанов стояков	Регулирование только клапанов батарей	Регулирование и клапанов батарей и клапанов стояков
Метод покоординатного поиска	3.21	2.91	2.67
Генетический алгоритм с шагом 5	2.85	2.94	2.82
Генетический алгоритм с шагом 20	3.15	2.94	3.1
Без регулировки (все клапаны открыты)	3.26	3.26	3.26

Таблица 3. Оптимизация генетическим алгоритмом после оптимизации координатным поиском (значения целевой функции относительно нормативной температуры).

	Регулирование только клапанов стояков	Регулирование только клапанов батарей	Регулирование и клапанов батарей и клапанов стояков
Метод покоординатного поиска	3.21	3.25	2.74
Генетический алгоритм с шагом 20	2.95	2.99	1.96

Таблица 4. Оптимизация генетическим алгоритмом после оптимизации координатным поиском (значения целевой функции относительно средней температуры).

	Регулирование только клапанов стояков	Регулирование только клапанов батарей	Регулирование и клапанов батарей и клапанов стояков
Метод покоординатного поиска	3.21	2.91	2.67
Генетический алгоритм с шагом 20	2.93	2.6	1.94

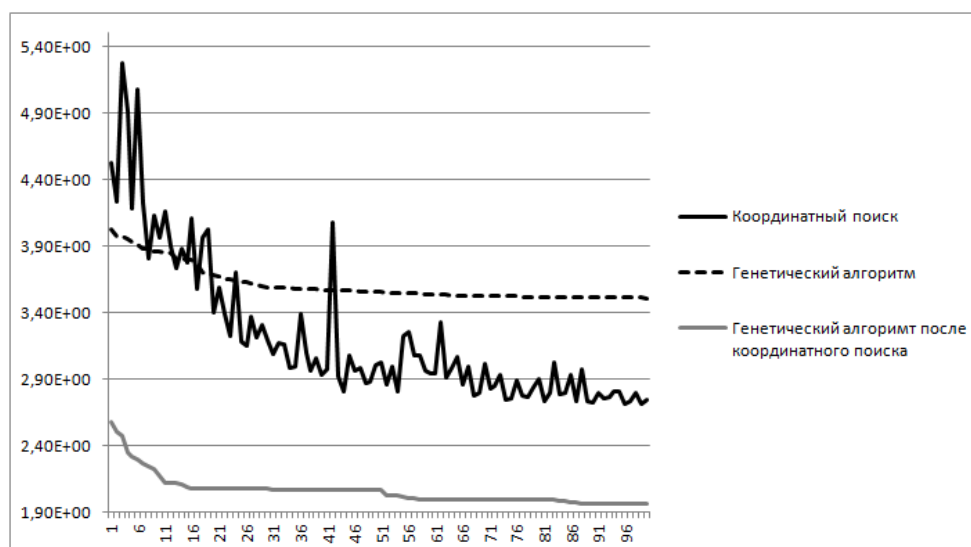


Рисунок 1. Сравнение истории оптимизации при использовании координатного метода и генетического алгоритма, а также при использовании генетического алгоритма после как дополнительной оптимизации координатного поиска.

5. Заключение

Как показывают результаты эксперимента, наилучшего результата оптимизации температурного дисбаланса можно достичь, если использовать совместное регулирование балансировочных клапанов стояков и клапанов отопительных приборов, если сначала применить оптимизацию методов покоординатного поиска, а затем дополнительно оптимизировать генетическим алгоритмом. Данный факт также подтверждает гипотезу, выдвинутую в [9]: «Объединение генетического алгоритма и градиентных методов позволит создать более эффективный алгоритм оптимизации (чем градиентные методы) с приемлемым временем вычисления».

6. Литература

- [1] Вологдин, С.В. Методы и алгоритмы повышения энергоэффективности многоуровневой системы централизованного теплоснабжения: монография / С.В. Вологдин, Б.А. Якимович. – Ижевск: Издательство ИЖГТУ им М.Т. Калашникова, 2015. – 264 с.
- [2] Умный город [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://city-smart.ru> (18.11.2018).
- [3] Звонарева, Ю.Н. Энергосбережение в системах теплоснабжения крупных муниципальных объединений, запитанных от нескольких источников тепла / Ю.Н. Звонарева, Ю.В. Ваньков // Известия томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2015. – Т. 326, № 11. – С. 75-82.
- [4] Захарова, А.С. Технология «Умный дом» как энергосберегающая технология будущего / А.С. Захарова, А.К. Орлова // Экономика и предпринимательство. – 2018. – Т. 5, № 94. – С. 1166-1169.
- [5] Лапаева, О.Ф. Трансформация энергетического сектора экономики при переходе к энергосберегающим технологиям и возобновляемым источникам энергии // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2010. – Т. 13, № 119. – С. 50-56.
- [6] Щеголихина, М.С. Энергосберегающие технологии – технологии будущего // Прогрессивные технологии и процессы. Сборник научных статей 2-й Международной молодежной научно-практической конференции в 3-х томах. – Курск, 2015. – С. 193-194.
- [7] Левинзон, С.В. Что нового в энергосберегающих технологиях. Перспективы // Международный журнал экспериментального образования. – 2015. – С. 78-80.
- [8] Шуравин, А.П. Обзор оптимизационных задач термогидравлических режимов зданий / А.П. Шуравин // Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции

- с международным участием. – Ставрополь: Центр научного знания «Логос», 2018 – С. 51-55.
- [9] Шуравин, А.П. Применение генетического алгоритма для оптимизации температурного режима помещений посредством регулирования балансировочных клапанов стояков / А.П. Шуравин, С.В. Вологдин // Интеллектуальные системы в производстве. – 2018. – Т. 16, № 2 – С. 113-120.
 - [10] Новицкий, Н.Н. Исследование задач и методов многокритериальной оптимизации гидравлических режимов распределительных тепловых сетей / Н.Н. Новицкий, А.В. Луценко // Научный вестник НГТУ. – 2016. – Т. 3, № 64. – С. 131-145.
 - [11] Вологдин, С.В. Математическая модель оптимизации затрат на производство и транспортировку тепловой энергии в системе централизованного отопления, при наличии регулятора напора и сопротивления / С.В. Вологдин, А.В. Мошкин // В мире научных открытий. – 2011. – № 8. – С. 281-290.
 - [12] Вологдин, С.В. Математическая модель оптимизации тепловых потоков между зданиями многоконтурной тепловой сети с целью снижения дисбаланса системы теплоснабжения за счет регулирования сопл элеваторных узлов // В мире научных открытий. – 2011. – № 12. – С. 194-204.
 - [13] Muñoz, E. Rationalizing Efficient Compositional Image Alignment: The Constant Jacobian Gauss-Newton Optimization Algorithm / E. Muñoz, P. Márquez-Neila, L. Baumela // International Journal of Computer Vision. – 2015. – Vol. 112(3) - P. 354-372.
 - [14] Chatterjee, K. Optimal cost almost-sure reachability in POMDPs / K. Chatterjee, M. Chmelík, R. Gupta, A. Kanodia // Artificial Intelligence. – 2016. – Vol. 234. – P. 26-48.
 - [15] Акулич, И.Л. Математическое программирование в примерах и задачах: Учеб. пособие для студентов эконом. спец. вузов. – СПб.: Лань, 2011. – 352 с.
 - [16] Коробейников, А.В. Программирование нейронных сетей: учебно-методическое пособие по дисциплинам «Методы оптимизации. Нейронные сети», «Нейрокомпьютерные системы» и «Нечеткая логика и генетические алгоритмы». – Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 2013. – С. 44.
 - [17] Рабинер, Л. Теория и применение цифровой обработки сигналов / Л. Рабинер, Б.М. Гоулд. – Мир: 1978. – 835 с.

Comparison of the characteristics of the genetic algorithm and the method of coordinates search to optimize the temperature mode of the indoor areas

A.P. Shuravin¹, S.V. Vologdin¹

¹Kalashnikov Izhevsk Technical University named after M.T. Kalashnikov, Studentcheskaia 7, Izhevsk, Russia, 426069

Abstract. The article substantiates the relevance of research optimization algorithms for solving various applied problems and for the artificial intelligence science. The necessity of solving the problems of optimizing the thermo-hydraulic buildings modes within the Smart City project is explained. The article presents a mathematical formulation of the optimization problem, as well as two methods for solving the present issue: the coordinates search method and the genetic algorithm. There is the description of the above algorithms, including the mathematical apparatus. The results of the experiment for mentioned optimization methods are presented. They include the chart of the function change by iterations and comparative table. In conclusion, it is concluded that the genetic algorithm shows better optimization results than the coordinates search method, but has a large computational cost. Confirmed the hypothesis that it is necessary to combine the genetic algorithm and the gradient method, which was put forward in a previous study (there is a reference).