

УДК 004.896:69.04

## ОПТИМИЗАЦИЯ СЕЧЕНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ БАЛКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА

ПУТИНЦЕВА А.В.<sup>1</sup>, *магистр*

<sup>1</sup> Кафедра информационных систем в строительстве, Ростовский государственный строительный университет, ул. Журавлева, д. 33, корпус 8, 344022, г. Ростов-на-Дону, Россия, e-mail: anputi@yandex.ru

**Аннотация. Цель.** В строительной отрасли при проектировании элементов конструкции главной задачей является снижение себестоимости конструкции и обеспечения ее прочности. Одним из путей решения этой проблемы является использование эволюционных методов. Цель статьи: исследовать методы, на основе которых проводится проектирование программного продукта для оптимизации параметров поперечного сечения железобетонной балки. Кроме того, автором проводится анализ стратегии для реализации программного продукта и оценивается допустимость применения разработанной методики к проектируемому объекту. **Методика.** Основная задача исследования заключается в построении математической модели оптимизации поперечного сечения балок. Автор приводит сравнение возможных методов решения поставленной задачи. В статье дается описание исследования функций генетического алгоритма. Кроме того, описаны функции приспособленности, мутации и формирования нового поколения. Разработанная методика реализована в программном продукте. **Результаты.** На основе генетического алгоритма разработан метод оптимизации элемента конструкции. Проведены расчеты в созданном программном продукте и выполнено сравнение полученных результатов с результатами расчетов по своду правил. Результаты исследования показали эффективность использования генетического алгоритма для оптимизации параметров поперечного сечения железобетонной балки. При небольшом количестве параметров результат становится известным за небольшое количество времени. Для решения подобной задачи методом полного перебора потребовалось бы на порядок больше времени. **Научная новизна.** Поиск оптимального решения из множества возможных решений улучшается при применении эволюционных методов. Генетические алгоритмы являются удачным решением многокритериальных задач. Многие методы, например метод градиентного спуска, останавливаются при достижении локального решения, а генетический алгоритм дает глобальное решение задач без остановки на локальных решениях. Это главное преимущество метода. **Практическая значимость.** Рассмотренная в статье эволюционная процедура и ее программная реализация дают возможность осуществлять оптимизацию параметров поперечного сечения железобетонных балок. Приведенные в статье сведения дают общее представление о применении генетического алгоритма в оптимизации параметров поперечного сечения балок.

**Ключевые слова:** эволюционный метод; поиск глобального решения; генетический алгоритм; железобетонная балка; оптимизация параметров; поперечное сечение

## OPTIMIZATION SECTION REINFORCED CONCRETE BEAM USING GENETIC ALGORITHMS

PUTINTSEVA A.V.<sup>1</sup>, *student*

<sup>1</sup> Department of information systems in construction, Rostov State University of Civil Engineering, 33/8, str. Zhuravleva, 344022, Rostov-on-Don, Russia, e-mail: anputi@yandex.ru

**Abstract. Purpose.** In the construction industry in the design of structural elements of the main task is to reduce the cost of construction and ensuring its strength. One solution to this problem is the use of evolutionary methods. The purpose of this article is to explore the methods on the basis of which is the design of software for optimization of cross-section of the reinforced concrete beam. In addition, the author analyzes the strategies for the implementation of the software and evaluated the admissibility of the application of the developed method to the projected object. **Methodology.** The main objective of the study is to build mathematical optimization model cross-section beams. The author gives a comparison of possible methods of solving the task. The article describes the study of the functions of the genetic algorithm. Also are described fitness function, mutations and formation of a new generation. The developed method is implemented in a software product. **Findings.** On the basis of genetic algorithm been developed optimization method structural element. The calculations in created software product and compared the results with the results of calculations on a set of rules. The results showed the effectiveness of using genetic algorithm to optimize the parameters of the cross-section of a reinforced concrete beam. With a small number of parameters, the results become known for the small amount of time. To solve such a problem full brute force would take significantly more time. **Originality.** Search for the best solutions from the set of possible solutions is improved by the application of evolutionary methods. Genetic algorithms are a good solution to the task multicriteria. Many methods, such as method gradient descent, stops when reaching a local solution, and genetic algorithm provides a global solution to the task, not stopping on local solutions. This is the main advantage of the method. Practical value. Considered in the article evolutionary process and its software implementation provide an opportunity to carry out the optimization the parameters of the cross section of reinforced concrete beams. In article gives an overview of information on the use of genetic algorithm to optimize the parameters a cross-section of the beams.

**Keywords:** evolutionary method; search for a global solution; Genetic algorithm; reinforced concrete beam; parameter optimization; cross section

## ОПТИМІЗАЦІЯ ПЕРЕРІЗУ ЗАЛІЗОБЕТОННОЇ БАЛКИ З ВИКОРИСТАННЯМ ГЕНЕТИЧНОГО АЛГОРИТМУ

ПУТИНЦЕВА А.В.<sup>1</sup>, *магістр*

<sup>1</sup>Кафедра інформаційних систем в будівництві, Ростовський державний будівельний університет, вул. Журавльова, д. 33, корпус 8, 344022, г. Ростов-на-Дону, Росія, e-mail: anputi@yandex.ru

**Анотація. Мета.** В будівельній галузі при проектуванні елементів конструкції головним завданням є зниження собівартості конструкції та забезпечення її міцності. Одним із шляхів вирішення цієї проблеми є використання еволюційних методів. Мета статті: дослідити методи, за допомогою яких проводиться проектування програмного продукту для оптимізації параметрів поперечного перерізу залізобетонної балки. Крім того, автором виконується аналіз стратегії для реалізації програмного продукту і дається оцінка допустимості застосування розробленої методики до об'єкту проектування. **Методика.** Основна задача дослідження полягає в побудові математичної моделі для оптимізації параметрів перетину. Автор наводить порівняння можливих методів вирішення поставленої задачі. У статті дається опис дослідження функцій генетичного алгоритму. Також наведені функції пристосованості, мутації і формування нового покоління. Розроблена методика реалізована в програмному продукті. **Результати.** На основі генетичного алгоритму розроблено метод оптимізації елементу конструкції. Проведено розрахунки в розробленому програмному продукті і виконано порівняння отриманих результатів з результатами розрахунків по зведенню правил. Результати дослідження показали ефективність використання генетичного алгоритму для оптимізації параметрів перетину залізобетонної балки. При невеликій кількості параметрів, результат стає відомим за невелику кількість часу. Для вирішення подібної задачі методом повного перебору потреба часу буде на порядок вище. **Наукова новизна.** Пошук оптимального рішення з безлічі можливих рішень поліпшується при застосуванні еволюційних методів. Генетичні алгоритми є вдалим рішенням багатокритеріальних задач. Багато методів, наприклад як метод градієнтного спуску, зупиняються при досягненні локального рішення, а генетичний алгоритм надає глобальне рішення задач без зупинки на локальних рішеннях. Це головне перевага методу. **Практична значимість.** Розглянута в статті еволюційна процедура і її програмна реалізація дають можливість здійснювати оптимізацію параметрів перетину залізобетонних балок. Наведені у статті знання дають загальне уявлення про застосування генетичного алгоритму в оптимізації параметрів перерізу балки.

**Ключові слова:** еволюційний метод; пошук глобального рішення; генетичний алгоритм; залізобетонна балка; оптимізація параметрів; перетин

### Введение

Генетический алгоритм является сравнительно молодым направлением в области искусственного интеллекта и принятия решения. Со временем, возможности персональных компьютеров увеличивались, и рос интерес к искусственному интеллекту и генетическому алгоритму. Популярность генетического алгоритма заключается в его способности манипулировать одновременно многими параметрами и легко адаптироваться под нужную среду разработки. Этот алгоритм является перспективным направлением в области оптимизации и моделирования. Основные стратегии, принципы и концепции генетических алгоритмов хорошо описаны в книге [2]. Все термины и обозначения, используемые в данной статье, соответствуют работе [2]. В статье приводится описание программного продукта для оптимизации поперечного сечения железобетонной балки на основе генетического алгоритма.

В современном мире существует несколько методов, которые позволяют осуществить подбор допустимого сечения элемента конструкции. Большинство из них требуют обширных знаний в

области конструирования того или иного элемента. В данной работе поставлена задача: применить генетический алгоритм для подбора поперечного сечения железобетонной балки и создать программный продукт «Подбор сечений» для реализации методики. Задача сама по себе не является масштабной, так как в ней рассмотрен только один из возможных элементов конструкции – балка.

Для решения задачи можно использовать несколько способов:

- полный перебор позволяет найти точное решение поставленной задачи, но обычно при большом количестве вариантов этот способ требует существенных временных затрат;
- метод градиентного спуска - надежный метод и при довольно широкой области исследования достижение минимума гарантировано. Недостатки: большая трудоёмкость; при попадании в локальный минимум невозможен дальнейший поиск глобального минимума.
- достижение глобального минимума с использованием генетического алгоритма требует больших затрат времени для получения результата,

но ликвидируется опасность попадания в локальный минимум.

Цель статьи - исследовать процедуры определения оптимальных параметров поперечного сечения балки на основе генетических алгоритмов.

Генетический алгоритм является, возможно, не самым лучшим и не самым быстрым методом оптимизации параметров поперечного сечения железобетонной балки. Исследования показали эффективность этого метода для решения поставленной задачи.

### Методика

#### Математическая постановка задачи

Для лучшего осмысления решаемой задачи необходимо изучить процесс подбора параметров поперечного сечения железобетонной балки. Можно выделить 2 этапа данного процесса:

1) Нахождение максимального изгибающего момента в балке от заданных нагрузок:  
 а) определение реакций опор;  
 б) построение эпюры изгибающих моментов;  
 в) анализ эпюры, нахождение экстремумов функции  $M(x)$ .

2) По заданным параметрам поперечного сечения железобетонной балки и полученным максимальным значениям изгибающих моментов выполняется расчет площади требуемой арматуры. Расчетные формулы берутся из свода правил [6] пункт 6.2.9-6.2.10.

Таким образом, можно подобрать оптимальные параметры сечения арматуры и проверить найденное решение на соответствие заданным условиям.

Рассмотрим смысл генетического алгоритма и его функции в созданном программном продукте.

Идея генетических алгоритмов заимствована у живой природы и состоит в организации эволюционного процесса, конечной целью которого является получение оптимального решения в сложной комбинаторной задаче.

В работе [4] можно найти базовые знания о генетических алгоритмах, эволюционном программировании, нечетких системах и связях этих направлений с нейронными сетями.

Существует много статей и докладов по использованию генетических алгоритмов в проектировании элементов конструкции, например [3,5,7], в которых приводится полная реализация генетических алгоритмов для определенных задач. Кроме того, существуют англоязычные статьи по применению эволюционных методов [8-10]. Не отстают и интернет ресурсы, на просторах которых размещаются подобранные методы решения некоторых задач с использованием генетических алгоритмов [1,11].

Для оптимизации процесса проектирования железобетонной балки необходимо определить, что важнее получить в результате вычислений.

С помощью генетического алгоритма находят решения и многокритериальных задач, но в поставленной задаче является приоритетом упрощение методики. Критериями оптимизации могут быть стоимостные и прочностные ресурсы.

Назначим стоимость балки критерием

$$\text{Стоимость}(x_1, x_2, \dots, x_n) \rightarrow \min$$

и введем ограничение на прочность при постоянной площади поперечного сечения:

$$M \leq M_{дон}$$

где  $x_1, x_2, \dots, x_n$  - управляемые параметры оптимизации.

#### Выбор начальной популяции

В силу того, что в первоначальной задаче принимается площадь поперечного сечения балки и класс бетона постоянными, то параметрами оптимизации являются количество  $N$ , диаметр  $d$  и класс  $Cl$  стержней арматуры. Критерий и ограничение зависят от параметров арматуры.

При построении генетических алгоритмов, задается начальное поколение. В качестве генов в хромосоме случайным образом выбираются значения параметров оптимизации  $(N, d, Cl)$ . Эти гены имеют ограничения

$$\{N_i, d_i, Cl_i\} - i - \text{я хромосома.}$$

Число стержней арматуры не должно быть меньше 2, так как балка с одним стержнем арматуры не конструируется. И не целесообразно иметь более 8-ми стержней по причине большой загруженности балки арматурой, т.е.

$$2 \leq N \leq 8.$$

Диаметр стержней арматуры выбирается случайным образом из возможных диаметров по своду правил [6]:

$$6 \leq d \leq 40, \text{ мм.}$$

Возможные классы стержней арматуры взяты по своду правил [8]:

$$Cl = \{ "A240", "A300", "A400", "A500" \}.$$

Популяция создается из  $n$  хромосом, в которых гены выбираются случайным образом из заданных ограничений

$$\left( \begin{array}{l} \{N_1, d_1, Cl_1\} \\ \{N_2, d_2, Cl_2\} \\ \dots \\ \{N_n, d_n, Cl_n\} \end{array} \right) - \text{популяция из } n \text{ хромосом.}$$

#### Функция приспособленности

Критерий (целевая функция) представляет собой меру приспособленности данной особи в популяции. Целевая функция играет важную роль, так как позволяет оценить степень приспособленности конкретных особей в популяции и выбрать из них наиболее приспособленные.

Функция приспособленности (1) определяет полную стоимость балки. Лучшими являются те хромосомы, у которых стоимость балки наименьшая, т.е. целевая функция стремится к минимуму.

$$F(CH_i) = bh - A_s(CH_i)C_b + A_s(CH_i)Cl_i \rightarrow \min, \quad (1)$$

где  $CH_i = \{N_i, d_i, Cl_i\}$  -  $i$ -я хромосома;  $F(CH_i)$  - функция приспособленности  $i$ -ой хромосомы;  $b$  - ширина поперечного сечения балки;  $h$  - высота поперечного сечения балки;  $C_b$  - стоимость бетона;  $Cl_i$  - стоимость арматуры класса  $Cl$   $i$ -ой хромосомы;  $A_s(CH_i)$  - площадь арматуры  $i$ -ой хромосомы, вычисляемая по формуле (2)

$$A_s(CH_i) = N_i \frac{\pi d_i^2}{4} \quad (2)$$

Условия завершения работы генетического алгоритма

Генетический алгоритм завершает работу в двух случаях:

1. найден локальный минимум функции приспособленности и хромосома удовлетворяет ограничению

$$M(CH_i) > M,$$

где  $M(CH_i)$  - вычисляемый момент  $i$ -ой хромосомы;  $M$  - максимальный момент в сечениях балки от заданных нагрузок.

2. выделенное время на работу генетического алгоритма закончилось.

*Селекция*

Метод рулетки - отбирает особей с помощью  $n$  "запусков" рулетки. Колесо рулетки содержит по одному сектору для каждого члена популяции. Размер  $i$ -ого сектора пропорционален соответствующей величине  $P_s(CH_i)$ , вычисляемой по формулам (3) и (4):

$$V(CH_i) = P_s(CH_i) * 100\%, \quad (3)$$

где  $V(CH_i)$  - процент приспособленности  $i$ -ой хромосомы;  $P_s(CH_i)$  - вероятность селекции  $i$ -ой хромосомы

$$P_s(CH_i) = \frac{\sum_{i=1}^n F(CH_i) - F(CH_i)}{\sum_{i=1}^n F(CH_i)}. \quad (4)$$

На рис. 1 представлено примерное колесо рулетки с процентом приспособленности хромосом.

Чем больше процент приспособленности, тем больше сектор на диаграмме. В соответствии с задачей необходимо выбрать те хромосомы, которые будут иметь наибольший процент приспособленности для дальнейшего скрещивания.

*Скрещивание*

После выбора хромосом для скрещивания выбирается случайным образом точка скрещивания ( $k = 1 \dots 2$ ). Затем хромосомы родители передают друг другу гены в зависимости от положения точки скрещивания. При  $k = 1$  скрещивание происходит по формуле (5):

$$CH(father)\{N_1, d_1, Cl_1\} + CH(mother)\{N_2, d_2, Cl_2\} = CH(child)\{N_1, d_2, Cl_2\}, \quad (5)$$

где  $CH(father)$ ,  $CH(mother)$ ,  $CH(child)$  - соответственно хромосомы отца, матери и ребенка.

При  $k = 2$  скрещивание происходит по формуле (6):

$$CH(father)\{N_1, d_1, Cl_1\} + CH(mother)\{N_2, d_2, Cl_2\} = CH(child)\{N_1, d_1, Cl_2\}, \quad (6)$$

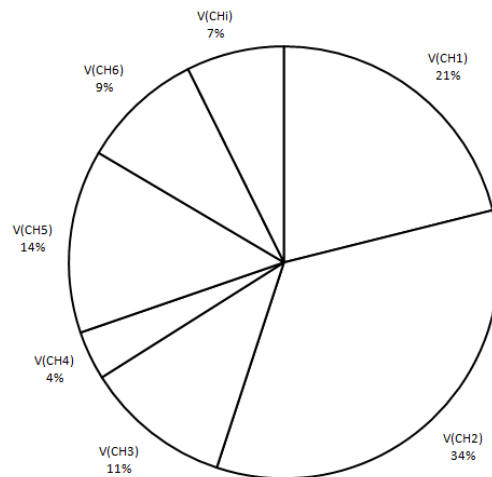


Рис. 1. Колесо рулетки / The roulette wheel

*Мутация*

Мутация хромосом выполняется на популяции потомков, образованных в результате скрещивания, и проводится раз в 10 поколений.

Случайным образом выбирается ген ( $N, d, Cl$ ), который будет мутировать. В зависимости от выбора гена для мутации хромосома изменяется в соответствии с функцией (7).

$$mutation(CH_i) = \begin{cases} \{N_m, d_i, Cl_i\} \\ \{N_i, d_m, Cl_i\}, \\ \{N_i, d_i, Cl_m\} \end{cases} \quad (7)$$

где  $mutation(CH_i)$  - функция мутации;

$N_m, d_m, Cl_m$  - мутирующие гены хромосом.

*Создание новой популяции*

Новая популяция создается на основе потомков, которые получились после проведения генетической операции скрещивания. Каждый родитель дает по два потомка тем самым численность популяции всегда одна и та же.

Перечисленные функции реализованы в программном продукте «Подбор сечений», главная форма и форма с результатами показаны на рис. 2. В окне с результатами отображается все необходимые сведения о подобранной арматуре.

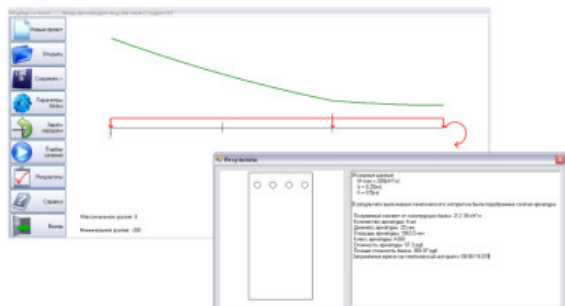


Рис. 2. Окна программы "Подбор сечений" / Window "Selection section"

Рассмотрим реализацию методики в программном продукте «Подбор сечений» на простейшем примере.

#### Тестирование и получение результатов

В качестве примера выполнялась оптимизация параметров сечения арматуры жестко закрепленной железобетонной балки.

Исходная информация

Параметры поперечного сечения балки:

- высота  $h = 500$  мм;
- ширина  $b = 250$  мм;
- длина  $l = 3$  м;

На балку действуют:

- сила  $P = -30$  кН, с привязкой к началу балки  $a_p = 2$  м;
- изгибающий момент  $M = 50$  кН\*м, с привязкой к началу балки  $a_M = 3$  м;
- равномерно распределенная по всей длине балки нагрузка интенсивностью  $q = -20$  кН/м.

Расчетная схема балки показана на рис. 3.

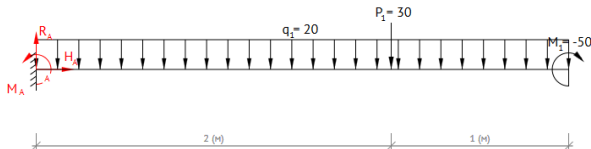


Рис. 3. Схема балки с нагрузками / Diagram of a beam with loads

Класс бетона «В30».

После ввода исходной информации программа продукта «Подбор сечений» строит эпюру изгибающих моментов (рис. 4). Максимальный момент находится в первом узле  $M_{\max} = 200$  кН\*м.

После проведения расчета программа формирует отчет по подобранному решению. В результате оптимизации получено: арматура должна иметь 4 стержня класса "А300" диаметром 25 мм.



Рис. 4. Эпюра изгибающих моментов / Curve of the bending moments

Результаты оптимизации:

- вычисляемый момент хромосом: 212.39 кН\*м;
- количество стержней арматуры: 4 шт.;
- диаметр стержней арматуры: 25 мм;
- площадь поперечного сечения арматуры: 1963.5 мм<sup>2</sup>;
- класс стержней арматуры: А300;
- стоимость арматуры: 97.3 руб.;
- полная стоимость балки: 368.06 руб.

Решение задачи было получено по истечению заданного времени. На рис. 5 представлено распределение хромосом по ценовым категориям наилучших поколений.



Рис. 5. Гистограмма результатов / Histogram results

Стоимость балки с наибольшим количеством появившихся хромосом является глобальным минимумом. При этом выполняется ограничение по прочности.

На гистограмме приведены только наибольшие количества хромосом из всех возможных вариантов.

Для сравнения выполнен расчет по своду правил [8]. В результате получено: количество стержней арматуры 3, диаметр арматуры 28 мм, площадь поперечного сечения арматуры 1847 мм<sup>2</sup>, общая стоимость балки 368,05 руб. Полученные решения мало отличаются между собой. Таким образом, с помощью программного продукта получено глобальное решение.

#### Выводы

Разработанный программный продукт имеет следующие преимущества:

- оптимизация происходит по нескольким параметрам;
- способность среди множества локальных минимумов находить глобальный минимум;
- простой ввод исходной информации;
- минимальные знания в области конструирования железобетонной балки.

В поставленной задаче количество параметров оптимизации не так велико. Это является преимуществом, так как за малое количество времени находится глобальный минимум. При увеличении количества параметров соответственно увеличивается и продолжительность расчетов.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ/ REFERENCES

1. Алгоритмы. Методы. Исходники. [Электронный ресурс]– Режим доступа: <http://algotlist.manual.ru/> - Загл. с экрана. - Проверено: 22.08.2015.  
Algoritmy. Metody. Iskhodniki. [Algorithms. Methods. Sources]. - Available at: <http://algotlist.manual.ru/> (Accessed 22 August 2015).
2. Гладков, Л. А. Генетические алгоритмы / Л. А. Гладков, В. В. Курейчик, В. М. Курейчик – Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 320 с.  
Gladkov L.A., Kureychik V.V., Kureychik V.M. *Geneticheskie algoritmy* [Genetic algorithms] – Moscow, FIZMATLIT Publ., 2006. 320 p.
3. Мандриков, Е. А., Применение распределенных вычислений для автоматической генерации конечных автоматов с использованием генетических алгоритмов / Е. А. Мандриков, В. А. Кулев. // Сборник докладов XI Международной конференции по мягким вычислениям и измерениям (SCM'2008). СПб.: СПбГЭТУ. 2008, с. 255-260.  
Mandrikov E.A., Kulev V.A. *Primenenie raspredelennykh vychisleniy dlya avtomaticheskoy generatsii konechnykh avtomatov s ispolzovaniem geneticheskikh algoritmov* [The use of distributed computing for the automatic generation of finite automata using genetic algorithms] // *Sbornik dokladov XI Mezhdunarodnoy konferentsii po myagkim vychisleniyam i izmereniyam* [Proceedings of the XI International Conference on Soft Computing and Measurements] (SCM'2008). St. Petersburg: SPbSU Publ. 2008, pp 255-260.
4. Рутковская, Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Д. Рутковская, М. Пилинский, Л. Рутковский. — Москва: Горячая линия-Телеком, 2006, 452 с.  
Rutkovskaya D., Pilinskiy M., Rutkovskiy L. *Neyronnye seti, geneticheskie algoritmy i nechetkie sistemy* [Neural networks, genetic algorithms and fuzzy systems]. – Moscow, Hotline Telecom Publ., 2006. 452 p.
5. Симбиркина, В. Оптимальное проектирование строительных конструкций с помощью генетического алгоритма / Симбиркина, В. // Международная научно-техническая конференция "Пространственные конструктивные системы зданий и сооружений, методы расчета, конструирования и технология возведения", 2008.  
Simbirkina V. *Optimalnoe proektirovanie stroitelnykh konstruktсий s pomoshchyu geneticheskogo algoritma* [Optimal design of building structures using genetic algorithm] / *Mezhdunarodnaya nauchno-tehnicheskaya konferentsiya "Prostranstvennye konstruktivnye sistemy zdaniy i sooruzheniy,*
- metody rascheta, konstruirovaniya i tekhnologiya vozvedeniya*" [International Scientific Conference "The spatial design of buildings and structures, methods of calculation, design and construction of the technology"], 2008.
6. СП 52-101-2003 Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного напряжения арматуры. [Электронный ресурс]. Москва: 2004, 72 с. – Режим доступа: <http://files.stroyinf.ru/data1/41/41734/> .Загл. с экрана. - Проверено: 02.10.2015.  
*SP 52-101-2003 Betonnye i zhelezobetonnye konstruktсии bez predvaritelnogo napryazheniya armatury* [Set of rules 52-101-2003 Concrete and reinforced concrete structures without prestressing] - Moscow: 2004, p. 72. Available at: <http://files.stroyinf.ru/data1/41/41734/> (Accessed 02 October 2015).
7. Структурно-параметрическая оптимизация стержневых металлических конструкций на основе эволюционного моделирования / И. Н. Серпик, А. В. Алексейцев, Ф. Н. Левкович, А. И. Тютюнников // Известия вузов. Строительство. 2005, №8, С. 16-24  
Serpik I.N., Alekseytsev A.V., Levkovich F.N., Tyutyunnikov A.I. *Strukturno-parametricheskaya optimizatsiya stержnevyykh metallicheskiykh konstruktсий na osnove evolyutsionnogo modelirovaniya* [Structural-parametric optimization of core metal structures on the basis of evolutionary modeling] // *Izvestiya vuzov. Stroitelstvo. - Proceedings of the universities. Building*, 2005, no. 8, pp. 16-24.
8. Ferreira, C., Function finding and the creation of numerical constants in gene expression programming, In J. M.Benitez, O. Cordon, F. Hoffmann, and R. Roy, eds, *Advances in Soft Computing: Engineering Design and Manufacturing*, Springer-Verlag, 2003, pp. 257-266.  
Ferreira C., "Function finding and the creation of numerical constants in gene expression programming," In J. M.Benitez, O. Cordon, F. Hoffmann, and R. Roy, eds, *Advances in Soft Computing: Engineering Design and Manufacturing*, Springer-Verlag Publ., 2003, pp. 257-266.
9. Ferreira, C., "Gene expression programming: A new adaptive algorithm for solving problems," *Complex Systems*, 13 (2): 2001, pp. 87-129.
10. Ferreira, C., "Genetic representation and genetic neutrality in gene expression programming," *Advances in Complex Systems*, 5 (4): 2002, pp. 389-408.
11. NeuroProject. – Режим доступа: <http://www.neuroproject.ru/>. - Загл. С экрана. - Проверено: 22.08.2015.  
NeuroProject. - Available at: <http://www.neuroproject.ru/> (Accessed 22 August 2015).