



(17)-0370-1

ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ РАМ ПЕРЕМЕННОЙ ЖЕСТКОСТИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА ОПТИМИЗАЦИИ

А. Г. Солохненко¹, И. В. Роменский²

ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»,
2, ул. Державина, г. Макеевка, ДНР, 86123.
E-mail: ¹ solohnenko1509@gmail.com, ² riv_2005@mail.ru

Получена 13 ноября 2017; принята 24 ноября 2017.

Анотация. В статье рассматривается вопрос использования генетического алгоритма оптимизации для подбора рациональных параметров металлических рам переменной жесткости (переменного сечения). Приведен пример простейшего генетического алгоритма на блок-схеме. Описывается сущность данного алгоритма, его понятийный аппарат, принцип работы и основные проблемы его использования. Приводится пример реализации простейшего алгоритма поиска оптимального решения для рамы переменной жесткости пролетом с 9 варьируемыми параметрами.

Ключевые слова: оптимизация, генетический алгоритм, металлическая рама переменной жесткости, итерации, оптимум, генерации, вектор варьируемых параметров.

ВИБІР РАЦІОНАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ РАМ ЗМІННОЇ ЖОРСТКОСТІ ПРИ ВИКОРИСТАННІ ГЕНЕТИЧНОГО АЛГОРИТМУ ОПТИМІЗАЦІЇ

О. Г. Солохненко¹, І. В. Роменський²

ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури»,
2, вул. Державіна, м. Макіївка, ДНР, 86123.
E-mail: ¹ solohnenko1509@gmail.com, ² riv_2005@mail.ru

Отримана 13 листопада 2017; прийнята 24 листопада 2017.

Аннотация. У статті розглядається питання використання генетичного алгоритму оптимізації для підбору раціональних параметрів металевих рам змінної жорсткості (змінного перерізу). Наведено приклад найпростішого генетичного алгоритму на блок-схемі. Описується сутність даного алгоритму, його понятийний апарат, принцип роботи та основні проблеми його використання. Наводиться приклад реалізації найпростішого алгоритму пошуку оптимального рішення для рами змінної жорсткості пролетом з дев'ятьма змінними параметрами.

Ключові слова: оптимізація, генетичний алгоритм, металева рама змінної жорсткості, ітерації, оптимум, генерації, вектор варійованих параметрів.

THE CHOICE OF RATIONAL PARAMETERS OF FRAMES OF VARIABLE RIGIDITY, WHILE USING GENETIC ALGORITHM OPTIMIZATION

Alexey Solohnenko¹, Igor Romensky²

*Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture,
2, Derzhavina Str., Makeyevka, DPR, 86123.*

E-mail: ¹ solohnenko1509@gmail.com, ² riv_2005@mail.ru

Received 13 November 2017; accepted 24 November 2017.

Abstract. The article deals with the use of the genetic optimization algorithm for selecting rational parameters of variable-rigidity metal frames (variable cross-section). An example of the simplest genetic algorithm on the block diagram has been given. The essence of this algorithm, its conceptual apparatus, the operating principle and the main problems of its use has been described. An example of the implementation of the simplest algorithm for finding the optimal solution for a variable-rigidity frame with a span of 9 variable parameters has been given.

Keywords: optimization, genetic algorithm, metal frame variable rigidity, iteration, optimum, generation, vector of variable parameters.

За последние годы в строительстве и экономике произошло множество изменений, которые наложили свой отпечаток на методы расчетов металлических конструкций. Старые методики, которыми привыкли пользоваться инженеры, теперь дают недостаточную точность либо слишком большие запасы, а следовательно и перерасход металла в конструкциях. Данные проблемы все ближе подводят инженеров к необходимости использования точных методов расчета и оптимизации конструкций, дающих оптимальные параметры для их создания.

Существующие методы далеко не всегда удовлетворяют требованиям инженеров-проектировщиков и требуют доработки, т. к. зачастую могут учитывать только те или иные проектные характеристики, а не их совокупность. Данную проблему можно решить лишь при использовании сложных комплексов системного проектирования. Параметрами, которые являются важнейшими при оптимизации, являются: надежность, масса, габаритные размеры, стоимость и др.

При этом основные трудности связывают с поиском оптимального решения при взаимном противоречии многих параметров и недостатком априорной информации для поиска. С учетом этого процедура проектирования должна одновременно генерировать многообразие новых вариантов (сочетаний) и отсекал неподходящие. Алгоритмом, позволяющим решить такие зада-

чи, является генетический алгоритм оптимизации (ГА), получивший широкое распространение благодаря трудам Дж. Холланда в 60-х годах XX века [4].

Появившись как упрощенное описание эволюционных перестроек в природных популяциях организмов, ГА благодаря стараниям многочисленных исследователей на сегодняшний день превратились в мощную поисковую процедуру, ориентированную на решение задач глобальной оптимизации в широчайшем диапазоне возможных применений – от создания алгоритмов поиска в распределенных базах данных в условиях высокой степени неопределенности исходных критериев (Data Mining) до решения прикладных задач при проектировании современных технических устройств и конструкций [11].

Данный алгоритм является иерархической моделью с чертами деревьев последовательностей решений. ГА базируются на теории эволюции, которая основана на теории селекции, формулируемой таким образом: чем выше приспособленность особи, тем выше вероятность того, что в потомстве, полученном с ее участием, признаки, определяющие приспособленность, будут выражены еще сильнее. Такой подход эмитирует процесс эволюции, а точнее наследование и рекомбинацию генов.

Такой ГА является применимым к инженерным задачам оптимизации, и в строительных изысканиях особью будет то или иное решение

(с набором определенных искомым параметров), а приспособленностью данной особи будет являться способность удовлетворять набору требуемых критериев и поставленным ограничениям. Хромосомы же будут содержать n генов, каждый из которых будет соответствовать определенному количеству искомым переменных [1].

Принцип работы алгоритма является полностью природным и основан на механизме популяционной генетики, в котором при манипуляции набором хромосом формируется генотип новой особи путем наследования генов от предшественника случайным образом, называемом в природе мутацией. Также для ГА характерны такие термины, как фитнес (набор лучших параметров, отвечающих требованиям) и генопул (набор генов соответственно).

В классических эмпирических методах оптимизации генерируется первоначальный вариант конструкции, вычисляется величина ее выходных величин для определенного варианта расчета. Затем в соответствии с выбранным алгоритмом изменяются параметры объекта оптимизации, вычисляются выходные величины и т. д. Процедура повторяется, пока не будет достигнут определенный критерий функции цели.

Проблема работы ГА состоит в том, что в общем случае приходится работать с существенно нелинейной функцией многих переменных, находить глобальный экстремум (максимума или минимума), который традиционными методами вовсе не гарантируется и может занять неопределенно долгое время, либо потребовать значительного количества вычислительной мощности [7].

Таким образом, возникает необходимость в подходящем способе описания технических объектов, которым становится вектор переменных проектирования. Он подразумевает символическое кодирование информации об объекте. В определенном смысле можно утверждать, что категория вектор переменных проектирования играет в технике ту же роль, что и категория генотип в биологии. Группируя ключевые параметры объекта в вектор переменных, мы, по существу, придаем им статус генетической информации. Именно генетической, потому что, во-первых, ее достаточно для того, чтобы построить сам объект, а во-вторых, она служит исходным материалом при генерации генотипов объектов следующего поколения [3].

Как и в биологическом прототипе, здесь присутствует гипотеза селекции — в качестве родительских всегда выступают лучшие, а не произвольные комбинации параметров объекта (особи) из популяции потенциальных решений, неудачные же решения отбрасывают на текущем шаге (можно считать, что они вымирают).

Поэтому генетический алгоритм на фоне других численных методов оптимизации отличается тем, что он заимствует из биологии множество важных принципов, адаптируя их под необходимые цели, а именно:

- понятийный аппарат;
- идею коллективного поиска экстремума при помощи популяции особей;
- способы представления генетической информации;
- способы передачи генетической информации в череде поколений (генетические операторы);
- идею о преимущественном размножении наиболее приспособленных особей (речь идет не о том, даст ли данная особь потомков, а о том, сколько будет у нее потомков).

Генетический алгоритм, представленный на рис. 1, является простейшим описанием процесса эволюции решений для одного поколения. Основные процессы таковы:

- 1. Начальная популяция.** Определенное количество индивидов (решений) со случайным набором генов и хромосом.
- 2. Оценка.** Определение фитнеса на основании целевой функции.
- 3. Селекция.** Процесс выбора индивидов случайно или на основе их прежнего фитнеса с присвоением статусов.
- 4. Воспроизводство.** Процесс продолжения рода, при котором в результате рекомбинации генов получают новые индивиды.
- 5. Мутация.** Процесс изменения отдельных генов общего генопула. Благодаря которому генопул особей обновляется и не происходит потеря многообразия решений после малого числа генераций.
- 6. Оценка новых индивидов.** Процесс определения фитнеса новых решений.
- 7. Замена индивидов.** Процесс исключения неподходящих индивидов (решений) из общей популяции.
- 8. Прекращение.** Это сам критерий прекращения решения алгоритма, который выбирается

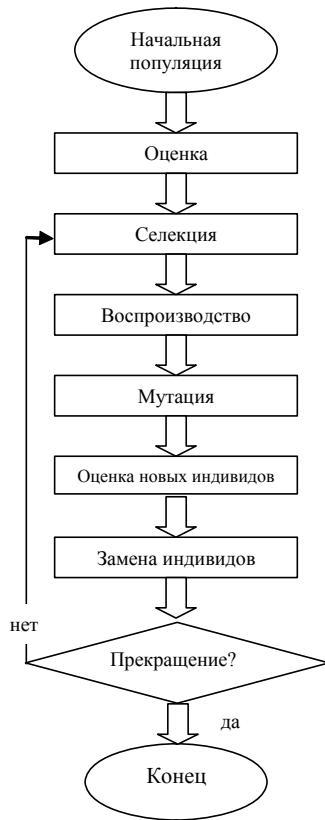


Рисунок 1. Пример простейшего ГА.

в зависимости от требований к точности алгоритма.

Критерий прекращения может быть двух типов [14]:

- 1) контроль изменения фитнеса (оценка изменения фитнеса), при котором если фитнес существенно не изменяется, то процесс решения прекращается;
- 2) ограничение числа итераций.

Что касается принятия того или иного критерия прекращения, то все зависит от необходимой точности результата и длительности расчета. Оба критерия имеют свои недостатки, среди которых:

- для критерия «контроль фитнеса» достижение максимального фитнеса может занять длительное количество времени, либо при случайной мутации может быть достигнута лучшая величина фитнеса, но в таком случае будет достигнут лишь субоптимум (локальный оптимум);
- при ограничении числа итераций достижение оптимума уже не является итоговой задачей, а выбирается решение, удовлетворяющее принятым ограничениям.

Таким образом, основными этапами ГА будут:

- 1) создание исходного набора решений;
- 2) стохастическая, но целенаправленная выборка решений, формируемых новый набор;
- 3) создание принципиально новых решений.

Каждое из решений первоначального набора так же, как и нового набора, полученные с помощью рекомбинации генов, могут как соответствовать всем наложенным требованиям (ограничениям), так и нарушать одно или более из них. При этом некоторые из недопустимых решений (особей) популяции потенциально станут очень важными источниками возможных улучшений будущих решений. Поэтому вероятность выбора особей должна быть увеличена, чтобы вследствие смены поколений не допустить вырождения набора решений (особей) в недопустимое множество (рис. 2) [8]. Поэтому необходимо использование искусственных ограничений для предотвращения вырождения популяции, такие как: адап-

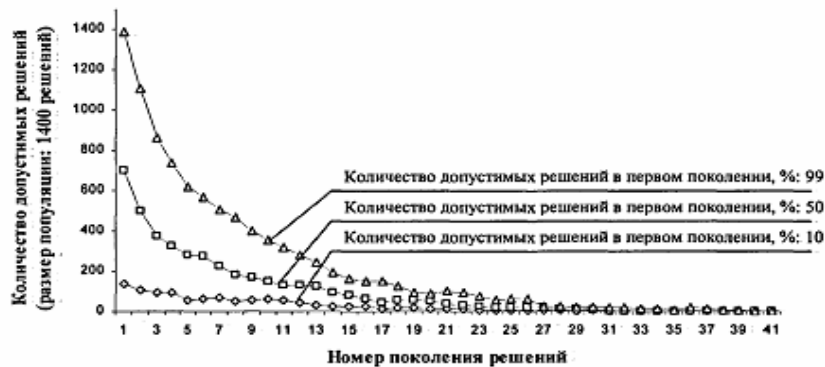


Рисунок 2. Изменение количества допустимых решений при вероятности выбора, равной отношению количества решений к размеру популяции.

тивное изменение значений штрафных функций или разделение пространства случайных событий [14, 15].

Таким образом, вероятность выбора допустимых решений можно назначить, например, в соответствии с их количеством и (или) качеством, но не менее, чем некая заданная минимальная вероятность (1):

$$\sum_{i=1}^{N_f} P_i^{(f)} = P_f, \sum_{i=1}^{N_{inf}} P_i^{(inf)} = P_{inf}, P_f + P_{inf} = 1, (1)$$

где P_f и P_{inf} – количество допустимых и недопустимых решений соответственно.

Для иллюстрации применимости ГА к задаче оптимизации рам переменной жесткости используем программу оптимизации на основе ГА.

Задача оптимизации при этом формулируется как определение вектора проектных параметров

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_{Nd}\}^T,$$

где Nd – количество проектных параметров, соответствующих минимуму целевой функции (2):

$$W = F(X). (2)$$

При выполнении ограничений (условий):

$$g_i(X) \leq 0, i = 1, 2, \dots, N_c, (3)$$

где g_i – i -е ограничение, наложенное на вектор X проектных параметров;

N_c – количество ограничений.

Ограничениями для алгоритма являются:

1. Ограничения по прочности элементов.
2. Ограничения по устойчивости рамы в ее плоскости.
3. Ограничения по устойчивости изгибаемых и внецентренно-сжатых элементов рамы.
4. Ограничения по устойчивости поясных листов и стенок элементов.

Целевая функция выражает объем материала для всех элементов рамы и оптимизируется по критерию минимума (4):

$$V = 2, 4t_{cc}(h_{cb} + h_{cn} - 2t_{cn}) + 2t_{pc}(h_{pl} + h_{pn} - 2t_{pn}) + b(19, 2t_{cn} + 16t_{pn}). (4)$$

Вектор варьируемых параметров X должен удовлетворять следующим требованиям (2):

– минимальным площадям элементов переменной жесткости в крайних точках:

$$A_i \geq [\min A_i], (5)$$

где $[A_i]$ – минимально допустимая площадь i -того элемента в крайних точках элемента;

– значениям элементов:

$$J_i \geq X_i \geq j_i, (6)$$

где J_i и j_i – верхний и нижний пределы изменения варьируемых параметров;

– условиям равновесия:

$$k(x) \cdot B - P(x) = 0, (7)$$

где $k(x)$ – матрица жесткости системы;

B – вектор узловых перемещений;

$P(x)$ – вектор внешних нагрузок;

– условиям совместности деформаций:

$$\Delta L_{Ni}(N_i, A_i, l_i) = \Delta L_i(\Delta x, \Delta y, \Delta z), (8)$$

где ΔL_{Ni} и ΔL_i – деформация соответственно i -того и $i+1$ элемента.

Параметры рамы: сталь С345, высота колонны $l_c = 4,8$ м, половина длины ригеля $l_p = 4$ м, нагрузка $N = 8$ кН/м. Оптимизируется 9 параметров (рис. 3): b – половина ширины полки двутавра; h_{pl}, h_{pn} – высоты сечения ригеля слева и справа; h_{cb}, h_{cn} – высоты сечения стойки вверх и вниз; t_{pc} и t_{pn}, t_{cc} и t_{cn} – толщины полки и стенки ригеля и стойки соответственно.

Допустимые соотношения размеров элементов, исходя из условий устойчивости, приняты: для полки – 10, стойки – 110. Ограничения для искомых элементов (в см): b – от 5 до 15; h_{pl} и h_{pn} – от 10 до 30; h_{cb} и h_{cn} – от 10 до 30; все толщины t_{pc} и t_{pn}, t_{cc} и t_{cn} – от 0,5 до 1,5.

Разбивается половина рамы на 108 элементов (60 – стойка, 48 – ригель) в продольном, и на 6 элементов двутавра (3 – колонна, 3 – ригель) в поперечном сечении. Модель хромосомы принята в

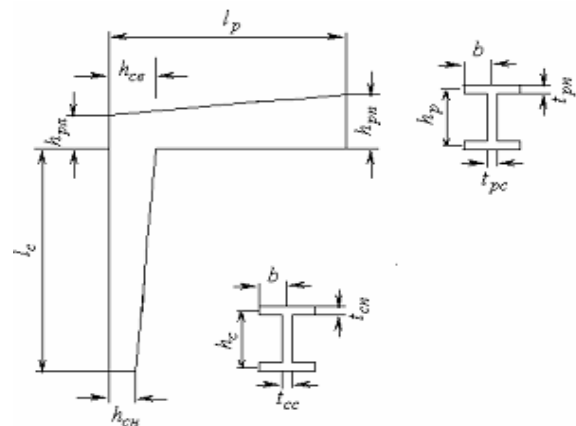


Рисунок 3. Схемы рамы и сечения ригеля и стойки.

соответствии с числом оптимизируемых параметров (рис. 4).

Для расчета применялись следующие параметры [9]: 300 генераций; 20 индивидов (начальных решений); селекционное давление 0,1 (шаг изменения параметра); норма мутации 0,05; 15 замен генов из хромосомы. Отклонения мутаций – линейные 0,001...0,0001 (для полки и стенки), 0,01...0,001 (для всех остальных элементов).

Результаты расчета представлены в таблице.

b	h_{pp}	h_{sp}	t_{pp}	t_{pc}	h_{cn}	h_{cv}	t_{cn}	t_{cc}
-----	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

Рисунок 4. Модель хромосомы.

Таблица. Геометрические характеристики рамы с напряжениями

№	$V, \text{ м}^3$	$\sigma, \text{ МПа}$	$b/t_{pp} < 9$	$b/t_{cn} < 10$
1	0,0150	161	7,4	9,4
2	0,0265	160	11,7	10,1
3	0,0150	161	8,5	9,5
4	0,0147	160	8,4	9,5
5	0,0224	388	11,5	10,4
6	0,0153	338	6,8	9,5
7	0,0149	162	8,6	9,5
8	0,0149	162	8,7	9,7
9	0,0152	162	7,9	9,7
10	0,0149	161	8,2	9,3

Литература

1. Юрьев, А. Г. Оптимизация строительных конструкций на основе генетического алгоритма [Текст] / А. Г. Юрьев, С. В. Клюев, А. В. Клюев // Известия Томского политехнического университета. 2007. Т. 310, № 1. С. 61–64.
2. Юрьев, А. Г. Эволюционные и генетические алгоритмы оптимизации строительных конструкций [Текст] / А. Г. Юрьев, С. В. Клюев. – Белгород : БГТУ им. В. Г. Шухова, 2006. – 133 с.
3. Серпик, И. Н. Генетические алгоритмы оптимизации металлических строительных конструкций [Текст] / И. Н. Серпик, А. В. Алексейцев, А. А. Лелетко. – Брянск : Брянская гос. инженерно-технологическая акад., 2010. – 186 с. – ISBN 978-5-9857-091-3.
4. Новые направления оптимизации в строительном проектировании [Текст] / М. С. Андерсон,

Проводя анализ полученных результатов, видим, что во 2-й и 5-й строках значения результатов b/t_{pp} и b/t_{cn} – превышены (исходя из условий устойчивости), а в 5-й и 6-й превышено расчетное сопротивление. Следовательно, этими тремя вариантами следует пренебречь.

Все остальные требования и ограничения выполнены, а минимальному объему металла (расходу) соответствует 4-й вариант, хотя все полученные значения различаются не более, чем на 3,4 %.

Вывод

Алгоритм генетической оптимизации позволяет найти рациональные параметры рам переменной жесткости с множеством варьируемых параметров и является мощным расчетным методом для поиска глобальных экстремумов из числа найденных субоптимумов функции оптимизации. Это позволяет применять ГА для оптимизации рам переменной жесткости по критерию минимальной массы, что позволит получить значительную экономию металла, а следовательно и повысить экономическую эффективность принятых проектировщиком конструкций. Точность расчетов является достаточной для инженерных целей проектировщика, а также может быть повышена путем увеличения количества индивидов и генераций или изменением масштаба сетки элементов, что в свою очередь увеличит затраты времени на расчет машиной.

References

1. Yuriev, A. G.; Kluev, S. V.; Kluev, A. V. Optimization of building constructions on the basis of genetic algorithm. In: *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2007, Vol. 310, No. 1, pp. 58–60. (in Russian)
2. Yuriev, A. G.; Kluev, S. V. Evolutionary and genetic algorithms for optimization of building structures. Belgorod: BSTU V. G. Shukhov, 2006. 133 p. (in Russian)
3. Serpik, I. N.; Alekseytsev, A. V.; Leletko, A. A. Genetic algorithms for optimization of metal building structures. Bryansk: Bryansk State Engineering and Technological Academy, 2010. 186 p. ISBN 978-5-9857-091-3. (in Russian)
4. Anderson, M. S.; Arman, G.-L.; Arora, J. S. et al. A new direction in optimization of construction design. Moscow: Stroyizdat, 1989. 593 p. (in Russian)

- Ж.-Л. Арман, Дж. С. Арора [и др.]. – Москва : Стройиздат, 1989. – 593 с.
5. Борисевич, А. А. Общие уравнения строительной механики и оптимальное проектирование конструкций [Текст] / А. А. Борисевич. – Минск : Дизайн ПРО, 1998. – 144 с.
 6. Валуйских, В. П. Гибкие стратегии статистических методов оптимального проектирования [Текст] / В. П. Валуйских // Строительная механика и расчет сооружений. 1990. № 2. С. 31–38.
 7. Геммерлинг, А. В. О методах оптимизации конструкций [Текст] / А. В. Геммерлинг // Строительная механика и расчет сооружений. 1971. № 2. С. 20–22.
 8. Герасимов, Е. Н. Многокритериальная оптимизация конструкций [Текст] / Е. Н. Герасимов, Ю. М. Почтман, В. В. Скалозуб. – Киев ; Донецк : Высшая шк. Гл. изд-во, 1985. – 134 с.
 9. Ершов, В. И. Подбор оптимальных сечений двутавровой балки по двум параметрам [Текст] / В. И. Ершов // Известия вузов. Строительство и архитектура. 1985. № 7. С. 9–10.
 10. Житомирский, И. С. Некоторые стохастические методы решения дискретных задач оптимального проектирования [Текст] / И. С. Житомирский, В. Л. Каганов // Строительная механика и расчет сооружений. 1971. № 2. С. 60–63.
 11. Васильев, Ф. П. Методы оптимизации [Текст] : В 2-х книгах. Кн. 1 / Ф. П. Васильев. – М. : МЦНМО, 2011. – 620 с. – ISBN 978-5-94057-707-2.
 12. Leite, J. Improved genetic operators for structural engineering optimization [Текст] / J. Leite, B. Topping // Advanced engineering software. 1998. Vol. 29. P. 529–562.
 13. Su, R. Truss topology optimization using genetic algorithm with individual identification technique [Текст] / R. Su, L. Gui, Z. Fan // Proceedings of the World Congress on Engineering WCE 2009. July 1–3, 2009, London, U. K. Vol. II / Editors: S. I. Ao and Len Gelman et al. – London, U. K. : Newswood Limited, 2009. – P. 1089–1093.
 14. Coello Coello, C. A. A Survey of Constraint Handling Techniques used with Evolutionary Algorithms [Текст] : Technical Report Lania-RI-99-04 / Carlos A. Coello Coello. – Veracruz, Mexico : Laboratorio de Informatica Avanzada, 1999. – 33 p.
 15. Deb, K. Genetic Algorithms for Optimization [Текст] : Report Number 2001002 / K. Deb. – India : Department of Mechanical Engineering Indian Institute of Technology Kanpur, Kanpur Genetic Algorithms Lab., 2001. – 25 p.
 16. A development in the automated design and fabrication of portal framed industrial buildings [Текст] / P. J. Dowling, T. F. Mears, G. W. Owens, G. K. Raven // The Structural Engineer. 1982. Vol. 60A, No. 10. P. 311–319.
 17. Meek, J. L. Geometric and material non-linear behavior of beam-columns [Текст] / J. L. Meek, S. Loganathan // Computers & Structures. 1990. Vol. 34, No. 1. P. 87–100.
 5. Borisevich, A. A. General equations of structural mechanics and optimal design of structures. Minsk: Design PRO, 1998. 144 p. (in Russian)
 6. Valuyskikh, V. P. Flexible strategies of statistical methods of optimal design. In: *Building mechanics and calculation of constructions*, 1990, No. 2, pp. 31–38. (in Russian)
 7. Gemmerling, A. V. On methods of optimization of structures. In: *Building mechanics and calculation of constructions*, 1971, No. 2, pp. 20–22. (in Russian)
 8. Gerasimov, Ye. N.; Pochtman, Yu. M.; Skalozub, V. V. Multicriteria optimization of structures. Kiev; Donetsk: High school. Central ed., 1985. 134 p. (in Russian)
 9. Yershov, V. I. Selection of optimal sections of the I-beam in two parameters. In: *News of Higher Educational Institutions. Civil Engineering and Architecture*, 1985, No. 7, pp. 9–10. (in Russian)
 10. Zhitomirskiy, I. S.; Kaganov, V. L. Some stochastic methods for solving discrete optimal design problems. In: *Structural mechanics and calculation of structures*, 1971, No. 2, pp. 60–63. (in Russian)
 11. Vasilyev, F. P. Optimization method. In two books, the first book. Moscow: MTsNMO, 2011. 620 p. ISBN 978-5-94057-707-2. (in Russian)
 12. Leite, J.; Topping, B. Improved genetic operators for structural engineering optimization. In: *Advanced engineering software*, 1998, Vol. 29, pp. 529–562.
 13. Su, R.; Gui, L.; Fan, Z. Truss topology optimization using genetic algorithm with individual identification technique. In: *Ao, S. I. (Ed.) and Gelman, Len (Ed.) et al. Proceedings of the World Congress on Engineering WCE 2009. July 1–3, 2009, London, U. K. Vol. II*. London, U. K.: Newswood Limited, 2009, pp. 1089–1093.
 14. Coello Coello, C. A. A Survey of Constraint Handling Techniques used with Evolutionary Algorithms: Technical Report Lania-RI-99-04. Veracruz, Mexico: Laboratorio de Informatica Avanzada, 1999. 33 p.
 15. Deb, K. Genetic Algorithms for Optimization: Report Number 2001002. India: Department of Mechanical Engineering Indian Institute of Technology Kanpur, Kanpur Genetic Algorithms Lab., 2001. 25 p.
 16. Dowling, P. J.; Mears, T. F.; Owens, G. W.; Raven, G. K. A development in the automated design and fabrication of portal framed industrial buildings. In: *The Structural Engineer*, 1982, Vol. 60A, No. 10, pp. 311–319.
 17. Meek, J. L.; Loganathan, S. Geometric and material non-linear behavior of beam-columns. In: *Computers & Structures*, 1990, Vol. 34, No. 1, pp. 87–100.

Солохненко Алексей Геннадиевич – магистрант кафедры металлических конструкций и сооружений ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: проектирование и оптимизация легких металлических конструкций рамного типа.

Роменский Игорь Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры металлических конструкций и сооружений ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: совершенствование методов расчета и проектирования пространственных металлических конструкций.

Солохненко Олексій Геннадійович – магістрант кафедри металевих конструкцій та споруд ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: проектування та оптимізація легких металевих конструкцій рамного типу.

Роменський Ігор Вікторович – кандидат технічних наук, доцент кафедри металевих конструкцій та споруд ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: удосконалення методів розрахунку та проектування просторових металевих конструкцій.

Solohnenko Alexey – Master's student, Metal Structures and Constructions Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: design and optimization of lightweight metal structures of frame type.

Romensky Igor – Ph.D. (Engineering), Associate Professor; Metal Structures and Constructions Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: include the perfection of calculation method and designing of spatial metal structures.