

УДК 624.014.2-047.56:004

*ВАСИЛЬКИН АНДРЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ, канд. техн. наук, доцент,
vergiz@mail.ru*

*Национальный исследовательский
Московский государственный строительный университет,
129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26*

ОПТИМИЗАЦИЯ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ САПР*

Проведены исследования по возможности использования вычислительного алгоритма для синтеза проектных решений стальных конструкций. Показано влияние пролета фермы и действующей нагрузки на оптимальную высоту и минимальную массу фермы. Получены графики, иллюстрирующие изменение массы и стоимости конструкции. Определена зависимость стоимости конструкции от класса стали и типа сечения. Разработанный алгоритм формирует информационную технологию автоматизированного проектирования поддержки поиска проектных решений при проектировании стальных конструкций промышленных сооружений и интегрирован как подсистема автоматизированного проектирования.

Ключевые слова: автоматизированное проектирование стальных конструкций; оптимальное решение; критерий оптимальности.

*ANDREY A. VASILKIN, PhD, A/Professor,
vergiz@mail.ru
National Research
Moscow State University of Civil Engineering,
26, Yaroslavskoe Road, 129337, Moscow, Russia*

OPTIMIZATION OF STEEL STRUCTURES USING CAD-SYSTEMS

The research is carried out into the possibility of using the computational algorithm for the synthesis of design solutions for steel structures. The dependence between the truss span and the actual load and the optimum height and minimum mass of the truss is described in this paper. Graphical dependences are obtained to show the change in mass and cost of the structure. The dependence is determined between the cost of the structure and the types of steel and section. The suggested algorithm is based on CAD information technology for the industrial steel structural design solutions and implemented as a subsystem of automated design.

Keywords: automated design of steel structures; optimum solution; optimization.

Введение

При оптимальном проектировании строительных конструкций используется широкий спектр аналитических, полуаналитических и численных методов оптимизации. Некоторые относительно простые задачи оптимизации решаются с применением классических подходов дифференциального исчис-

* Работа выполнена в рамках гранта государственной поддержки научных исследований, проводимых ведущими научными школами Российской Федерации № 14.Z57.14.6545-НШ.

ления, динамического и математического программирования [1, 2], индуктивного метода [3]. Достаточно разработан метод проекции градиента [4, 5], позволяющий находить локальные экстремумы при сложных ограничениях в виде равенств и неравенств. В последние годы активно используются методы эволюционного моделирования (генетические алгоритмы) [6–8].

Одним из направлений в решении задач оптимизации являются численные методы, реализованные в системах автоматизированного проектирования (САПР).

Применяя системы автоматизированного проектирования и численного расчета, можно решать широкий спектр задач оптимального проектирования сложных конструкций с учетом физической и геометрической нелинейности работы материала: пространственных стальных конструкций из тонкостенных стержней открытого профиля [9], большепролетных сооружений [10], двухъярусных куполов [11].

Данная работа продолжает цикл статей, посвященных развитию методов оптимального проектирования стальных конструкций и совершенствованию вычислительных алгоритмов [12–14] при решении оптимизационных задач.

Критерий оптимальности в зависимости от поставленной задачи может быть различным. В ряде исследований в качестве критерия использовалась минимизация массы конструкции [13, 15–17]. В настоящей статье в качестве критерия оптимальности принимается стоимость материала конструкции, когда оптимальной будет ферма минимальной стоимости. Рассмотрим задачу оптимизации стропильной фермы. Для выполнения расчетов используем разработанный метод оптимизации [14].

Алгоритм

В качестве дополнительных параметров, учитываемых в модели наряду с уже существующими [13], использованы пролет фермы и равномерно распределенная нагрузка, приложенная к верхнему поясу фермы. Рассмотрены следующие значения: пролеты – 18, 24, 30, 36 м; равномерно распределенная нагрузка $q = 10, 20, 30, 40$ кН/м.

Решение задачи осуществляется минимизацией веса конструкции с действующими ограничениями по прочности, устойчивости, предельной гибкости согласно нормам и минимальными значениями проектных параметров.

Значения варьируемых параметров, рассматриваемых в работе, представлены в таблице.

Значения параметров стропильной фермы

| Варьируемые параметры | Значения |
|------------------------------------|--|
| Материал конструкции – класс стали | C245, C285, C345 |
| Тип сечения элементов | Уголок горячекатаный равнополочный по ГОСТ 8509–93 (спаренный уголок) |
| | Труба стальная электросварная прямошовная по ГОСТ 10704–91 (круглая труба) |
| | Профиль стальной гнутый замкнутый сварной квадратный по ГОСТ 30245–94 (гнутой профиль) |

Окончание таблицы

| Варьируемые параметры | Значения |
|-----------------------|---------------------------------|
| Высота фермы | От 1,55 до 3,85 м с шагом 0,1 м |
| Пролет фермы | 18, 24, 30, 36 м |
| Действующая нагрузка | 10, 20, 30, 40 кН/м |

Результаты

В результате расчетов были получены графики изменения массы стропильной фермы для различных типов сечений, классов стали и интенсивности нагрузки. На рис. 1 представлен один из полученных графиков для фермы с сечением из спаренного уголка пролетом 18 м.

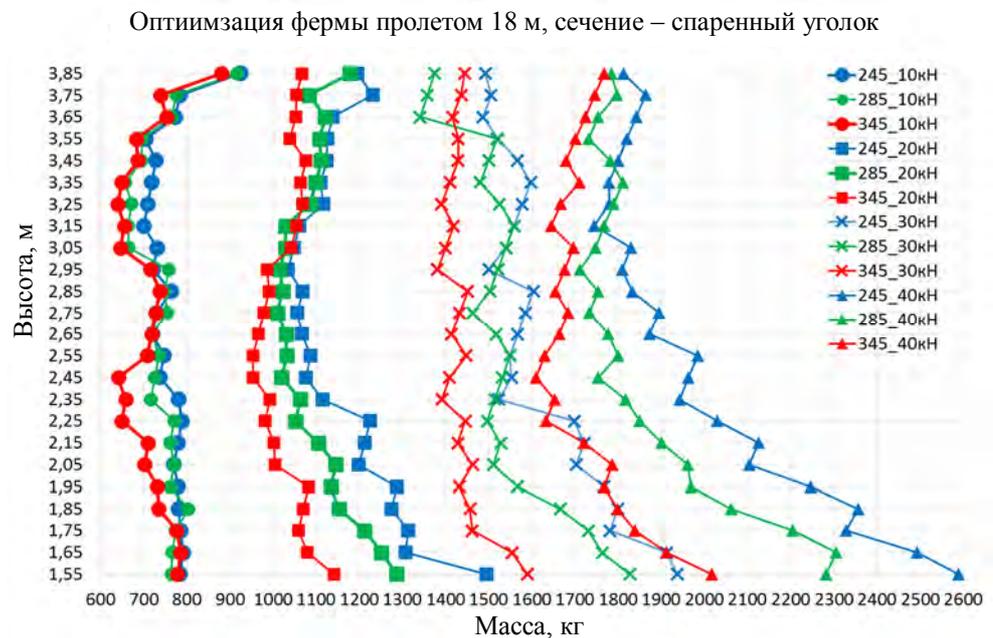


Рис. 1. График изменения массы фермы с элементами из спаренного уголка

Подобные зависимости были получены для других типов сечений и классов стали – всего 12 графиков.

Анализируя полученные результаты автоматизированного проектирования, построим графики изменения массы фермы и получим ряд практических рекомендаций для выбора оптимального проектного решения, которые позволяют:

- определить наиболее выгодную (оптимальную) высоту фермы для различных классов стали (рис. 2);
- выбрать класс стали, использование которого позволит получить минимальную массу фермы при различных нагрузках (рис. 3);

– определить наиболее выгодную (оптимальную) высоту фермы для различных типов сечений (рис. 4);

– выбрать тип сечения, использование которого позволит получить минимальную массу фермы при различных нагрузках (рис. 5). Из графика видно, что масса фермы для различных сечений отличается незначительно. Учитывая градацию сортамента равнополочного уголка и возможность подобрать сечение по сортаменту, наиболее близкое к требуемому, разница между массой фермы из круглой трубы и спаренного уголка составляет 3–6 %.



Рис. 2. Изменение оптимальной высоты фермы пролетом 24 м, тип сечения – гнутый профиль, для различных классов стали

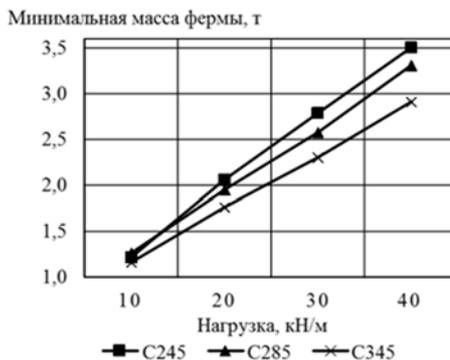


Рис. 3. Изменение минимальной массы фермы пролетом 24 м, тип сечения – гнутый профиль, для различных классов стали

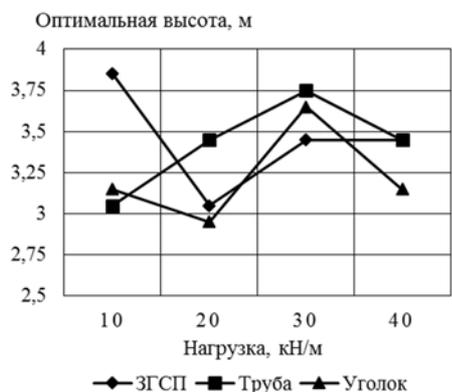


Рис. 4. Изменение оптимальной высоты фермы пролетом 24 м, сталь C245

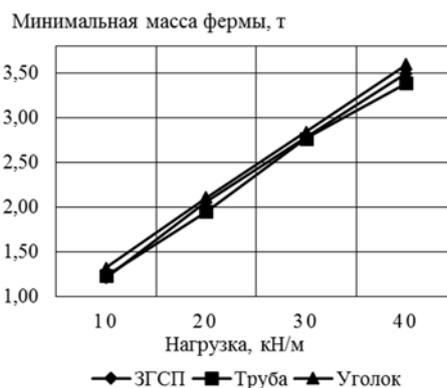


Рис. 5. Изменение минимальной массы фермы пролетом 24 м, сталь C245

На рис. 6 представлен график изменения минимальной массы фермы для различных значений нагрузки и пролета.

Подобные зависимости были получены для всех рассматриваемых пролетов, классов стали и типов сечения, указанных в таблице.

Использование в качестве целевой функции минимума массы металла является наиболее простым критерием оптимальности, позволяющим в пер-

вом приближении выполнить технико-экономическое обоснование проекта. Более точным критерием является учет стоимости материала. Поэтому на следующем этапе исследовался вопрос изменения стоимости конструкции фермы с учетом действующих в настоящий момент цен на металлопрокат.

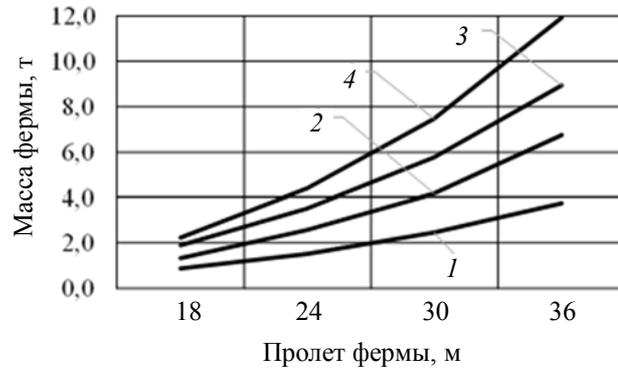


Рис. 6. Показатели массы фермы из стали С245, тип сечения – гнутый профиль при различной нагрузке:
1 – 10 кН/м; 2 – 20 кН/м; 3 – 30 кН/м; 4 – 40 кН/м

Решение этого вопроса подразумевает известную долю приближенности, поскольку стоимость черных металлов может зависеть от рыночных колебаний. Кроме того, при проведении маркетингового исследования [18] и определении действующих цен на металлопрокат наблюдался некоторый разброс цен у различных поставщиков, а также изменение стоимости для различных калибров сечений.

Однако, поскольку целью настоящей работы является выявление общих зависимостей, мы считаем возможным использование усредненных значений стоимости металлопроката.

Полученные результаты представлены на графиках рис. 7–10.

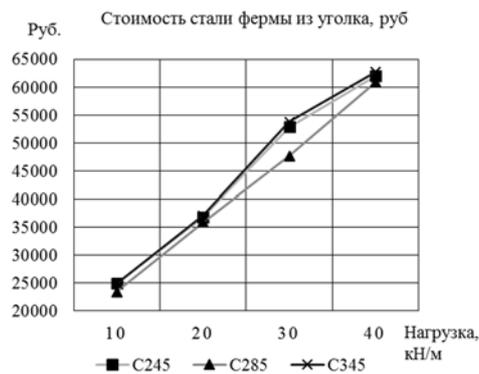


Рис. 7. Изменение стоимости материала (стали) фермы пролетом 18 м, тип сечения – спаренный равнополочный уголок, для различных классов стали

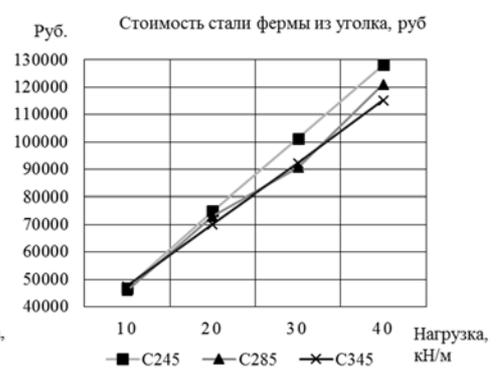


Рис. 8. Изменение стоимости материала (стали) фермы пролетом 24 м, тип сечения – спаренный равнополочный уголок, для различных классов стали

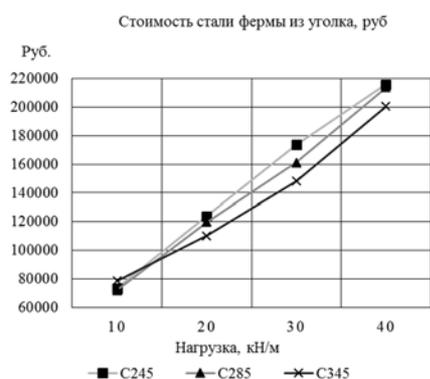


Рис. 9. Изменение стоимости материала (стали) фермы пролетом 30 м, тип сечения – спаренный равнополочный уголок, для различных классов стали



Рис. 10. Изменение стоимости материала (стали) фермы пролетом 36 м, тип сечения – спаренный равнополочный уголок, для различных классов стали

Из графика на рис. 7 следует, что для 18-метровой фермы из спаренного уголка при нагрузке $q = 10, 20, 40$ кН/м стоимость фермы практически одинакова, а при нагрузке $q = 30$ кН/м использование стали C285 позволит получить более экономичный вариант конструкции. Для больших пролетов – 24, 30 и 36 м – близкая стоимость конструкции наблюдается при нагрузке $q = 10$ кН/м. С увеличением нагрузки происходит дифференциация стоимости в зависимости от класса стали. Как и следовало ожидать, конструкции, выполненные из стали с более высокой несущей способностью, будут более экономичными (рис. 8–10).

Заключение

Большое число учитываемых параметров проектируемых конструкций требует автоматизации метода перебора вариантов конструктивных решений. Предложенный автором метод решения проектных задач существенно ускоряет расчеты и может быть использован для оптимизации конструкций и их элементов. Полученные результаты решений с использованием имитационной модели позволят инженеру выбрать оптимальное проектное решение проектируемой конструкции. Применение разработанного вычислительного алгоритма для оптимизации стропильных ферм показало его высокую эффективность.

Используемые в настоящей работе численные модели конструкции могут применяться при математическом моделировании проектируемого объекта в целях аналитического исследования работы стальных конструкций [9, 19–21].

В дальнейшем на основе разработанной модели возможно внедрение вычислительной системы для выполнения оптимизационного расчета стальных конструкций [22, 23].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Геммерлинг, Г.А. Подсистема оптимизации конструкций в САПР / Г.А. Геммерлинг // Система автоматизированного проектирования стальных строительных конструкций. – М. : Стройиздат, 1987. – 216 с.
2. Турчак, Л.И. Основы численных методов / Л.И. Турчак. – М. : Наука, 1987. – С. 169–204.

3. *Кирсанов, М.Н.* Статический расчет и анализ пространственной стержневой системы / М.Н. Кирсанов // Инженерно-строительный журнал. – 2011. – № 6. – С. 26–34.
4. *Барановская, Л.В.* Использование метода проекций градиента при оптимальном проектировании металлоконструкций тяжелых козловых кранов / Л.В. Барановская // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2010. – № 1. – Т. 1. – С. 24–27.
5. *Кирсанов, М.Н.* Генетический алгоритм оптимизации стержневых систем / М.Н. Кирсанов // Строительная механика и расчет сооружений. – 2010. – № 2. – С. 60–63.
6. *Гладков, В.А.* Генетические алгоритмы / В.А. Гладков, В.В. Курейчик, В.М. Курейчик. – М.: Физматлит, 2006. – 320 с.
7. *Rajeev, S.* Genetic algorithms-based methodologies for design optimization of trusses / S. Rajeev, C. Krishnamoorthy // J. Struct Eng. – 1997. – 123. – 350–9.
8. *A bi-level hierarchical method* for shape and member sizing optimization of steel truss structures / F. Flager, A. Adya, J. Haymaker, M. Fischer // Computers and Structures. – 2014. – 131. – P. 1–11.
9. *Туснин, А.Р.* Конечный элемент для численного расчета конструкций из тонкостенных стержней открытого профиля / А.Р. Туснин // Металлические конструкции. – 2009. – № 1. – Т. 15. – С. 73–78.
10. *Поиск рациональной геометрической схемы* пространственной металлической конструкции покрытия большепролетного спортивного сооружения / М.Р. Гарифуллин, С.А. Семенов, С.В. Беляева, И.А. Порываев, М.Н. Сафиуллин, А.А. Семенов // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2014. – № 2 (17). – С. 107–124.
11. *Лебедь, Е.В.* Компьютерное моделирование точности возведения двухъярусных металлических куполов / Е.В. Лебедь // Промышленное и гражданское строительство. – 2013. – № 12. – С. 89–92.
12. *Гинзбург, А.В.* Постановка задачи оптимального проектировании стальных конструкций / А.В. Гинзбург, А.А. Василькин // Вестник МГСУ. – 2014. – № 6. – С. 52–62.
13. *Василькин, А.А.* Автоматизированное решение задачи определения оптимальной высоты стальной фермы по критерию минимума массы при вариации высоты фермы / А.А. Василькин, С.В. Щербина // Интеграция, партнерство и инновации в строительной науке и образовании: сб. материалов Международной конференции (12–13 ноября 2014 г., Москва) / М-во образования и науки Рос. Федерации, Моск. гос. строит. ун-т. – М.: МГСУ, 2015.
14. *Василькин, А.А.* Построение системы автоматизированного проектирования при оптимизации стальных стропильных ферм / А.А. Василькин, С.В. Щербина // Вестник МГСУ. – 2015. – № 2. – С. 21–37.
15. *Wu, C.Y.* Truss structure optimization using adaptive multi-population differential evolution / C.Y. Wu, C.Y. Tseng // Structural and Multidisciplinary Optimization. – 2010. – V. 42. – P. 351–369.
16. *Balling, R.* Multiple optimum size/shape/topology designs for skeletal structures using a genetic algorithm / R. Balling, R. Briggs, K. Gillman // Journal of Structural Engineering. – ASCE. – 2006. – V. 132. – P. 1158–1165.
17. *Su, R.* Truss topology optimization using genetic algorithm with individual identification technique / R. Su, L. Gui, Z. Fan // Proceedings of the World Congress on Engineering. July 1–3, London, U.K. – 2009. – V. 2. – P. 45–56.
18. *Электронный каталог прайс-лист*: база данных содержит сведения о видах номенклатуры и стоимости. – Режим доступа: <http://www.agrupp.com/pricelist/>
19. *Синельников, А.С.* Прочность просечно-растяжного профиля: испытания и математическое моделирование / А.С. Синельников, А.В. Орлова // Вестник МГСУ. – 2013. – № 12. – С. 41–54.
20. *Гордеева, А.О.* Расчетная конечно-элементная модель холодногнутого перфорированного тонкостенного стержня в программно-вычислительном комплексе SCAD OFFICE / А.О. Гордеева, Н.И. Ватин // Инженерно-строительный журнал. – 2011. – № 3. – С. 36–46.
21. *Ватин, Н.И.* Моделирование работы тонкостенной стальной стойки в СКАД и оптимизация расчета по Еврокоду / Н.И. Ватин, Д.С. Шатов, Д.Н. Смазнов // Материалы Международной научно-практической конференции. СПбГПУ. – 2009. – С. 212–213.

22. Туснин, А.Р. Вычислительная система «Сталькон» для расчета и проектирования стержневых конструкций из тонкостенных стержней открытого профиля / А.Р. Туснин, О.А. Туснина // Промышленное и гражданское строительство. – 2012. – № 8. – С. 62–64.
23. Туснин, А.Р. Автоматизация расчетов несущей способности элементов стальных конструкций / А.Р. Туснин // Промышленное и гражданское строительство. – 2010. – № 10. – С. 22–23.

REFERENCES

1. Gemmerling G.A. Podsystema optimizatsii konstruktсии v SAPR [Optimization subsystem in CAD systems]. Sistema avtomatizirovannogo proektirovaniya stal'nykh stroitel'nykh konstruktсии. Moscow : Stroyizdat Publ., 1987. 216 p. (rus)
2. Turchak L.I. Osnovy chislennykh metodov [Basics of numerical methods]. Moscow : Nauka Publ., 1987. Pp. 169–204. (rus)
3. Kirsanov M.N. Staticheskii raschet i analiz prostranstvennoi sterzhnevoi sistemy [Static calculation and analysis of spatial rod system]. *Magazine of Civil Engineering*. 2011. No. 6. Pp. 26–34. (rus)
4. Baranovskaya L.V. Ispol'zovanie metoda proektsii gradienta pri optimal'nom proektirovanii metallokonstruktсии tyazhelykh kozlovykh kranov [Gradient projection method used in optimum design of steel structures of heavy gantry cranes]. *Vestnik Saratov State Technical University*. 2010. V. 1. No. 1. Pp. 24–27. (rus)
5. Kirsanov M.N. Geneticheskii algoritm optimizatsii sterzhnevnykh sistem [Genetic algorithm of optimization of bar systems]. *Stroit. mekh. i raschet sooruzhenii*. 2010. No. 2. Pp. 60–63. (rus)
6. Gladkov V.A., Kureichik V.V., Kureichik V.M. Geneticheskie algoritmy [Genetic algorithms]. Moscow : Fizmatlit Publ., 2006. 320 p. (rus)
7. Rajeev S., Krishnamoorthy C. Genetic algorithms-based methodologies for design optimization of trusses. *J. Struct. Eng.* 1997. No. 123. Pp. 350–9.
8. Flager F., Adya A., Haymaker J., Fischer M. A bi-level hierarchical method for shape and member sizing optimization of steel truss structures. *Computers and Structures*. 2014. No. 131. Pp. 1–11.
9. Tushin A.R. Konechnyi element dlya chislennogo rascheta konstruktсии iz tonkostennykh sterzhnei otkrytogo profilya [Finite element for structural numerical calculation of open section thin-wall bar]. *Metal Constructions Journal*. 2009. V. 15. No. 1. Pp. 73–78. (rus)
10. Garifullin M.R., Semenov S.A., Belyaeva S.V., Poryvaev I.A., Safullin M.N., Semenov A.A. Poisk ratsional'noi geometricheskoi skhemy prostranstvennoi metallicheskoj konstruktсии pokrytiya bol'sheproletnogo sportivnogo sooruzheniya [Search for rational spatial geometry of metal coating for large span structure]. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2014. No. 2. Pp. 107–124. (rus)
11. Lebed' E.V. Komp'yuternoe modelirovanie tochnosti vozvedeniya dvukhpoyasnykh metallicheskiikh kupolov [Computer simulation of metal dome design]. *J. Industrial and Civil Engineering*. 2013. No. 12. Pp. 89–92. (rus)
12. Ginzburg A.V., Vasil'kin A.A. Postanovka zadachi optimal'nogo proektirovanii stal'nykh konstruktсии [The problem of optimum design of steel structures]. *Scientific and Technical Journal on Construction and Architecture*. 2014. No. 6. Pp. 52–62. (rus)
13. Vasil'kin A.A., Shcherbina S.V. Avtomatizirovannoe reshenie zadachi opredeleniya optimal'noi vysoty stal'noi fermy po kriteriyu minimuma massy pri variatsii vysoty fermy [Automated determination of optimum height of steel truss using minimum weight criterion at truss variation]. *Proc. Int. Sci. Conf. 'Integration, Partnership and Innovations in Construction Science and Education'*, Moscow : MGSU Publ., 2015. (rus)
14. Vasil'kin A.A., Shcherbina S.V. Postroenie sistemy avtomatizirovannogo proektirovaniya pri optimizatsii stal'nykh stropil'nykh ferm [Computer-aided design in optimization of truss frames]. *Scientific and Technical Journal on Construction and Architecture*. 2015. No. 2. Pp. 21–37. (rus)
15. Wu C.Y., Tseng C.Y. Truss structure optimization using adaptive multi-population differential evolution. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2010. V. 42. Pp. 351–369.

16. *Balling R., Briggs R., Gillman K.* Multiple optimum size/shape/topology designs for skeletal structures using a genetic algorithm. *ASCE Journal of Structural Engineering*. 2006. V. 132. Pp. 1158–1165.
17. *Su R., Gui L., Fan Z.* Truss topology optimization using genetic algorithm with individual identification technique. *Proceedings of the World Congress on Engineering*. July 1–3, London, U.K. 2009. V. 2. Pp. 45–56.
18. *Truby kruglye* [Circular pipes]. Elektronnyi katalog, prais-list [Electronic catalog]. Available at : www.agrupp.com/pricelist/
19. *Sinel'nikov A.S., Orlova A.V.* Prochnost' prosechno-rastyazhnogo profilya: ispytaniya i matematicheskoe modelirovanie [Durability of extended profile: testing and mathematical simulation]. *Scientific and Technical Journal on Construction and Architecture*. 2013. No. 12. Pp. 41–54. (rus)
20. *Gordeeva A.O., Vatin N.I.* Raschetnaya konechno-elementnaya model' kholodnognutogo perforirovannogo tonkostennogo sterzhnya v programmno-vychislitel'nom komplekse SCAD OFFICE [Estimated finite element model of cold-formed perforated thin-walled bar using SCAD Office software]. *Magazine of Civil Engineering*. 2011. No. 3. Pp. 36–46. (rus)
21. *Vatin N.I., Shatov D.S., Smaznov D.N.* Modelirovanie raboty tonkostennoi stal'noi stoiki v SKAD i optimizatsiya rascheta po Evrokodu [SCAD simulation of thin-walled steel beam according to Eurocode]. *Proc. Int. Sci. Conf. Peter the Great St.-Petersburg Polytechnic University*. 2009. Pp. 212–213. (rus)
22. *Tusnin A.R., Tusnina O.A.* Vychislitel'naya sistema Stal'kon dlya rascheta i proektirovaniya sterzhnevyykh konstruksii iz tonkostennykh sterzhnei otkrytogo profilya [Computer system Stalcon for calculation and design of beam structures of thin-walled open section]. *J. Industrial and Civil Engineering*. 2012. No. 8. Pp. 62–64. (rus)
23. *Tusnin A.R.* Avtomatizatsiya raschetov nesushchei sposobnosti elementov stal'nykh konstruksii. [Automated calculations of bearing capacity of steel structure elements]. *J. Industrial and Civil Engineering*. 2010. No. 10. Pp. 22–23. (rus)