

УДК 624.074.5

¹О. В. Захаров, ²А. П. Дзюба, д-р техн. наук, проф.

ЧИСЛОВИЙ АНАЛІЗ РАЦІОНАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ КОНСТРУКЦІЇ ВЕЖІ ДЛЯ ІМІТАЦІЇ НАВАНТАЖЕННЯ РАКЕТНОГО СТАРТОВОГО КОМПЛЕКСУ

Проведено порівняльний скінченно-елементний аналіз напружено-деформованого стану конструкції вежі різних конфігурацій для імітації навантаження в процесі силових випробувань елементів ракетного стартового комплексу з метою визначення їх раціональних вагових параметрів та забезпечення найбільшої несучої здатності. Обґрунтована конфігурація вежі та розміри поперечних перерізів окремих елементів для різних видів навантаження.

Ключові слова: фермові конструкції, раціональне проектування, несуча здатність, імітаційне моделювання.

Вступ. Оптимальне проектування стержневих просторових метало-конструкцій є досить актуальною проблемою, вирішення якої має важливе значення для зниження матеріалоємності реальних об'єктів [6]. Сучасний розвиток обчислювальної техніки та програмного забезпечення надає нові можливості для вибору оптимальних параметрів та обґрунтування раціональних конструктивно-компонувальних схем, які дозволяють проводити розрахунки із набагато меншою кількістю спрощуючих припущень, ніж це відбувалось раніше [1, 4, 5, 7, 11], та мають більш високі показники точності й адекватності результатів [2].

На сьогоднішній день розроблено широкий спектр методик оптимального проектування просторових ферм, які ґрунтуються на різноманітних підходах: еволюційні та генетичні стратегії [12], нелінійна параметрична оптимізація [3], безумовна оптимізація та нелінійне програмування [3], що поєднуються, у більшості випадків, із використанням методу скінченних елементів [9, 12].

Одними із найбільш поширених є чотиригранні (рис. 1, а) та тригранні (рис. 1, б) вежі, які застосовують, коли їх висота і маса технологічного устаткування порівняно невеликі. Вежі багатогранного і (або) змінного по висоті перетину застосовують, як правило, при великому навантаженні від устаткування і значній висоті споруди.

При цьому на сьогодні запропоновано вже досить велику кількість конструкцій різноманітних просторових ферм та вузлів з'єднання їх елементів, які розроблені за певними критеріями оптимізації та призначені для широкого застосування у різних галузях (див., зокрема [8]).

У той же час проблема розробки ефективних методик, алгоритмів проектування та обґрунтування раціональних параметрів і конфігурації фермених споруд все ще далека від завершення, що створює певні труд-

нощі при проектуванні і визначенні основних закономірностей масово-габаритних параметрів просторових ферм таких металоконструкцій.

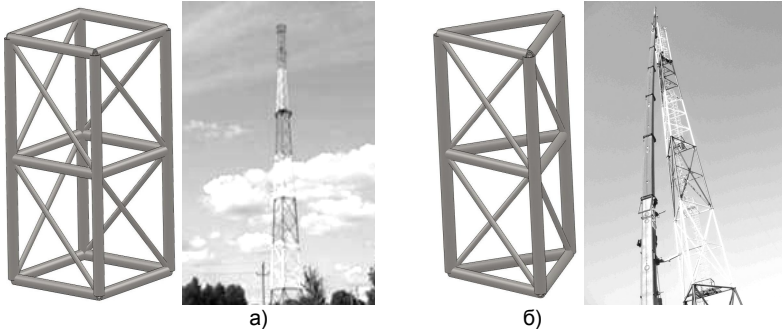


Рис. 1 – Найбільш поширені форми секцій веж

Все це вказує на важливість розвитку та розробки більш ефективних методик для раціонального проектування таких просторових ферм і актуальність проведення подальших експериментальних та теоретичних досліджень у цій галузі.

Постановка задачі. На етапі проектування та виробництва ракетно-космічного обладнання для ракет-носіїв (РН) виникає необхідність проведення випробовувань окремих складових елементів та усієї системи стартового комплексу в цілому з метою визначення та налагодження його працездатності, проведення автономних випробувань і готовності до відправки на місце постійної експлуатації для монтажу. Насамперед це стосується підйомно-установочного агрегату (ПУА), який виконує функцію встановлення РН разом із транспортно-установочним агрегатом (ТУА) у стартове вертикальне положення (рис. 2).

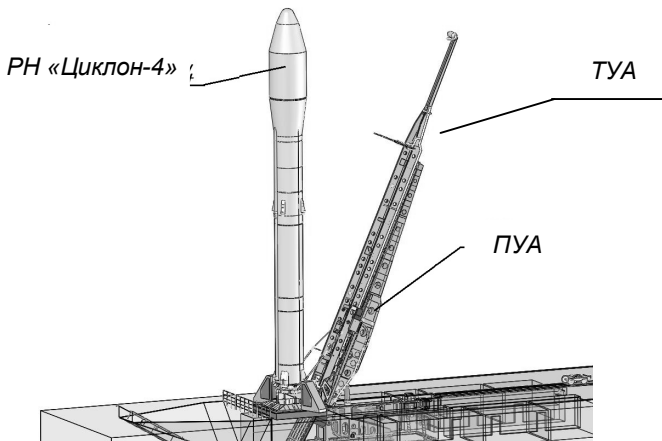


Рис. 2 – Стартовий комплекс РН Циклон-4

З урахуванням високої вартості конструкції РН виникає задача її замі-

ни під час випробувань на певну конструкцію-імітатор. Для цього, з метою збереження РН від пошкоджень, замість неї встановлюється вишка-імітатор, яка забезпечує задані умови функціонування ПУА під час випробувань, зокрема для найбільш небезпечних її станів: початок підйому (кінець опускання); кінець підйому (початок опускання) та у вертикальному положенні при дії бокового вітрового навантаження ПУА, а також вітрове навантаження ПУА зі сторони РН або з боку залізничних колій.

Задача при цьому полягає у визначенні оптимальних параметрів такої вишки-імітатора, яка б забезпечувала навантаження ПУА відповідно до програми і методики випробувань та відповідала б вимогам мінімальної маси (мінімальної вартості).

Розрахункова схема. Для імітації навантажень на вежі в певних точках розташовуються системи блоків і канатів із вантажами, за допомогою яких здійснюється навантаження ПУА (рис. 3). Схеми навантаження вишки-імітатора відповідають схемам навантаження, визначеного програмою та методикою випробувань (рис. 4). Значення та напрям дії зусиль P_i ($i = 1, 2 \dots$) і Q_B , а також точки їх прикладення (геометричні розміри L_i) визначені за результатом розрахунку на міцність агрегатів стартового комплексу.

На рис. 4 наведено три розрахункові випадки силових випробувань для врахування: 1 – дії бокового вітру; 2 – дії вітру з боку РН; 3 – дії вітру з боку залізничних колій, де P_i – зусилля на місця обпирання РН на кронштейни та візок ТУА, а Q_B – приведенне вітрове навантаження.

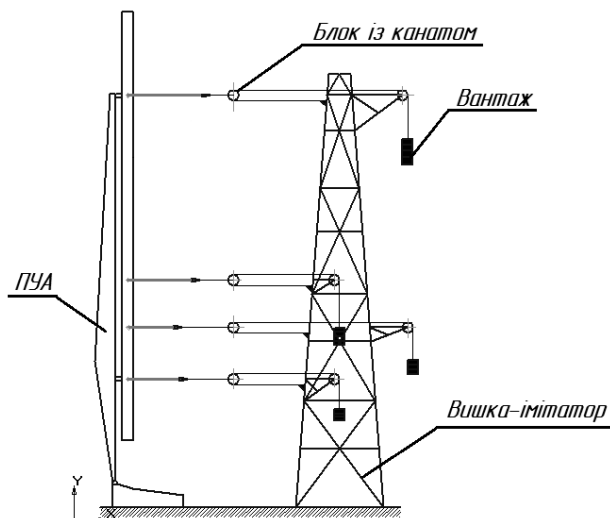


Рис. 3 – Схема навантаження ПУА із застосуванням вишки-імітатора

Таким чином, в розрахунках напружено-деформованого стану вишки-імітатора РН враховуються задані навантаження P_i , що передаються на агрегат ПУА у відповідності до програми випробувань; дія вітрового на-

вантаження Q_B (найгірший випадок, коли Q_B направлено у бік дії всіх навантажень); власна вага G із урахуванням можливого обмерзання.

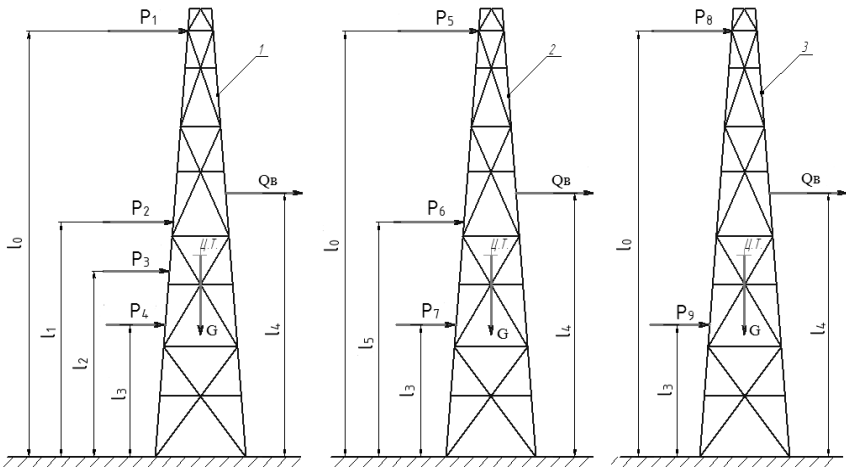


Рис. 4 – Схема навантаження вишки-імітатора за програмою випробувань

В поперечному перерізі чотиригранної секції лежить квадрат, а в трихгранній – рівносторонній трикутник (рис. 5 а, б). Бічним перерізом чотириох- та трихгранної секцій є квадрат, який має діагональні стержневі елементи і, в свою чергу, складається із рівнобічних прямокутних трикутників. Кожна із секцій побудована із труб круглого профілю. При цьому, вертикальні та горизонтальні стрижні мають однакові геометричні параметри: довжину, діаметр, товщину стінки та площу поперечного перерізу, які відрізняються (є більшими) від відповідних параметрів діагональних стрижнів.

У поданій роботі для дослідження пропонується нова геометрична схема сітчастої конструкції висотних споруд баштового типу із рівносторонніх трикутників (рис. 5, в).

На відміну від чотиригранної вежі, побудованої шляхом «підйому» горизонтальних стрижнів, які складені у квадрат, на однакову висоту із подальшим додаванням діагональних стрижнів, запропонована сітчаста конструкція побудована шляхом «підйому» горизонтального стержневого квадрату із поворотом кожного наступного на 45° навколо вертикальної осі секції і подальшого з'єднання цих квадратів стержневими елементами такої ж довжини та перерізу, що і стрижні горизонтальних квадратів.

Це дозволяє уніфікувати вертикальні, горизонтальні та діагональні стрижні по довжині, що зменшує трудомісткість, спрощує технологію та знижує витрати на виготовлення і монтаж споруди, а наявність восьми трикутних елементів в кожному поясі дозволяє суттєво збільшити несучу здатність конструкції [1].

У поданій роботі для визначення раціональних геометричних розмірів поперечного перерізу стержнів ферми використовується запропонований

у [10] ітераційний підхід. Порівняльний аналіз для розрахункових схем чотиригранної (рис. 5, а), тригранної (рис. 5, б) та запропонованої в роботі вежі із сітчастою конфігурацією окремих секцій (рис 5, в) було здійснено для однаково навантажених ферм з рівною масою матеріалу.

Результати досліджень. Числові результати подані для випадку дії стискаючого навантаження $N = 30000 \text{ кгс}$ та поперечного зусилля $Q = 3000 \text{ кгс}$ для веж різних типів із однаковою масою та висотою секцій. Оскільки бокові стержні сітчастої ферми нахилені до вертикальної осі в двох площинах, то для проведення коректних порівнянь було прийнято, що висота секції, а для три- та чотиригранних ферм була однаковою і відповідала висоті двох секцій для вежі з сітчастою конфігурацією.

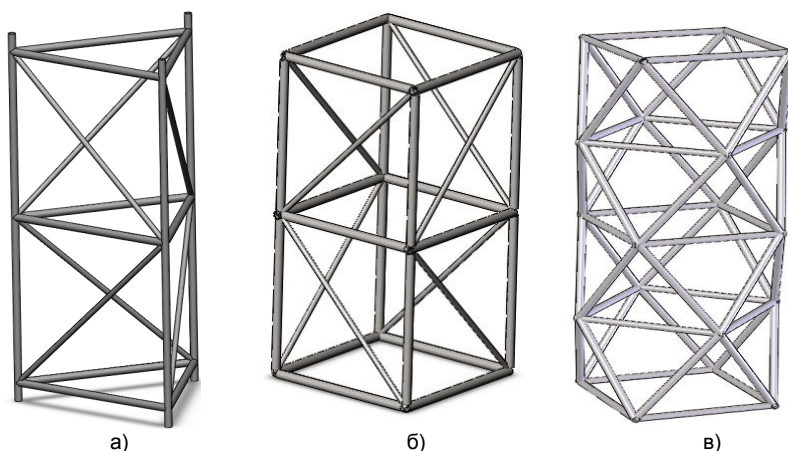


Рис. 5 – Імітаційні моделі секцій вишок:
а) трикутна секція; б) прямокутна секція; в) сітчаста секція

У цьому випадку об'єм матеріалу кожної такої секції без урахування чотирьох верхніх горизонтальних стержнів, які зараховувалися до об'єму матеріалу наступного поясу, відповідно до рис. 5, складала:

$$V_T = 6 \cdot L_{T1} \cdot F_{T1} + 6 \cdot L_{T2} \cdot F_{T2}, \quad (1)$$

$$V_C = 8 \cdot L_{C1} \cdot F_{C1} + 8 \cdot L_{C2} \cdot F_{C2}, \quad (2)$$

$$V_C = 12 \cdot L_C \cdot F_C, \quad (3)$$

де L_{T1} – довжина горизонтальних і вертикальних, а L_{T2} – діагональних стрижнів тригранної секції; F_{T1} – площа поперечного перерізу горизонтальних і вертикальних, а F_{T2} – діагональних стрижнів тригранної секції; L_{C1} – довжина горизонтальних і вертикальних, а L_{C2} – діагональних стрижнів чотиригранної секції; F_{C1} – площа поперечного перерізу горизонтальних і вертикальних, а F_{C2} – діагональних стрижнів чотиригранної секції; L_C – довжина стрижнів, а F_C – площа поперечного перерізу стрижнів сітчастої секції.

Параметри F_{T1} , F_{T2} , F_{C1} , F_{C2} , F_C – визначаються шляхом розв'язу-

вання задачі варіантного проектування за умов:

$$\min F; \quad \sigma \leq [\sigma] \text{ при } V_T = V_q = V_c. \quad (4)$$

Розв'язування задачі здійснюється із використанням запропонованого в [10] алгоритму методу послідовних наближень, основні етапи якого на кожному кроці наближень наступні. Із використанням скінченно-елементного аналізу визначаються зусилля та напруження в стержнях для кожної із досліджуваних веж при певних однакових умовах їх навантажень. Відповідно, в горизонтальних, вертикальних і діагональних, із урахуванням умов міцності і стійкості кожного із стрижнів окремого поясу у відповідності до алгоритму [10] встановлюються їх жорсткісні параметри (діаметри та товщина стінки трубчастого стержневого елемента) і далі площа поперечного перетину для вдоволення (4). Для наступного кроку наближень приймається $F_{T1}^{k+1}, F_{T2}^{k+1}, F_{q1}^{k+1}, F_{q2}^{k+1}$, як найбільші із знайдених для окремих стержнів значення. Аналогічним чином визначаються F_C^{k+1} для стержнів окремих секцій сітчастої вежі.

Із геометричних міркувань приймається $L_{T1} = L_{q1} = a$, де a – розмір перерізу чотиригранної секції і далі: $L_{T2} = L_{q2} = a \cdot \sqrt{2}$.

Таким чином

$$V_T = 6 \cdot a \cdot F_{T1} + 6 \cdot a \cdot \sqrt{2} \cdot F_{T2} = 6 \cdot a \cdot (F_{T1} + \sqrt{2} \cdot F_{T2}); \quad (5)$$

$$V_q = 8 \cdot a \cdot F_{q1} + 8 \cdot a \cdot \sqrt{2} \cdot F_{q2} = 8 \cdot a \cdot (F_{q1} + \sqrt{2} \cdot F_{q2}).$$

При визначенні V_c (див. (3)) із геометричних міркувань приймається також, що дві секції сітчастої ферми по висоті відповідають висоті ферми трикутного чи квадратного перетину.

Проектний порівняльний розрахунок геометричних параметрів стрижнів секцій вишок проведено із умови рівності матеріалоемності кожної із секцій (4), однакових висот секцій трикутної та чотирикутної вишок і рівності горизонтальних та вертикальних стрижнів.

Розрахунок секцій (як традиційних, так і сітчастої конструкцій) на статичну міцність та стійкість [2] було проведено методом скінченних елементів, у ANSYS Workbench для двох розрахункових випадків – дії тільки стискаючого зусилля (PB 1) та сумісної дії стискаючого та поперечного зусиль (PB 2).

Результати розрахунку стійкості та міцності кожної із секцій наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Максимальні напруження та коефіцієнти запасу стійкості

Параметр	Тригранна секція		Квадратна секція		Сітчаста секція	
	PB1	PB2	PB1	PB2	PB1	PB2
Максимальні еквівалентні напруження за Мізесом, МПа	259,7	372,9	199,0	274,6	181,4	224,9
Коефіцієнт запасу стійкості	2,99	2,59	6,52	2,78	3,27	3,02

Таким чином, запропонована сітчаста конструкція виявилась у

1,41 рази більш стійкою у порівнянні із чотиригранною та у 4,41 рази у порівнянні із тригранною при однакових витратах матеріалу на їх виготовлення.

За результатами розрахунку на статичну міцність секцій а) - в), були визначені максимальні напруження в кожному стрижні секцій і побудовані графіки їх розподілу по кожному із стержнів досліджуваних конструкцій (рис. 6). Стрижні кожної секції були умовно пронумеровані знизу вгору за годинниковою стрілкою для проведення порівняльного аналізу.

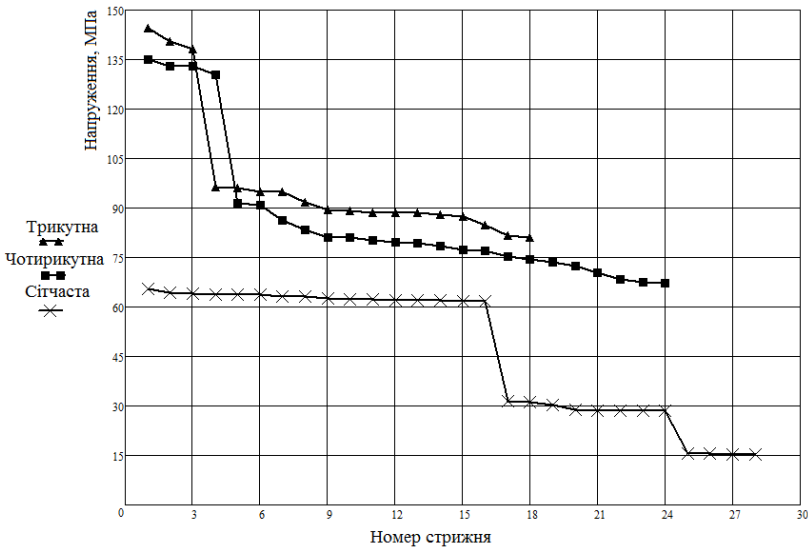


Рис. 6 – РВ 2. Максимальні еквівалентні напруження у стержнях, МПа

Висновки. З графіка розподілу максимальних еквівалентних напружень у стержнях секцій різних конфігурацій (рис. 6) видно, що максимальні еквівалентні напруження в стержнях секції сітчастої конструкції в) менші за максимальні напруження у вежах трикутної а) і квадратної б) та сітчастої конфігурації та більш рівномірно розподілені по кожному із стержнів.

Запас стійкості сітчастої майже у 1,4 раз вищий у порівнянні із чотирикутною та у 3,25 разів для РВ1 у порівнянні із трикутною, для РВ2 – у 1,61 разів у порівнянні із чотирикутною та у 4,41 разів у порівнянні із трикутною.

Таким чином, за цими показниками вежа сітчастої структури суттєво перевершує аналогічні показники вежі трикутного та квадратного форм перерізів при однаковій кількості матеріалу на їх виготовлення.

БІБЛІОГРАФІЧНІ ПОСИЛАННЯ

1. **Александров А. В.** Строительная механика. Тонкостенные пространственные системы / А. В. Александров, Б. Я. Лациников. – М.: Стройиздат, 1983. – 488 с.
2. **Алямовский А. А.** Инженерный анализ методом конечных элементов / А. А. Алямовский. – М.: ДМК, 2007. – 784 с.

3. **Батищев Д. И.** Методы оптимального проектирования. Учеб. Пособие / Д. И. Батищев. – М.: Радио и связь, 1984. – 248 с.
4. **Беленя А. П.** Металлические конструкции. Общий курс: Учебник для вузов / Под общей редакцией А. П. Беленя. – М.: Стройиздат, 1986. – 560 с.
5. **Вайнберг Д. В.** Метод конечного элемента в механике деформируемых тел. / Д. В. Вайнберг, А. С. Городецкий // Прикладная механика. – 1972. – Т.8. – Вып. 3. – С. 8–12.
6. **Клюев С. В.** Оптимальное проектирование стальной пространственной фермы / С. В. Клюев, В. В. Лесовек // Вестник ТГАСУ. – 2008. – №1. – С.74–79.
7. **Мажид К. И.** Оптимальное проектирование конструкций / К. И. Мажид. – М.: Высшая школа, 1979. – 237 с.
8. Описание изобретения к патенту. Заявка: 2001107720/03, 26.03.2001. Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. Российская федерация.
9. **Присекин В. Л.** Основы метода конечных элементов в механике деформируемых тел. Учебник / В. Л. Присекин, Г. И. Расторгуев. – Новосибирск: НГТУ, 2010. – 238 с.
10. **Разани Р.** Поведение равнонапряженной конструкции и ее отношение к конструкции минимального веса / Р. Разани // Ракетная техника и космонавтика: тр. американского института аэронавтики и космонавтики. – 1965. – Т.2 – С.115–124.
11. **Смирнов А. Ф.** Расчет сооружений с применением вычислительных машин / А. Ф. Смирнов, А. В. Александров. – М.: Стройиздат, 1964. – 380 с.
12. **Юрьев А. Г.** Эволюционные и генетические алгоритмы оптимизации строительных конструкций / А. Г. Юрьев, С. В. Клюев. – Белгород: БГТУ, 2006. – 134 с.

УДК 624.074.5

А. В. Захаров, А. П. Дзюба, д-р техн. наук, проф.

ЧИСЛОВОЙ АНАЛИЗ РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ КОНСТРУКЦИИ ВЫШКИ ДЛЯ ИМИТАЦИИ НАГРУЖЕНИЯ РАКЕТНОГО СТАРТОВОГО КОМПЛЕКСА

Проведен сравнительный конечно-элементный анализ напряженно-деформированного состояния конструкции башни различных конфигураций для имитации нагрузки в процессе силовых испытаний элементов ракетного стартового комплекса с целью определения их рациональных весовых параметров и обеспечения наибольшей несущей способности. Обоснована конфигурация башни и размеры поперечных сечений отдельных элементов для различных видов нагрузки.

Ключевые слова: ферменные конструкции, рациональное проектирование, несущая способность, имитационное моделирование.

UDC 624.074.5

O. V. Zakharov, A. P. Dzyuba, Dr. Sci. (Tech.)

NUMERICAL ANALYSIS OF RATIONAL PARAMETERS OF THE TOWER STRUCTURE FOR LOADING SIMULATION OF THE MISSILE LAUNCH COMPLEX

The comparative finite- elements analysis of stress-strain behavior of the tower structure for the simulation of loading at strength tests of Space Launch Complex

elements was carried out. The purpose is the selection of the rational parameters of these towers from the point of view of the extensive load-bearing capacity. The configuration of the tower and the dimensions of its elements cross-sections are grounded for the different types of the loading.

Keywords: *truss structure, rational design, bearing capacity.*

The developing problem of effective methods, algorithms for designing and justifying of the rational parameters of truss structures (rod towers), which are widely used in various industries, is still far from completion, that creates some difficulties in designing and determining of the basic laws of mass-dimensional parameters for such metal structures.

The article gives the problem of choosing the rational configuration and geometrical parameters of the rod elements of the tower-simulator for simulating and replacing the Launch Vehicle during the autonomous testing of the Lifting-and-Installation Unit, which is meant for the installation of the Launch Vehicle in the initial vertical position. The weight of the tower and attached substructures and the wind load were taken into account.

The towers structures, which have the cross-sections of rod square and equilateral triangle, and the tower structure of the net-type are considered. The comparative design analysis of the strength, buckling and the choice of the rational geometrical parameters of rods of tower sections of the specified configurations under condition of equal material consumption were carried out. Optimization was carried out by a variability method of successive approximations.

The results, which characterize the distribution of stresses and margins of buckling, indicate that the tower of the net-type structure significantly exceeds the similar indicators for towers with triangular and square cross-sectional shapes with the same amount of material for their manufacture. It indicates on the using effectiveness of such structural forms.

REFERENCES

1. **Aleksandrov A. V.** Structural mechanics. Thin-walled spatial systems / A. V. Aleksandrov, B. Ya. Lashchenikov. – Moscow: Stroizdat, 1983. – 488 p. (in Russian).
2. **Alyamovsky A. A.** Engineering analysis by the finite element method / A. A. Alyamovsky. – Moscow: DMK, 2007. – 784 p. (in Russian).
3. **Batishchev D. I.** Methods of optimal design. Textbook / D. I. Batishchev. – Moscow: Radio and Communication, 1984. – 248 p. (in Russian).
4. **Belenya A. P.** Metal constructions. General course: A textbook for high schools. / Under the general editing A. P. Belenya. – Moscow: Stroizdat, 1986. – 560 p. (in Russian).
5. **Weinberg D. V.** The Finite-Element Method in the mechanics of solids / D. V. Weinberg, A. S. Gorodetsky // Applied Mechanics. – 1972. – T. 8. – Vol. 3. – P. 8–12. (in Russian).
6. **Klyuev S. V.** Optimum design of a steel spatial truss / S. V. Klyuev, V. V. Lesovek // Bulletin of TASU. – 2008. – No1. – P. 74–79. (in Russian).
7. **Majid K. I.** Optimal design engineering / K. I. Majid. – Moscow: Higher School, 1979. – 237 p. (in Russian).

8. Description of the invention to the patent. Application: 2001107720/03, 26.03.2001. Federal Service for Intellectual Property, Patents and Trademarks. Russian Federation. (in Russian).

9. **Prisekin V. L.** Fundamentals of the finite element method in the mechanics of solids. Textbook / V. L. Prisekin, G. I. Rastorguev. – Novosibirsk: Publishing House of the National Technical University, 2010. – 238 p. (in Russian).

10. **Razani R.** The behavior of an equally stressed construction and its relation to the construction of a minimum weight / R. Razani // Missile technology and astronautics: tr. of American Institute of Aeronautics and Astronautics. – 1965. – T.2 – P.115–124. (in Russian).

11. **Smirnov A. F.** Calculation of structures using computers / A. F. Smirnov, A. V. Aleksandrov. – Moscow: Stroiizdat, 1964. – 380 p. (in Russian).

12. **Yuriev A. G.** Evolutionary and genetic algorithms for optimization of building structures / A. G. Yuriev, S. V. Klyuev. – Belgorod: BSTU Publishing House, 2006. – 134 p. (in Russian).

¹ Державне підприємство
Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля

² Дніпропетровський національний
університет ім. Олеся Гончара,
Дніпро, Україна

Надійшла до редколегії 12.05.2017